

CIMAD

Madrid, España

10-14 de Junio

III Congreso Ibero-Latinoamericano
de la Madera en la Construcción

24

LIBRO DE ACTAS DE
RESÚMENES EXTENDIDOS

Anfitriones:



CIMAD

Madrid, España

10-14 de Junio

**III Congreso Ibero-Latinoamericano
de la Madera en la Construcción**

24

LIBRO DE ACTAS DE RESÚMENES EXTENDIDOS

Organizado por el Grupo de Investigación
Construcción con Madera



Web del congreso:

<https://www2.montes.upm.es/CIMAD2024/>

índice

01 comités

02 anfitriones

03 entidades colaboradoras

04 entidades patrocinadoras

05 libro de actas de RE

Comité internacional

El Comité Internacional está integrado por miembros de reconocido prestigio de los países que más representación han tenido en las ediciones anteriores de CIMAD:

Alfredo Dias Portugal Universidad de Coimbra

Alfredo Guillaumet Argentina Universidad Tecnológica Nacional

Carlito Calil Junior Brasil Universidad de Sao Paulo

Cecilia Poblete Chile Universidad del Bio Bio

Francisco Arriaga Martitegui España Universidad Politécnica de Madrid

João Negrão Portugal Universidad de Coimbra

Jose Ramón Aira Zunzunegui España Universidad Politécnica de Madrid

Laura Moya Uruguay Universidad ORT Uruguay

Miguel Esteban Herrero España Universidad Politécnica de Madrid

Miguel Tortoriello Argentina Universidad Nacional del Noroeste de Buenos Aires

Peter Dechent Chile Universidad de Concepción

Raquel Gonçalves Brasil Universidad Estadual de Campinas

René Navarrette México Universidad de Guanajuato

Comité organizador

El Comité Organizador está integrado por integrantes del Grupo de Investigación Construcción con Madera y otros colaboradores afines al mismo:

PRESIDENTE

Francisco Arriaga Martitegui Universidad Politécnica de Madrid

COORDINADOR

Jose Ramón Aira Zunzunegui Universidad Politécnica de Madrid

MIEMBROS DEL COMITÉ

Almudena Majano Majano España Universidad Politécnica de Madrid

Antonio José Lara Bocanegra España Universidad Politécnica de Madrid

Carlos Martínez Criado España Universidad Politécnica de Madrid

Carlos Osuna Sequera España Instituto Nacional de Investigación Agraria

Beatriz González Rodrigo España Universidad Politécnica de Madrid

Daniel Fernández Llana España Universidad Politécnica de Madrid

Emilio Luengo Cuadrado España Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera
Eva Hermoso Prieto España Instituto Nacional de Investigación Agraria
Guillermo Íñiguez González España Universidad Politécnica de Madrid
Ignacio Bobadilla Maldonado España Universidad Politécnica de Madrid
Irene Jimeno Guadalix España Toca Madera · Sounds Wood
José Luis Gómez Royuela España Universidad Politécnica de Madrid
Juan Francisco Padial Molina España Universidad Politécnica de Madrid
Laura Gonzalo Calderón España Universidad Politécnica de Madrid
Miguel Esteban Herrero España Universidad Politécnica de Madrid

Comisión científica

Guillermo Íñiguez González España Universidad Politécnica de Madrid (coordinador)
Daniel Fernández Llana España Universidad Politécnica de Madrid (coordinador)
Francisco Arriaga Martitegui España Universidad Politécnica de Madrid
Almudena Majano Majano España Universidad Politécnica de Madrid
Antonio José Lara Bocanegra España Universidad Politécnica de Madrid

Comité científico

El Comité Científico está integrado por un nutrido grupo de investigadores de prestigio de los principales Centros de Investigación y Universidades de los países del área geográfica objetivo de CIMAD 2024 MADRID, además de otros invitados:

Abel Vega Cueto España Fundación CETEMAS/Bosquia
Alexander Opazo Vega Chile Universidad del Bío-Bío
Alfonso Lozano Martínez-Luengas España Universidad de Oviedo
Alfredo Aníbal Guillaumet Argentina Universidad Tecnológica Nacional
Alina Aulet Uruguay Universidad de la República
Ana Clara Cobas Argentina Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires
Ana María Lacasta España Universitat Politècnica de Catalunya
Antonio Alves Dias Brasil Universidade de São Paulo
Azahara Soilán Cañás España Agencia Gallega de la Industria Forestal (XERA – CIS Madeira)
Beatriz González Rodrigo España Universidad Politécnica de Madrid
Carlito Calil Junior Brasil Universidade de São Paulo
Claudia Marcela Ibañez Ojeda Uruguay Universidad de la República
Daniel Godoy Machado Uruguay Universidad de la República
David Gil Moreno Irlanda University of Galway
Dulce Franco Henriques Portugal Instituto Superior de Engenharia de Lisboa

Eduardo Antonio Torrán *Argentina* Universidad Tecnológica Nacional

Eleana Spavento *Argentina* Universidad Nacional de La Plata

Emilio Andrés Luengo Cuadrado *España* Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera, AITIM

Eva Hermoso Prieto *España* ICIFOR, INIA-CSIC

Franco Benedetti Leonelli *Chile* Universidad del Bío-Bío

Gonzalo Cetrangolo de Castro *Uruguay* Universidad de la República

Helena Cruz *Portugal* LNEC Laboratorio Nacional de Engenharia Civil

Ignacio Bobadilla *España* Universidad Politécnica de Madrid

João H. Negrão *Portugal* Universidade de Coimbra

João Vicente de Figueiredo Latorraca *Brasil* Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

José Saporiti Machado *Portugal* LNEC Laboratorio Nacional de Engenharia Civil

Jose Ramón Aira Zunzunegui *España* Universidad Politécnica de Madrid

José Manuel Cabrero Ballarín *España* Universidad de Navarra

Josu Benito Ayúcar *España* TECNALIA

Juan Francisco Correal Daza *Colombia* Universidad de los Andes

Juan José Fontana Cabezas *Uruguay* Universidad de la República

Laia Haurie *España* Universitat Politècnica de Catalunya

Laura Moya Silva *Uruguay* Universidad ORT Uruguay

Luis Alfonso Bastera *España* Universidad de Valladolid

Luísa Hora de Carvalho *Portugal* Instituto Politécnico de Viseu

Manuel Cesáreo Touza Vázquez *España* Agencia Gallega de la Industria Forestal (XERA – CIS Madeira)

Manuel Guaita Fernández *España* Universidad de Santiago de Compostela

María Cecilia Poblete Arredondo *Chile* Universidad del Bío-Bío

María Dolores Otero Chans *España* Universidad da Coruña

María Teresa de Troya Franco *España* ICIFOR, INIA-CSIC

Marta Sáenz Muñoz *Costa Rica* Tecnológico de Costa Rica

Maurizio Piazza *Italia* University of Trento

Miguel Esteban *España* Universidad Politécnica de Madrid

Pamela Yohana Fank *Argentina* Universidad Tecnológica Nacional

Pedro Palma *Suiza* Empa – Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology

Poliana Dias de Moraes *Brasil* Universidade Federal de Santa Catarina

Raymundo Dávalos Sotelo *México* Instituto de Ecología, A.C.

René Navarrete Padilla *México* Universidad de Guanajuato

Vanesa Baño *España* InnovaWood

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Montes, Forestal y del Medio Natural - UPM

La escuela pertenece a la Universidad Politécnica de Madrid y se encuentra ubicada en la zona nordeste de la Ciudad Universitaria, en un atractivo paraje rodeado de vegetación.

La ingeniería de Montes y Forestal en España cuenta con una larga historia, de 175 años de desarrollo. La Escuela ha sido pionera en la incorporación de la construcción con madera y el cálculo de estructuras de madera como materias regladas en sus planes de estudios, al ser la madera el material forestal por excelencia. Por ello su papel es fundamental en el conocimiento técnico y la investigación de este material como producto de construcción, formando a numerosos profesionales que han aportado su esfuerzo y capacitación en el ámbito de las estructuras y construcción con madera de España.



<http://www.montes.upm.es>

C/ José Antonio Novais, nº 10

Edificio Mones: 91 06 71510

Edificio Forestales: 91 06 71509

Autobús: 82-132-F-G

Metro: Vicente Aleixandre o Ciudad Universitaria (L6)

Fachada del edificio principal de la ETS de Ingeniería de Montes, Forestal y del Medio Natural de Madrid. UPM.

Fuente: descubriendohojas.blogspot.com. Autor: Lisa Calle.

Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid - UPM

Escuela perteneciente así mismo a la Universidad Politécnica de Madrid, que se encuentra ubicada en Ciudad Universitaria y es una institución de referencia en la enseñanza de la arquitectura en España. Cuenta con una larga andadura y da cabida a un importantísimo número de alumnos que la eligen para cursar los estudios que conducen a la profesión de Arquitecto.

Como no podía ser de otra manera la escuela está muy interesada en la construcción con madera como medio para la innovación arquitectónica, y también debido a su amplia aplicación histórica. Por otro lado la madera es un material de interés por sus innegables virtudes ambientales, que son tan necesarias en este momento en el que se replantean muchos paradigmas sobre el uso de los recursos y el efecto que esto tiene sobre el clima.



<http://www.aq.upm.es>

Avenida Juan Herrera, Nº 4

91 336 65 01 / 6507

Autobus: 46-160-161-U

Metro: Ciudad Universitaria (L6), Moncloa (L6,L3)

Fachada de entrada al edificio Antiguo de la ETS Arquitectura de Madrid. UPM

Fuente: urbipedia.org. Autor: Miguel303xm~commonswiki

entidades colaboradoras



Instituto de Ciencias de la Construcción
EDUARDO TORROJA



INSTITUTO DE LA INGENIERIA
DE ESPAÑA



entidades patrocinadoras



Asociación
Española para
la Sostenibilidad
Forestal



Finsa



índice libro de actas de RE

AJUSTE DE MODELOS NUMÉRICOS PARA LA OPTIMIZACIÓN EN FASE DE DISEÑO DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE PASARELAS PEATONALES DE MADERA	7
AMARAR, "TRES PINOS / 45 M2". DISSENY HUB BARCELONA. UNA REFLEXIÓN CONSTRUIDA SOBRE LA IMPORTANCIA Y LAS POSIBILIDADES DEL EMPLEO DE MADERA LOCAL EN MALLORCA	12
ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE BLACK AND WHITE BUILDING	15
ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA ESTRUCTURAL Y AMBIENTAL DE LOSAS PREFABRICADAS EN MADERA	18
ANÁLISIS DE LOS TRABAJOS REALIZADOS EN EL EDIFICIO DE LA PUERTA DEL SOL N°9 A LO LARGO DE SU HISTORIA	23
ANÁLISIS DE PUENTES TÉRMICOS LINEALES ENTRE MUROS Y LOSAS DE EDIFICIOS DE MADERA	28
ANÁLISIS DE SISTEMAS DE FIJACIÓN BAJO CARGAS SÍSMICAS PARA DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE ENTRAMADO LIGERO CON MADERA PRODUCIDA Y COMERCIALIZADA EN COSTA RICA	33
ANÁLISIS DEL ESTADO DE CONSERVACIÓN DE LA ESTRUCTURA DE MADERA DE UNA AVIONETA MODELO JODEL COMPOSTELA D-119-S DE 1966	38
ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LA RESISTENCIA AL ARRANQUE DE TORNILLOS ESTRUCTURALES TODO ROSCA PERPENDICULARES A LA FIBRA EN MADERA DE ROBLE EUROPEO	43
ANALYSIS AND POST-PROCESSING OF SINGULAR GEOMETRY TIMBER BUILDINGS	48
APLICACIÓN DE LA MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD DE ULTRASONIDOS (SYLVATEST 4.0) A LA CARACTERIZACIÓN DE MADERA ESTRUCTURAL DE PINO SILVESTRE	53
AVALIAÇÃO COMPARATIVA DA SUSTENTABILIDADE DE SOLUÇÃO PREFABRICADA EM MADEIRA	58
AVALIAÇÃO DE DURABILIDADE EM PAINÉIS DE VEDAÇÃO EXTERNOS PRÉ-FABRICADOS COM MADEIRA DE PLANTIOS FLORESTAIS	64
BLUEWOODENHOUSE - CASA MODULAR EM MADEIRA GRID-OFF E DE BAIXO CONSUMO DE ÁGUA	69
CALIBRACION DEL MODELO NUMERICO DE UN EDIFICIO CLT DE 5 PISOS CONSIDERANDO MEDICIONES DE SUS PROPIEDADES DINAMICAS LATERALES	73
CAPACIDAD A HENDIDO DE VIGAS DE HAYA CARGADAS PERPENDICULARMENTE A LA FIBRA MEDIANTE CONEXIONES CON PASADORES: INFLUENCIA DE LAS PROPIEDADES DE FRACTURA	78
CARACTERIZAÇÃO DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS DE MADEIRA LAMELADA COLADA DE SCHIZOLOBIUM AMAZONICUM (PARICÁ)	83
CARACTERIZAÇÃO ELÁSTICA DA MADEIRA POR ULTRASSOM UTILIZANDO CORPO DE PROVA POLIÉDRICO COM NÚMERO REDUZIDO DE FACES	89
CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DE PAINEL OSB DE PINUS spp. AGLUTINADO COM RESINA FENÓLICA COM LIGNINA	94
MECHANICAL CHARACTERIZATION OF CROSS LAMINATED TIMBER-CONCRETE PANELS IN BENDING TESTS	99
CARACTERIZACIÓN DE MADERA ASERRADA PROVENIENTE DE ARBOLES SINIESTRADOS DE PINUS RADIATA D.DON	104
CARACTERIZACIÓN DEL CLON MC DE CHOPO Y VIABILIDAD PARA SU USO ESTRUCTURAL COMO VIGA LAMINADA. INFLUENCIA DEL TURNO DE CORTA	109

CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO A FLEXIÓN DE LOSAS MIXTAS DE HORMIGÓN LIGERO Y MADERAS LAMINADAS LOCALES	114
CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL EN LABORATORIO DE ESTRUCTURAS DE MADERA LAMINADA MEDIANTE TÉCNICAS RESISTOGRÁFICAS Y ULTRASÓNICAS	119
CARACTERIZACIÓN MECÁNICA POR ONDAS DE ESFUERZO DE MATERIALES COMPUESTOS DE ASERRÍN DE MADERA, ADHESIVO NATURAL Y CEMENTOS	124
CARPENTRY CONNECTIONS – A REVIEW ON STEP-JOINTS	129
LA MADERA CONSTRUCTIVA EN EL DISEÑO DE NUEVOS FORMATOS DE COHOUSING: LA CASA SIMBIONTE COMO PROTOTIPO	135
CENTRO DE VISITANTES DEL NUEVO PARQUE NACIONAL SIERRA DE LAS NIEVES: UNA APUESTA POR LA MADERA ESTRUCTURAL. ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE MATERIALES	140
CLASSIFICAÇÃO DA MADEIRA PARA APLICAÇÃO ESTRUTURAL UTILIZANDO AS VERTENTES PROPOSTAS EM RECENTE ATUALIZAÇÃO DE NORMA BRASILEIRA	144
COMBINACIÓN DE MADERA DE PINO Y CHOPO PARA LA ELABORACIÓN DE VIGAS LAMINADAS MIXTAS	149
COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE UNIONES MADERA-MADERA DE PINO DE RÁPIDO CRECIMIENTO Y CLAVIJAS DE MADERAS	154
CONEXIÓN AXIAL DE TORNILLOS EN PIES DERECHOS DE BORDE PARA CONTROLAR EL VOLCAMIENTO EN MUROS DE ENTRAMADO LIGERO DE MADERA EN EL SISTEMA MARCO PLATAFORMA	159
CONSTRUCCIÓN, MODELADO NUMÉRICO E IDENTIFICACIÓN MODAL EXPERIMENTAL DE UN PROTOTIPO DE ESTRUCTURA DE MADERA A ESCALA 1/2	163
CONTRASTE EN EL COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE ESTRUCTURAS DE MARCO PLATAFORMA SEGÚN LA RIGIDEZ EN EL PLANO DEL DIAFRAGMA: UNA METODOLOGÍA IMPLEMENTABLE EN ETABS	168
CROSS-LAMINATED TIMBER AND CONCRETE COMPOSITE: AN EXPERIMENTAL AND NUMERICAL EVALUATION	173
CÚPULA ELÍPTICA DE LA CAPILLA DE LA UNIVERSIDAD FRANCISCO DE VITORIA (POZUELO DE ALARCÓN, MADRID)	178
DEFINICIÓN DE PARÁMETROS Y PROPUESTA DE FICHA TIPOLOGICA APLICADA A LAS 16 IGLESIAS PATRIMONIALES DE CHILOÉ	183
DEFINING PARAMETERS TO ACHIEVE MAXIMUM RATIONALIZATION OF CROSS-LAMINATED TIMBER (CLT) ARCHITECTURAL DESIGNS: THE CASE OF THE BAZILIAN CONTEXT	188
DEL DICHO AL HECHO: DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE LA TÉCNICA DE ENCOLADO EN VERDE USANDO ESPECIES NATIVAS CHILENAS	193
DENSITY ESTIMATION BY THERMOGRAPHY IN RECOVERED TIMBER	197
DERIVAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E AO CORTE – EN 384. APLICAÇÃO A UMA ESPÉCIE DE BAIXA MASSA VOLUMICA	200
DESARROLLO DE PLATAFORMA DE PRODUCTO MODULAR BASADA EN BIM, APLICADA A VIVIENDAS MULTIFAMILIARES DE BAJA Y MEDIANA ALTURA EN MADERA	205
DESARROLLO DE SISTEMAS CONSTRUCTIVOS DE PINO PRESENTE EN EL SUDOESTE EUROPEO Y CORCHO NATURAL COMO EJEMPLO DE TRANSICIÓN HACIA LA CONSTRUCCIÓN DE ALTA EFICIENCIA ENERGÉTICA Y BAJO IMPACTO MEDIOAMBIENTAL, EL PROYECTO IMIP	210
DESCARBONIZANDO EL SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN CON MADERA PROCEDENTE DE BOSQUES SOSTENIBLES	214
DESENVOLVIMENTO DA MADEIRA LAMELADA PREGADA (MLP) PARA USO DE SISTEMA PLACA	219
DESIGN AND CONSTRUCTION OF A TIMBER BUILDING FOR APARTMENTS, LIBRARY AND OFFICES IN NORWAY	224

DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DEL COEFICIENTE DE ROZAMIENTO DE MADERA MICROLAMINADA DE EUCALIPTO (EUCALYPTUS GLOBULUS LABILL.)	227
DETERMINATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF EUROPEAN OAK ROUNDWOOD SPECIES FOR STRUCTURAL PURPOSES	231
DIEZ AÑOS DE TRANSFORMACIÓN: AVANCES EN DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN CON MADERA EN LA UNIVERSIDAD DE CIENCIAS APLICADAS DE VIENA - FH CAMPUS WIEN Y SU CRECIENTE COMPROMISO INTERNACIONAL	236
DISEÑO DE EDIFICACIONES RESIDENCIALES EN ALTURA EN CLT EN EL CONTEXTO CHILENO. LA TORRE PYMELAB-MADERA COMO CASO DE ESTUDIO	241
DISEÑO DE UN SISTEMA DE UNIÓN MADERA-MADERA ADAPTADO A LA FABRICACIÓN DIGITAL Y SU APLICACIÓN EN LA CONSTRUCCIÓN DE UN MÓDULO ESPACIAL “SÓLO MADERA”	246
DISEÑO PARA EL DESMONTAJE Y LA ADAPTABILIDAD (DFD Y DFA) EN LA CONSTRUCCIÓN DE MADERA: SITUACIÓN, AVANCES, RETOS Y EJEMPLOS DE APLICACIÓN	250
DISEÑO Y MODELAMIENTO DE UNA ESTUFA DE BIOMASA VEGETAL PARA MEJORAR LA EFICIENCIA ... 219	255
EDIFICIO TAMANGO: EXPLORACIÓN TIPOLOGICA PARA CONSTRUIR 12 PISOS CON VIVIENDAS DE MADERA EN ZONA SÍSMICA	260
EDIFICIOS DE ENTRAMADO DE MADERA DE MEDIA ALTURA Y SU POTENCIAL PARA REDUCIR LOS GEI EN DIFERENTES CLIMAS: EL CASO CHILENO Y SU OBJETIVO DE CARBONO NEUTRALIDAD PARA 2050	265
EFFECTO DE LA PRESENCIA DE HOLGURA EN EL COMPORTAMIENTO AL FUEGO DE UNIONES METÁLICAS OCULTAS PARA ESTRUCTURAS DE MADERA	270
EL NUEVO ROL DE LA MADERA ESTRUCTURAL EN EL CONTEXTO DE LA EMERGENCIA CLIMÁTICA. REALIZACIONES RECIENTES EN EDIFICACIÓN	274
EL PUENTE PEATONAL DE MADERA SOBRE EL RÍO GUADALHORCE EN MÁLAGA: UNA REVOLUCIÓN SOSTENIBLE	279
EL TALLER EXPERIMENTAL DE CARPINTERÍA DE ARMAR. DÉCADA 2013-2023	282
EL TROJE PURÉPECHA, HERENCIA EN MADERA	286
EMPLEO DE BIOADHESIVO PARA LA ELABORACIÓN DE PANELES DE MADERA MICROLAMINADA DE CHOPO: FABRICACIÓN Y PROPIEDADES MECÁNICAS	290
ESTIMACIÓN DE DENSIDAD DE LA MADERA DE ARBOLADO URBANO MEDIANTE MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS	295
ESTRATÉGIAS SUSTENTÁVEIS NA CONSTRUÇÃO DE INSTITUIÇÕES EDUCACIONAIS: ANÁLISE DA EVOLUÇÃO DOS SISTEMAS CONSTRUTIVOS EM ESCOLAS E CRECHES EM SÃO PAULO	300
ESTUDIO COMPARATIVO DE LA CONSTRUCCIÓN DE LOS ENTRAMADOS DE MADERA EN LA ARQUITECTURA DE LOS NÚCLEOS URBANOS DE MADRID Y MÁLAGA	304
ESTUDIO COMPARATIVO DE PANELES DE MADERA LAMINADA MASIVA UNIDOS CON DISTINTOS TIPOS DE CLAVIJAS	308
ESTUDIO DE LA CARPINTERÍA DE MADERA EN EDIFICIOS PROTEGIDOS. IGLESIA DE NUESTRA SEÑORA DE MONTSERRAT (MADRID)	313
ESTUDIO DE LA MEJORA DE AISLAMIENTO A RUIDO DE IMPACTO DE SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS MIXTAS CLT / HORMIGÓN + NEUMÁTICO FUERA DE USO EN PROBETAS DE TAMAÑO REDUCIDO	318
ESTUDIO PRELIMINAR DE TROZAS DE <i>Acacia dealbata</i> Link PARA USO EN CONTRUCCIÓN: CARACTERIZACIÓN VISUAL Y ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS	323
ESTUDO DAS LIGAÇÕES PREGADAS E CAVILHADAS PARA USO EM PAINÉIS ESTRUTURAIS	328
EVALUACIÓN DE LA APTITUD ESTRUCTURAL DE FRONDOSAS INFRAUTILIZADAS EN ESPAÑA: MADERA ASERRADA DE HAYA DE PRIMERA Y SEGUNDA CALIDAD Y CHOPO	333

EVALUACIÓN DE LA EFICACIA DE TRATAMIENTOS DE PROTECCIÓN SUPERFICIAL APLICADOS EN TABLEROS OLB	338
EVALUACIÓN DE UNIONES FINGER-JOINT PARA PRODUCTOS DE MADERA DE INGENIERÍA DE PINO SILVESTRE (PINUS SYLVESTRIS L.) DE ORIGEN ESPAÑOL	343
EVALUACIÓN IN-SITU DE LA VARIACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO DE LA MADERA ESTRUCTURAL EXPUESTA A LA INTEMPERIE EN ATMÓSFERAS TROPICALES VOLCÁNICAS	348
EVALUACIÓN PARAMÉTRICA DE MUROS POSTENSADOS DE CLT EN ESTRUCTURAS AISLADAS SÍSMICAMENTE	353
EXPERIMENTAL CHARACTERIZATION OF HYBRID GLULAM BEAMS	357
ENGINEERING FIRE-SAFE BUILDINGS WITH MASS TIMBER	362
EXPERIMENTAL INSIGHTS INTO THE DISMANTLABILITY OF LIGHTFRAME TIMBER PREFABRICATED WALLS	366
FINANSPARKEN BJERGSTED: AN INNOVATIVE TIMBER-FRAMED OFFICE BUILDING	370
FÍSICA DE LA CONSTRUCCIÓN EN LAS ENVOLVENTES DE MADERA	374
FUNCIONAMIENTO Y ESTRUCTURA DE LA PRENSA DEL LAGAR TRADICIONAL DE BALTANÁS (PALENCIA) HABITAR LA PENDIENTE: CABAÑÓN DLPM	379
HACIA LA FABRICACIÓN DIGITAL DE ESTRUCTURAS LAMINARES DE MADERA DEFORMADAS ELÁSTICAMENTE CON MALLADOS ORTOGONALES	388
HERRAMIENTA DE ESTIMACIÓN DE DISPONIBILIDAD DE MADERA ESTRUCTURAL A NIVEL DE CUENCA FORESTAL	393
HIPÓTESIS SOBRE EL PROCESO CONSTRUCTIVO DE LA ARMADURA DE CUBIERTA DEL CONVENTO DE GRACIA EN ÁVILA S XVI	398
HUT – INDOOR CLIMBING CENTRE, SKIEN, NORWAY	403
IGLESIAS CON BÓVEDAS DE MADERA EN EL PAÍS VASCO: UNIDADES DE MEDIDA Y SU RELACIÓN CON LAS ESTRUCTURAS NAVALES DEL SIGLO XVI	407
INFERÊNCIA DE PROPRIEDADES FLORESTAIS UTILIZANDO MÉTODOS NÃO DESTRUTIVOS E APRENDIZADO DE MÁQUINA	408
INFLUENCE OF THE USE OF UNDERUTILISED TREE AND SHRUB SPECIES ON FORMALDEHYDE EMISSIONS FROM PARTICLEBOARD	413
INFLUENCIA DE LA ESPECIE Y CALIDAD EN LA VELOCIDAD DE CARBONIZACIÓN EN MADERA DE RÁPIDO CRECIMIENTO	418
INFLUENCIA DE LAS INTERVENCIONES EN VIVIENDAS DE MADERA CON PISOS VENTILADOS EN LA APARICIÓN DEL HONGO SERPULA LACRYMANS	423
INFLUENCIA DEL CONTENIDO DE HUMEDAD EN LA MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD DE ONDA DE ULTRASONIDO EN CUPRESSUS LUSITÁNICA Y TECTONA GRANDIS	428
INNOVACIÓN ACÚSTICA EN LA PROTECCIÓN DE PATRIMONIO DE MADERA: DETECCIÓN DE LARVAS DE HYLOTRUPES BAJULUS L. CON TECNOLOGÍA MEMS	433
INSPECCIÓN Y PROPUESTA DE INTERVENCIÓN EN ESTRUCTURA DE MADERA DE CABANA DE TEITO PARA USO TURÍSTICO	437
LA IGLESIA SAN PEDRO DE NINACACA: CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS DE LAS PRIMERAS CUBIERTAS MESTIZAS DE MADERA Y CAÑA EN PERÚ DURANTE EL SIGLO XVI	442

LA REGULARIDAD EN LA ANCHURA DE ANILLOS DE CRECIMIENTO Y SU EMPLEO EN LA CLASIFICACIÓN VISUAL DE LA MADERA PARA SU ASIGNACIÓN AL SISTEMA EUROPEO DE CLASES RESISTENTES	447
LAS ESCUELAS TALLER EN LA IMPLEMENTACIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN CON MADERA Y BAMBÚ EN CONTEXTOS EN DESARROLLO	452
LCA OF HARVESTED WOOD PRODUCTS (HWP): A REVIEW ON CARBON STORAGE INCLUDING EXAMPLES OF GOOD PRACTICE IN EGYPT	457
LIFE CYCLE ASSESSMENT OF MARITIME PINE SAWNWOOD	462
LOSETAS NERVADAS DE MADERA	467
MODELO DE RESISTÊNCIA PELA DENSIDADE BÁSICA COMO PARÂMETRO COMPLEMENTAR EM INSPEÇÕES DE ESTRUTURAS DE MADEIRA	472
MODELO LINK-FRAME PARA MUROS DE MADERA DE ENTRAMADO LIGERO Y CLT Y SU APLICACIÓN EN UN EDIFICIO CON VARIANTES DE RIGIDEZ DE LA LOSA FUERA DEL PLANO	477
MÓDULO DE RIGIDEZ DEL MULTIMATERIAL DE MADERA-ADHESIVO-MALLA DE PINUS PSEUDOSTROBUS (PINO), TABEUIA ROSEA (ROSA MORADA) Y QUERCUS SCYTOPHYLLA (ENCINO)	482
NBR 7190:2022 - PROJETO DE ESTRUTURAS DE MADEIRA: NOVOS CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO	487
NUEVOS CAMINOS PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE CÚPULAS DE MADERA DE LAZO ESTRUCTURAL	492
EL ESCENARIO DE LA MADERA DE INGENIERÍA EN BRASIL. O CENÁRIO DA MADEIRA ENGENHEIRADA NO BRASIL	497
ORUETA ETXEA: RETOS TÉCNICOS PARA LA CERTIFICACIÓN PASSIVHAUS DE UNA ARQUITECTURA SIN HORMIGÓN	501
PATOLOGÍA DE RUIDOS EN SUELOS DE MADERA	506
PATRIMONIO INDUSTRIAL CON MADERA EN ESPAÑA	510
PHYSICAL AND MECHANICAL AGING OF COMPOSITES. NON-DESTRUCTIVE METHODS FOR QUALITY CONTROL	515
PHYSICAL AND MECHANICAL ASSESSMENT OF ITAUBA WOOD WELDED BY ROTARY FRICTION	520
PLANTEAMIENTO DE LA DURABILIDAD EN LA SEGUNDA GENERACIÓN DEL EUROCÓDIGO 5 ESTRUCTURAS DE MADERA	525
PREDICTING EXTERNAL FLAMES THROUGH VERTICAL OPENINGS IN A COMPARTMENT WITH AN EXPOSED TIMBER SOFFIT	530
PREDICTING THE GROWTH, INTENSITY, AND DURATION OF A POSSIBLE FIRE SCENARIOS IN A COMPARTMENT WITH AN EXPOSED TIMBER SOFFIT	535
PROPOSTA DE PRODUTO CONSTRUTIVO FABRICADO COM RESÍDUOS DE MADEIRA	540
MÉTODO DE INSPEÇÃO DE MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM ELEMENTOS ESTRUTURAIS DE MADEIRA	544
PROPOSTAS DE LIGAÇÕES RESISTENTES A MOMENTOS PARA PÓRTICOS DE MADEIRA	549
PROPUESTA DE DIVULGACIÓN DE CUMPLIMIENTO TÉCNICO EN OBRAS ARQUITECTÓNICAS EN MADERA PARA VALIDACIÓN EN EL MERCADO CHILENO	554
PROTOTIPO MODULAR PREFABRICADO DE 'MADERA MACIZA INDUSTRIALIZADA' ADAPTABLE A LAS PENDIENTES PRONUNCIADAS DEL NORTE DE PORTUGAL	559
QUALITY SORTING OF SAWN WOOD PRODUCTS USING NIR SPECTROSCOPY AND CHEMOMETRIC MODELS	562
REFORMA Y AMPLIACION CASA CHANOS	567

RENDIMIENTOS DE PINO SILVESTRE (PINUS SYLVESTRIS) DE 2ª Y 3ª CALIDAD DE CARPINTERIA POR CLASIFICACION MECANICA A FLEXION Y TRACCION Y CLASIFICACION VISUAL	572
RESISTENCIA AL APLASTAMIENTO PARA UNIONES TIPO CLAVIJA EN PINO ELLIOTTI	577
RESPUESTA DE LA ADHESIÓN AL ENCOLADO EN VERDE UTILIZANDO ESPECIES DE NOTHOFAGUS CRECIDAS EN CHILE	582
RESPUESTA DINÁMICA DE LA PASARELA DE MADERA DE 270 M SOBRE EL RIO GUADALHORCE	587
ROBINIA PSEUDOACACIA “ACACIA BLANCA”: PROPIEDADES MECÁNICAS DE SU MADERA	592
SECADO BAJO VACIO CON CALENTAMIENTO POR RADIOFRECUENCIA DE MADERA JUVENIL DE EUCALYPTUS NITENS PROVENIENTE DE PLANTACIONES EN CHILE	593
SEGUIMIENTO DE LA DEGRADACIÓN DE LA MADERA ESTRUCTURAL POR HYLOTRUPES BAJULUS L. MEDIANTE MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS	598
SEGUIMIENTO DE LAS PROPIEDADES MODALES DE UN EDIFICIO DE CLT DE MEDIANA ALTURA DURANTE EL MONTAJE POR MEDIO DE VIBRACIONES AMBIENTALES	602
SHRINKAGE EFFECT ON RADIAL AND TANGENTIAL DIRECTION STRESSES IN CYLINDRICAL WOOD PIECES OF PINUS TAEDA	607
SIMPLIFICACIÓN EN LA MODELIZACIÓN DE UNIONES EN MADERA	612
SPOR X – 10-STOREY TIMBER OFFICE BUILDING, DRAMMEN, NORWAY	616
A PROPOSED STANDARDIZATION FRAMEWORK FOR RECOVERED TIMBER STRENGTH GRADING	621
STRUCTURAL BAMBOO CULMS IN THE CURRENT EUROPEAN REGULATORY CONTEXT	626
STUDY OF FOREST MANAGEMENT CYCLES FOR CONSTRUCTION MATERIAL IN PAKISTAN THROUGH AN UNDERSTANDING OF JAPAN’S MATERIAL FLOW ANALYSIS FROM FORESTS	632
SUBTERRANEAN TERMITES CONTROL MANAGEMENT IN URBAN AREAS IN SPAIN. EXAMPLE OF MANAGEMENT IN THE OLD TOWN OF VIGO, SPAIN	637
SUSTAINABLE TRANSFORMATION IN CONSTRUCTION: PROPOSAL OF SPECIFIC GOOD PRACTICES BASED ON GENZERO INITIATIVE IN THE UK	641
TANNIN-BASED ADHESIVES FOR PARTICLEBOARD PRODUCTION: IMPROVING PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES	646
TCC AS A SUSTAINABLE AND REUSABLE COMPOSITE FLOOR: STATE OF THE ART AND PRELIMINARY STUDIES	651
TECNOLOGÍAS DISPONIBLES PARA DENSIFICAR MADERAS URUGUAYAS	655
THE EFFECTS OF MICROWAVE TECHNOLOGY ON SELECTED TECHNOLOGICAL PROPERTIES OF EUCALYPTUS GLOBULUS LABIL	670
THE SECOND GENERATION EUROCODE 5	675
TIMBER WALKWAYS DURABILITY EXPOSED TO MARITIME ENVIRONMENTS	679
TOWARD THE AUTOMATIC DEFLECTION ANALYSIS IN HISTORIC TIMBER SLABS BY COMBINING 3D POINT CLOUDS AND MACHINE LEARNING APPROACHES	684
VERNACULAR DEMOUNTABLE TIMBER SYSTEMS: CASE STUDY OF MEXICO AND THAILAND AS A FOUNDATION FOR NEW DEVELOPMENTS	689
VIGAS LAMINADAS DE PINO LARICIO ANDALUZ REFORZADAS CON FIBRAS DE CARBONO: APLICACIÓN A LA RESTAURACIÓN DE LA SEDE DEL RECTORADO DE LA UNIVERSIDAD DE GRANADA	692
VIVIENDA SOCIAL EN MADERA. ESTUDIO DE CASOS EN URUGUAY	697
BRINGING DECAYED BEAMS BACK TO LIFE: ON-SITE RENOVATION AND REHABILITATION WITH FINE-GRAIN COMPOSITE INLAIS	702
ÍNDICE DE AUTORES	707

libro de actas de RE

1003

AJUSTE DE MODELOS NUMÉRICOS PARA LA OPTIMIZACIÓN EN FASE DE DISEÑO DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE PASARELAS PEATONALES DE MADERA

Julio Vivas¹; Mario Suárez¹; Antolín Lorenzana Iban²; Soledad Rodríguez³

¹ Media Madera

² Universidad de Valladolid

³ CETEMAS

Palabras clave / Palavras-chave:

Dinámica estructural, Ensayos experimentales, Propiedades modales, Vibraciones peatonales

Resumen / Resumo:

En esta comunicación presentamos la metodología usada para el ajuste de los modelos numéricos utilizados para la previsión del comportamiento dinámico de las pasarelas de madera. Para ello se han comparado los resultados de ensayos dinámicos en un prototipo real bajo diferentes condiciones. Se han recopilado datos útiles para estimar las propiedades modales y calibrar el modelo computacional correspondiente. Además, se realizaron pruebas de servicio para cuantificar las vibraciones inducidas por el tránsito de peatones. Este enfoque proporciona una valiosa contribución al campo de la ingeniería civil con madera, con ventajas atractivas desde el punto de vista de la construcción y del medio ambiente y ampliando su campo de aplicación.

1. Introducción

Los puentes de madera exhiben una particularidad destacada al ofrecer valores de rigidez notables con un peso estructural reducido. Aunque este hecho constituye una ventaja en el análisis estático, la complejidad surge al considerar los efectos dinámicos. En tales situaciones, la restricción de masa puede dar lugar a significativas aceleraciones en la estructura, derivadas de las solicitaciones generadas por los peatones como fuente principal de excitación [1]. Aunque este fenómeno no compromete el cumplimiento de los Estados Límite Últimos, sí podría afectar las condiciones de confort durante el tránsito peatonal.

Cuando tanto las acciones como el comportamiento del material son bien conocidos, el cumplimiento de los criterios de confort, también recogidos en las normativas [2, 3 y 4] , puede ser verificado en la fase de diseño mediante simulación, sin embargo, si el comportamiento no está tan bien definido (como en el caso de la madera estructural) o las acciones son dinámicas (como en el caso de los tránsitos peatonales), la evaluación mediante simulación puede presentar graves deficiencias siendo necesario ensayos posteriores sobre la pasarela real para su verificación.

Con frecuencia, las pasarelas de madera, al alcanzar luces significativas, muestran frecuencias características inferiores a los 5 Hz, acercándose al rango crítico susceptible a excitaciones por el tránsito peatonal. En este estudio, se utiliza el análisis modal experimental para el ajuste de los modelos numéricos utilizados en el diseño de elementos rigidizadores que permitan anticipar de manera adecuada su nivel de eficacia.

2. Metodología

La metodología se basa en la ejecución de ensayos dinámicos sobre un prototipo de un puente de madera laminada (Figura 1) de 27 metros de longitud y 4 metros de ancho de paso y la comparación de los parámetros modales (frecuencias naturales, amortiguamiento y forma modal) obtenidos en ensayo mediante análisis modal experimental (AME) [5,6,7 Y 8] con aquellos obtenidos en los modelos numéricos (Figura 2). Así mismo, fueron realizados diferentes ensayos de tránsito peatonal a bajas frecuencias y registro de aceleraciones asociadas.

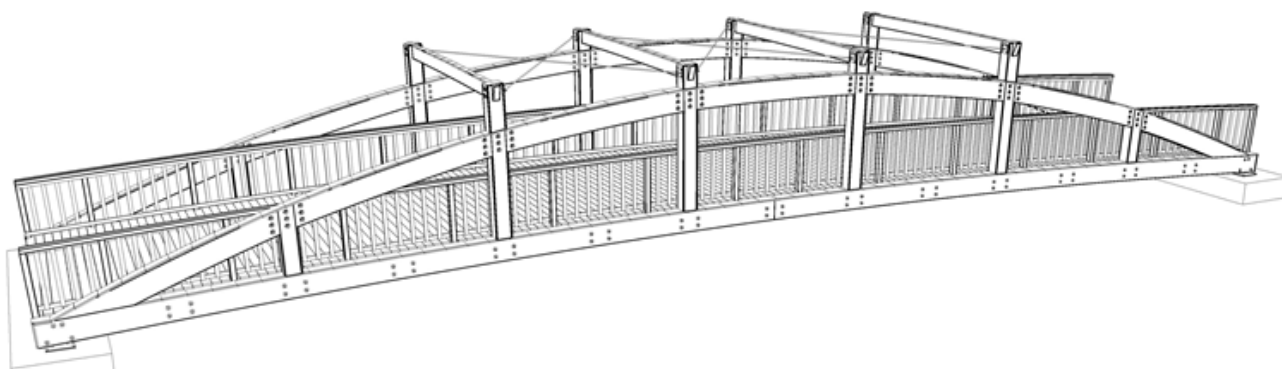


Figura 1 Prototipo de pasarela

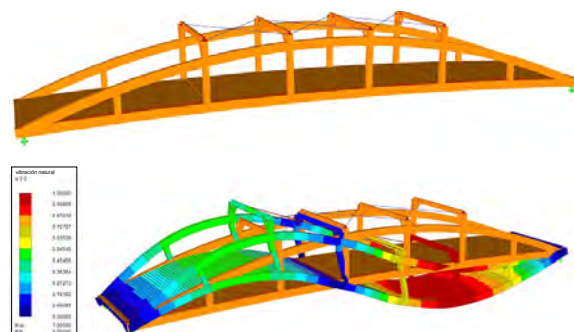


Figura 2. Modelos numéricos de la pasarela.

SHS 80x6.0

Technical drawing showing the dimensions of the SHS 80x6.0 channel section. The main drawing shows the channel with dimensions: 80x6.0, 455, 455, and 455. A detail of the flange (chapa) is shown on the right, labeled "Detalle de la chapa (espesor 6 mm)". The detail shows a rectangular flange with dimensions 160x140 and 140x140. The flange has a central hole with diameter 160 and four corner holes with diameter 140. The flange is attached to the channel with four bolts, each with a diameter of 16. The flange is labeled "Detalle de la chapa (espesor 6 mm)".

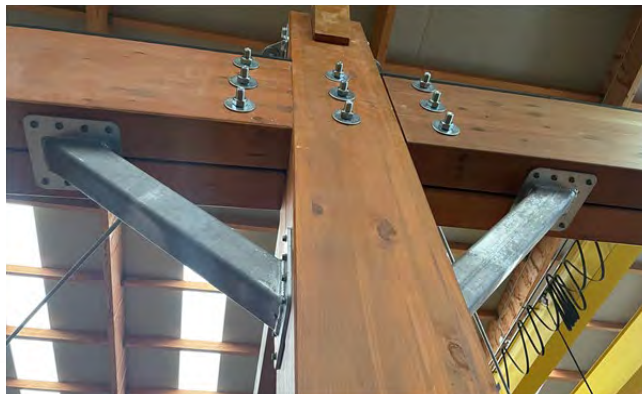


Tabla 1. Relación ensayos AME y tránsitos peatonales

Test	Descripción
1	AME mediante excitación con martillo de impacto en puente tras fabricación
2	AME mediante excitación con martillo de impacto en puente tras colocación de rigidizadores
T1	Tránsito de 1 peatón a 147 bpm
T2	Tránsito de 1 peatón a 162 bpm
T3	Tránsito de un peatón a 190 bpm
T1-R	Tránsito de 1 peatón a 147 bpm tras colocación de rigidizadores
T2-R	Tránsito de 1 peatón a 162 bpm tras colocación de rigidizadores
T3-R	Tránsito de un peatón a 190 bpm tras colocación de rigidizadores

Se presentan a continuación los resultados obtenidos para el análisis modal de los ensayos experimentales y los resultados obtenidos mediante el software de cálculo numérico:

Modo	Forma modal	f_e (Hz) (Test 1)	f_{e-R} (Hz) (Test 2)	Δ_{fe} (%)	f_n (Hz)	f_{n-R} (Hz)	Δ_{fn} (%)	E (%)	E_R (%)
1	2° flexión	4,954	5,586	13%	5,949	6,76	14%	20%	21%
2	1° flexión	5,429	5,375	-1%	5,446	5,484	1%	0%	2%
3	2° torsión	5,995	6,683	11%	7,144	7,966	12%	19%	19%
4	1° torsión	7,911	7,874	0%	8,671	8,877	2%	10%	13%
5	3° flexión	8,813	9,35	6%	10,684	10,684	0%	21%	14%

Donde: f_e (Hz) – frecuencia natural experimental; f_{e-R} (Hz) – frecuencia natural experimental tras instalación de rigidizadores; Δf_e (%) – Incremento en el valor de la frecuencia natural experimental para el modo analizado tras la rigidización; f_{n-R} (Hz): frecuencia natural numérica; f_n (Hz) – frecuencia natural numérica tras instalación de rigidizadores; Δf_n (%) – Incremento en el valor de la frecuencia natural experimental para el modo analizado tras la rigidización; E – error relativo entre frecuencias naturales experimentales y numéricas; ER – error relativo entre frecuencias naturales experimentales y numéricas tras rigidización.

Se observa que el efecto medida de los rigidizadores sobre el prototipo es coherente con las previsiones obtenidas en simulación, obteniéndose una rigidización apreciable en modos críticos de la tipología estructural: modos 1 y 3, correspondientes con el segundo modo de flexión de la estructura y el segundo modo de torsión. Si bien no se muestran en el presente resumen los valores de las aceleraciones asociados a los tránsitos peatonales, se observó un aumento en los valores picos de los mismos tras la instalación de los elementos rigidizadores en los nodos estructurales con mayor desplazamiento previsible.

4. Conclusiones

La comparación con los resultados obtenidos en los ensayos y en las simulaciones tras la modificación estudiada de algunas de las condiciones provocada por la incorporación de elementos rigidizadores en puntos estratégicos permite obtener información valiosa acerca de cómo deben ser considerados adecuadamente en la definición de los modelos numéricos y promover estrategias eficaces de optimización del comportamiento dinámico de las pasarelas en la fase de diseño.

Los rigidizadores diseñados se mostraron eficaces a la hora de alejar determinadas frecuencias características fuera del rango excitable por el uso peatonal.

Referencias

- [1] Casado-Sánchez, C. M.; De Sebastián-Sanz, J.; Muñoz-Díaz, I.; Poncela-Méndez, A.; Lorenzana-Ibán, A. (2011). “Control de Vibraciones en Pasarelas Peadonales”. DYNA, 86(3), pp. 318-327.
- [2] SETRA. Technical guide - footbridges - Assessment of vibrational behavior of footbridges under pedestrian loading, Service d’Etudes Techniques des Routes et Autoroutes, 2006.
- [3] ISO. “Mechanical vibration and shock. Evaluation of human exposure to whole-body vibration. I: General requirements.” ISO 2631-1, AENOR, Madrid, Spain, 1997.
- [4] International Standard ISO 10137: 2007(E), Bases of for design of structures - Serviceability of buildings and walkways against vibrations. ISO 10137:2007, International Organization for Standardization, 2007.
- [5] Crews, K., Bijan, S., Bakoss, S., Champion, C. (2003). “Overview of Assessing the Load Carrying Capacity of Timber Bridges Using Dynamic Methods”. IPWEA NSW
- [5] D. J. Ewins, Modal testing: theory, practice, and application. Research Studies Press, 2000.

- [6] N. M. M. Maia and J. M. M. Silva, *Theoretical and Experimental Modal Analysis*. Research Studies Press, 1997.
- [7] E. Shahabpoor, A. Pavic, V. Racic, and S. Zivanovic. Effect of group walking traffic on dynamic properties of pedestrian structures. *Journal of Sound and Vibration*, 387:207–225, 2017.
- [8] J. Sebastian, I. M. Diaz, C. M. Casado, A. V. Poncela, and A. Lorenzana. Evaluación de la predicción de aceleraciones debidas al tránsito peatonal en una pasarela en servicio. *Informes de la Construcción*, 65(531):335–348, 2013.

1004

AMARAR, “TRES PINOS / 45 M2”. DISSENY HUB BARCELONA. UNA REFLEXIÓN CONSTRUIDA SOBRE LA IMPORTANCIA Y LAS POSIBILIDADES DEL EMPLEO DE MADERA LOCAL EN MALLORCA

Josep Ferrando Bramona¹; Francisco Cifuentes Utrero¹; Ricardo Devesa Devesa¹; Marta Bugés Aragonés¹; Sebastián Martorell Mateo^{2,3}; Isabel Sáez⁴; Alejandro Bernabeu Larena^{4,5}

¹ Escuela Técnica Superior La Salle -ETSALS

² Aulets Arquitectes

³ Amarar

⁴ Bernabeu Ingenieros

⁵ Universidad Politécnica de Madrid

Palabras clave / Palavras-chave:

Sostenibilidad, Gestión forestal, Recursos forestales, Celosías, Conexiones, Proceso de diseño

Resumen / Resumo:

Hoy en día, Mallorca importa 70,000 Tn de madera al año, a pesar de que el 95% de los bosques de la isla están abandonados.

Amarar es una acción que tiene como objetivo reactivar la cultura maderera de la isla, mediante el cuidado de los bosques y la revitalización de la cadena de valor.

La exposición “Els nous realistes” (Dissemy Hub Barcelona, octubre 2023-enero 2024) muestra el trabajo de un grupo de arquitectos catalanes y baleares que a raíz de la crisis de 2008 y conscientes de que se iniciaba un cambio de ciclo tanto en la sociedad como en la profesión, marcado por la emergencia climática, redefinen nuevos parámetros en el ejercicio de la arquitectura.

Para esta exposición, Amarar – Aulets, en colaboración con Bernabeu Ingenieros en la configuración y diseño estructural, han presentado una instalación que, construida íntegramente con madera procedente de Mallorca, ofrece una reflexión sobre la importancia y las posibilidades de fortalecer y potenciar la construcción con madera local en la isla.

La instalación consiste en un entramado bidireccional de celosías trianguladas de madera, apoyado en cuatro soportes, también de madera.

La configuración de las celosías trianguladas se ha organizado considerando la limitación de tamaño de las piezas de madera aserrada, derivada de su procedencia de árboles locales y del transporte a Barcelona para la exposición, y el objetivo de plantear y resolver las conexiones íntegramente en madera y permitiendo el montaje y desmontaje de la instalación en piezas de tamaño reducido. En particular, la resolución del detalle constructivo de los nudos orienta la disposición de las diagonales

de triangulación de las celosías, de manera que en cada nudo llegue únicamente un elemento diagonal. Esta disposición contrapeada de las diagonales en las distintas celosías resulta así mismo en una configuración espacial de la estructura más interesante y atractiva.

Tanto los cordones, superior e inferior, como los montantes y diagonales de las celosías están formados por piezas de madera aserrada, de 60x60mm. Los cordones y diagonales están formados únicamente por una pieza, mientras que en los montantes se disponen 4 piezas, a fin de resolver la conexión de los mismos con cordones y diagonales.

Los pilares están así mismo formados por 4 piezas de 60x60mm, con elementos intermedios de conexión (a modo de presillas) que aseguran el comportamiento conjunto de las cuatro piezas y aumentan su capacidad a pandeo. Se disponen así mismo unos elementos diagonales en la base, a fin de estabilizar lateralmente el conjunto. Estos elementos diagonales se disponen así mismo contrapeados en los pilares dos a dos, relacionándose con la configuración contrapeada de las diagonales del entramado de celosías.

La conexión de los distintos elementos se realiza mediante bulones de madera, de 25mm de diámetro.

La continuidad de las piezas de mayor longitud (cordones y pilares) se resuelve mediante piezas de conexión a modo de platabandas de continuidad, unidas también con bulones de madera.

La instalación ha sido fabricada a partir de cinco pinos blancos procedentes de los bosques de Mallorca. Con la albura se ha construido la mesa, y con el duramen la estructura. Los bulones de conexión son de madera de haya, también procedente de los bosques de Mallorca.

La ponencia presenta el proceso de diseño y fabricación de la instalación, y ofrece una reflexión sobre la importancia y posibilidades arquitectónicas, estructurales y constructivas del empleo de madera local en Mallorca.

La ponencia se acompañará en su presentación en el congreso de una maqueta de la instalación.

Amarar. Exposición Els Nous Realistes

Mallorca – Barcelona, 2023

Autores: Aulets Arquitectes + Amarar.

Configuración y diseño estructural: Bernabeu Ingenieros.

Colaboradores: Fusteria Galmes, Milton, Velima System y Joan Martí Morro.



Figura 1. Amarar. Exposición Els Nous Realistes. Vista general



Figuras 2, 3. Amarar. Entramado bidireccional de celosías trianguladas. Detalle de conexión.

1005

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE BLACK AND WHITE BUILDING

Julen Perez Santisteban; Alastair Ogle; Thor Winkler; Andrew Waugh; Ana Lourenco

¹ Waugh Thistleton Architects

Palabras clave / Palavras-chave:

Huella de carbono, Industrialización, Prefabricación, Reversibilidad, Sostenibilidad

Resumen / Resumo:

Black and White Building, en 74 Rivington Street, Londres, es un edificio de Waugh Thistleton Architects terminado en noviembre de 2022. Ofreciendo 4.500 metros cuadrados en seis plantas, es el edificio de oficinas de madera estructural más alto del centro de Londres.

Su estructura de última generación combina CLT y LVL, optimizando las propiedades de cada material. Sus uniones atornilladas permitirán al edificio ser desmontado y reutilizar sus componentes, contribuyendo a la economía circular.

Un muro cortina acristalado de madera laminada envuelve el edificio, protegido por una segunda piel de laminas de madera.

La belleza del edificio emerge de la legibilidad de cada capa o material que lo compone, evitando florituras y excesos arquitectónicos innecesarios.

El objetivo de esta comunicación es presentar el Análisis de Ciclo de Vida de este edificio, elaborado también por Waugh Thistleton Architects para monitorizar las emisiones de carbono de sus componentes en todas las fases. El informe pretende entender mejor las ventajas medioambientales de construir con madera.

1. Metodología

El presente Análisis de Ciclo de vida (ACV) sigue la metodología establecida en la guía de evaluación RICS de 2017, que cumple con la norma medioambiental europea EN 15978.

Todos los resultados de carbono se proporcionan utilizando kgCO₂e/m², que es el equivalente en kgCO₂ normalizado sobre la superficie bruta del edificio. Las fases estudiadas son:

A1 -A3 Fabricación del Producto

A4 Transporte

A5 Construcción

B1 -B5 En uso

B6 -B7 Operacional

C1 -C4 Fin de vida

D Beneficios fuera de los límites del producto

2. Resultados

2.1. A1 -A5 fases iniciales

Las etapas iniciales tienen un total de carbono incorporado de 329 kgCO₂e/m², por lo que el edificio logra una calificación LETI de A. Esto cumple con el objetivo LETI para 2030 (<350 kgCO₂e/m²).

Si el edificio hubiera sido de hormigón y acero, la cifra inicial de carbono sería de 657 kgCO₂e/m². Mediante el uso de madera se ha logrado un ahorro de 328 kgCO₂e/m², lo que supone una reducción del 51%.

2.2. Carbono biogénico

El carbono biogénico dentro del edificio de Black and White es -865 TCO₂e, o -193 kgCO₂e/m². Esto equivale al 59% del total de carbono inicial del edificio.

Casi todo este carbono está contenido dentro de la estructura de LVL y CLT.

2.3. B1 -B5 en uso

Las etapas B1 -B5 tienen un total de carbono incorporado de 183 kgCO₂e/m², lo que representa el 25% de las emisiones de toda la vida del edificio. Estrategias pasivas reducen la dependencia de las instalaciones.

2.4. B6 -B7 operacional

La demanda anual es de 44 kWh/m²/año, alcanzando cómodamente el objetivo RIBA 2030 de <55 kWh/m²/año.

Esta baja demanda se ha logrado mediante medidas pasivas tales como ventilación cruzada y la protección solar. La inclusión de paneles fotovoltaicos en cubierta y los sistemas combinados de energía y calor (CHP) aportan el 31% de la demanda, generando 20 kWh/m²/año.

2.5. C1 -C4 fin de vida

La estrategia de deconstrucción del edificio permite identificar el 60% de todo el material de la estructura como reutilizable, y otro 35% como reciclable.

Dado que solo un bajo porcentaje será incinerado o enviado al vertedero, las emisiones de C1 -C4 son de 33 kgCO₂e/m².

Incluyendo todo el carbono biogénico (RICS LCA) las emisiones totales para C1 -C4 son 209 kgCO₂e/m².

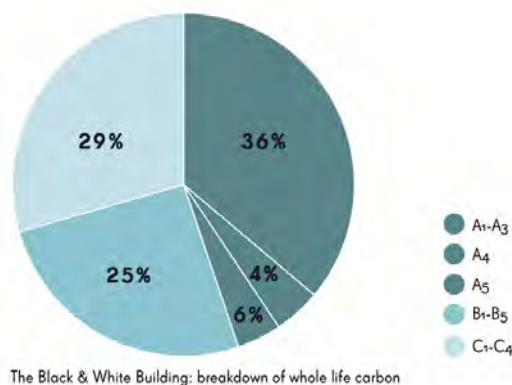
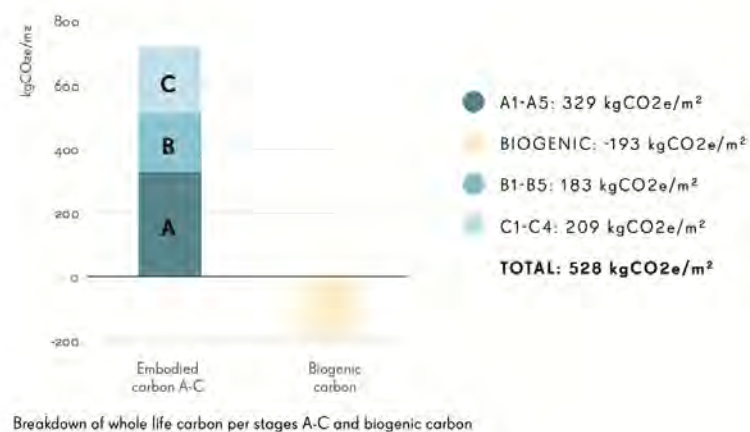
2.6. D fuera de los límites

El beneficio total de reutilizar el 95% de los componentes del edificio Black and White -incluyendo el beneficio de no tener que volver a fabricar los elementos que se reutilizan- es de -226 kgCO₂e/m².

3. Conclusiones

Diseñar y construir la estructura con madera ayudó a reducir el carbono inicial en un 59%. La estructura de un edificio de oficinas representa alrededor del 50% de su carbono inicial, por lo que la elección de madera estructural tiene el mayor potencial de impacto en el carbono total incorporado de un edificio.

A pesar de tener solo una planta, el sótano del edificio representa el 46% del carbono incorporado inicial dentro de la estructura de todo el edificio.



Agradecimientos

A todos los compañeros de Waugh Thistleton Architects.

1006

ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA ESTRUCTURAL Y AMBIENTAL DE LOSAS PREFABRICADAS EN MADERA

Alexander Wenzel Schwarzenberg¹; Sebastian Berwart Astudillo¹; Pablo Guindos Bretones¹; Manuel Carpio Martínez¹

¹ CENAMAD

Palabras clave / Palavras-chave:

Corte admisible, Huella de Carbono, Largo admisible, Losas de madera, Prefabricación

Resumen / Resumo:

En la actualidad existen diferentes soluciones de losas prefabricadas en madera, las cuales presentan distintas capacidades estructurales y procesos de fabricación asociados. El objetivo de este artículo es analizar diferentes alternativas de losas prefabricadas evaluando su desempeño estructural y cuantificando sus emisiones. Se analizaron 5 tipos de losas, dos losas de entramado ligero con diferente patrón de clavado, una losa con vigas I-Joist y dos losas de madera masiva con cambios en el espaciamiento de sus conectores. Se analizó el largo admisible [mm], corte admisible [N/m] y cambio climático [kgCO₂eq]. La losa de entramado ligero con mayor clavado alcanza altos valores de resistencia lateral con una emisión de 5.72 kgCO₂eq, mostrando que el incremento de conectores mejoró su capacidad estructural sin aumentar de gran manera las emisiones. Las losas de madera contra laminada a pesar de alcanzar altos valores de largo admisible presentaron las mayores emisiones 20.3-20.6 kgCO₂eq, con una menor resistencia lateral respecto a los entramados ligeros. El diseño colaborativo en etapas tempranas del proyecto, y en específico la definición de las luces esperadas es muy relevante para conseguir un edificio con las menores emisiones.

1. Introducción

Los parámetros que normalmente se utilizan para diseñar o comparar elementos prefabricados de madera, específicamente para sistemas de pisos son la luz admisible [1], rigidez de corte [2], desempeño frente a vibraciones [3] entre otras. Existen diversas soluciones para pisos de madera, como soluciones de marco plataforma con vigas de madera aserrada o vigas de productos de ingeniería (EWP) y soluciones de madera maciza, como madera contra laminada (CLT) y madera laminada con clavos (NLT), las cuales presentan diferentes emisiones. Oh et al. (2023) analiza el impacto ambiental y el desempeño estructural de tres soluciones de losa: madera contra laminada (CLT), compuesto de madera y hormigón (TCC) y hormigón armado (RC). El artículo solo considero el desempeño gravitacional de las losas y no cuantifico el efecto en las emisiones de los sujetadores y conectores metálicos, cuya influencia puede ser no despreciable. El objetivo de este artículo es analizar diferentes alternativas de pisos prefabricados de madera evaluando su desempeño estructural y sus emisiones de CO₂ equivalente para caracterizar y comparar su eficiencia ambiental/estructural.

2. Metodología

2.1. Casos de estudio

Las losas de madera prefabricadas utilizadas en este estudio corresponden a las losas SL-OSB e IJ-OSB en [5] y las losas DHO11, DCP5a and DCP5b estudiadas en (Véliz, Chacón, et al., 2023). Las losas SL-OSB, IJ-OSB y DHO11 corresponden a losas de marco plataforma, donde SL-OSB y DHO11 presentan vigas de madera aserrada de pino radiata de dimensión 41x185 mm C24 (de acuerdo con NCh1198), mientras que IJ-OSB presenta vigas tipo I-Joist (241 mm de altura LPI18 I-Joist). DCP5a y DCP5b corresponden a losas de CLT de 5 capas (33 mm) en madera de pino radiata clasificada mecánicamente C24. SL-OSB e IJ-OSB corresponden a diafragma de resistencia normal (clavado en hilera simple), mientras que DHO11 corresponde a un diafragma de alta resistencia (hilera doble). Las losas DCP5a y DCP5b son losas de CLT que para efectos de diseño sísmico se considera un empalme de paneles por medio de un terciado y tornillos.

2.2. Desempeño estructural

El desempeño estructural de las losas considera diseño gravitacional y sísmico, para la metodología ASD. El desempeño gravitacional de las soluciones se evalúa determinando la luz admisible máxima (L_{adm}) que la losa puede soportar para su peso propio y una sobre carga de 2 kPa cumpliendo simultáneamente criterios de rigidez y resistencia. Las losas de marco plataforma se diseñan de acuerdo con NCh1198:2014 [7] verificando resistencia y límite de deformación de servicio ($L/300$ y $L/360$). El diseño gravitacional de las losas de CLT se realiza aplicando NDS2018. Para determinar las propiedades de un CLT con lamelas de pino radiata clasificados mecánicamente C24 según NCh1198:2014 se aplica el procedimiento definido en el PRG320 [8]. Debido a que las losas de CLT presentan problemas de vibraciones, se aplica el límite definido en el Canadian CLT Handbook 2019 Edition [9]. El desempeño sísmico de las losas se evalúa utilizando la resistencia admisible a corte en el plano (v_{adm}) que se presentan en [5].

2.3. Cuantificación ambiental

La cuantificación ambiental se realizó según las normas ISO 14040 e ISO 14044 [10]. La unidad de análisis fue 1 m² de las configuraciones estructurales previas considerando solo la etapa de construcción de los elementos. Los datos del inventario del ciclo de vida se obtuvieron de Ecoinvent V3 y la base de datos CORRIM pero la matriz de electricidad se cambió por una versión actualizada de la matriz eléctrica chilena. Para la evaluación del análisis ambiental, se seleccionó el método ReCePi midpoint (H). Se utilizó el ReCePi midpoint (H) porque el final de la vida útil no fue considerado y no se realizaron extracciones adicionales de los productos. Se utilizó el software SimaPro para realizar los análisis de ciclo de vida.

3. Resultados

Los resultados del desempeño estructural se representan por medio de la luz admisible (L_{adm}) para diseño gravitacional y por medio del corte admisible (v_{adm}) para diseño sísmico. En cuanto al rendimiento ambiental, se calculó el Cambio Climático (CC). Los resultados se ilustraron en la Figura 1.

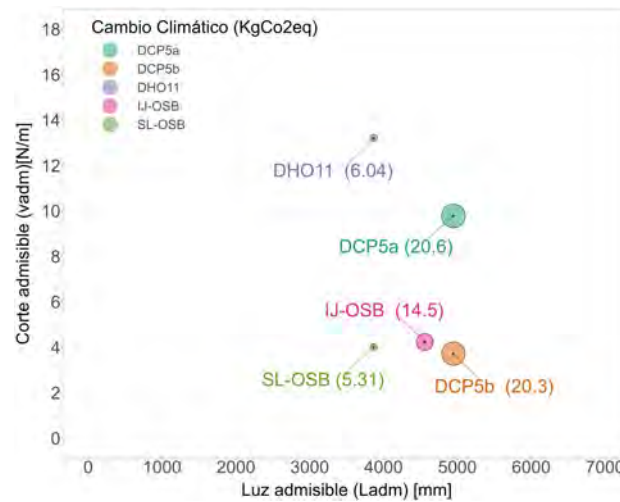


Figura 1: Luz admisible (Ladm) [x], Corte admisible (vadm) [y] y Cambio climático (Radio) para las soluciones de losa

Con respecto al desempeño estructural a partir de la Figura 1 se puede señalar que, desde el punto de vista gravitacional el CLT es la que presenta el mejor desempeño ya que permite alcanzar las luces más grandes ($L_{adm}=4.95$ m) mientras que desde el punto de vista sísmico el entramado es el que presenta el mejor desempeño debido a que permite alcanzar resistencias mayores ($v_{adm}=3.2$ N/m). Cabe destacar que el corte admisible de las losas podría incrementarse por el uso de otro tipo de conectores o por espaciamientos más pequeños, siempre y cuando se respeten los espaciamientos mínimos y conectores acetados para cada sistema estructural según el código de diseño sísmico. La contribución de emisiones de las diferentes partes de las soluciones para pisos se encuentra en la Tabla 1.

Tabla 1: Contribución de material para los CC [kgCO_2eq].

Caso	Acero	Madera aserrada	OSB	EWP	Total
SL-OSB	1.68	0.09	3.55	0.00	5.31
DHO11hi	2.10	0.08	3.55	0.00	5.72
IJ-OSB	1.03	0.00	3.55	9.95	14.50
C4	0.49	0.00	0.00	20.10	20.60
C5	0.17	0.00	0.00	20.10	20.30

La solución que presentó las emisiones más altas, $20.60 \text{ kgCO}_2\text{eq}$, fue el CLT con espaciado de conectores de @150. Esto se puede explicar porque el CLT presentó la mayor cantidad de EWP que en contraste con la madera en aserrada seca sin procesar, presenta una mayor cantidad de energía y adhesivos. La losa de marco simple alcanza las emisiones más bajas, $5.31 \text{ kgCO}_2\text{eq}$, con el tablero OSB como la principal contribución con $3.55 \text{ kgCO}_2\text{eq}$. La losa de marco de madera reforzada presentó emisiones similares en los elementos de madera aserrada seca y OSB, pero debido al aumento en el patrón de clavado, la solución alcanza el valor más alto en las emisiones de acero, $2.10 \text{ kgCO}_2\text{eq}$.

3.1. Eficiencia estructural y ambiental

El aspecto ambiental en el diseño estructural aporta otra dimensión que debe considerarse al seleccionar la solución más adecuada y evitar la ineficiencia en el campo de la arquitectura, ingeniería y construcción (AEC). A partir de la Figura 1 se puede señalar que la solución más eficiente desde un punto de vista sísmico/ambiental es la solución DHO11, ya que logra la mayor capacidad, 13.21 N/mm, con el segundo valor más bajo en emisiones ambientales, 5.72 kgCO₂eq. En general se observa que el incremento en la cantidad de conectores o la reducción de los espaciamientos entre conectores mejora la resistencia admisible a corte con una menor tasa de aumento en las emisiones, mostrando que es una forma eficiente ambientalmente de mejorar el desempeño sísmico de una losa. La losa de marco plataforma IJ – OSB presenta una capacidad de cortante similar a SL-OSB, pero con casi tres veces las emisiones. Las mayores emisiones de la losa IJ-OSB con respecto a SL-OSB, se pueden atribuir al hecho de que la mayoría de los elementos de la solución son productos de madera ingenieril (EWP), como las I-Joist. Con respecto a la eficiencia gravitacional/ambiental a partir de la Figura 1, se puede señalar que existe un límite de diseño que divide las soluciones estructurales. Cuando se requiere una losa de madera que requiere una luz admisible menor a 4 mt, la solución más eficiente gravitacional/ambiental es la solución SL – OSB, que logra una luz admisible de 3.87 m con las emisiones más bajas de 5.72 kgCO₂eq. Cuando se requiere una luz admisible mayor a los 4 metros pero menor a 4.56 metros, la solución más eficiente gravitacional/ambiental es la solución IJ-OSB con una luz admisible de 4.56 metros y una emisión de 14.5 kgCO₂eq en comparación a los 20.3 kgCO₂eq de la DCP5b. Cuando se requiere de una luz admisible mayor a 4.56 m, la única solución viable técnicamente es la de CLT, y por lo tanto no se pudo hacer una elección definida por la eficiencia ambiental.

4. Conclusión

Las emisiones y el desempeño estructural pueden variar entre los diferentes tipos de losas de madera. El objetivo de este artículo es comparar la eficiencia estructural/ambiental de diferentes alternativas de losas de madera prefabricados por medio del desempeño gravitacional y sísmico, la cuantificación de sus emisiones de CO₂. Los resultados muestran que: las losas de marco plataforma con vigas de madera aserrada presentan las emisiones más bajas y el mejor desempeño sísmico (mayor corte admisible) y las losas de madera contra laminada son las que presentan el mejor desempeño gravitacional (mayor luz admisible). Se observa que el uso de productos de madera ingenieril para las vigas de las losas de marco plataforma incrementa considerablemente las emisiones. El incremento de conectores metálicos para incrementar la resistencia admisible a corte de las losas no aumenta sustancialmente las emisiones, evidenciando que es un buen mecanismo para incrementar la resistencia a corte de las losas. A partir de los análisis se observa que las losas de marco plataforma con vigas de madera aserrada son aquellas que presentan la mejor eficiencia ambiental / estructural. Sin embargo, cuando la luz admisible requerida es mayor a 3.87 m, es necesario mejorar el desempeño estructural del sistema por medio de la inclusión de productos de ingeniería o utilizar losas de madera contra laminada, afectando negativamente sus emisiones. Es así como se puede señalar que el parámetro de diseño que más influye en las emisiones es el diseño gravitacional, ya que para diseño sísmico se observó que el acero no aumenta considerablemente las emisiones de CO₂eq. Finalmente, los resultados plantean que el diseño colaborativo en etapas tempranas del proyecto, y en específico la definición de las luces esperadas es muy relevante para conseguir un edificio con las menores emisiones.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido soportado por la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) a través de ANID BASAL FB210015 CENAMAD

Referencias

- [1] P. Jelušič and S. Kravanja, "Optimal Design and Competitive Spans of Timber Floor Joists Based on Multi-Parametric MINLP Optimal Design and Competitive Spans of Timber Floor Joists Based on Multi-Parametric MINLP Optimization," 2022, doi: 10.3390/ma.
- [2] M. Mirra, G. Ravenshorst, and J.-W. Van De Kuilen, "Comparing In-Plane Equivalent Shear Stiffness of Timber Diaphragms Retrofitted with Light and Reversible Wood-Based Techniques," 2021, doi: 10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000602.
- [3] J. Weckendorf, T. Toratti, I. Smith, and T. Tannert, "Vibration serviceability performance of timber floors," *European Journal of Wood and Wood Products*, vol. 74, no. 3, pp. 353–367, May 2016, doi: 10.1007/s00107-015-0976-z.
- [4] J. W. Oh *et al.*, "Comparative CO2 emissions of concrete and timber slabs with equivalent structural performance," *Energy Build*, vol. 281, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.enbuild.2022.112768.
- [5] F. Véliz, X. Estrella, J. Lagos, and P. Guindos, "Testing and nonlinear modelling of industrialized light-frame wooden diaphragms including optimized nailing and nonstructural sheathing," *Eng Struct*, vol. 297, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.engstruct.2023.117017.
- [6] F. Véliz, M. Chacón, J. Lagos, and P. Guindos, "Comparison of strong timber diaphragms: High-capacity light-timber frames versus CLT. [Under Review]," *Structures*, 2023.
- [7] INN, "Madera - Construcciones en mader - Cálculo," *NCh 1198. Instituto Nacional de Normalización*, 2014.
- [8] A.-E. W. Association and others, "ANSI/APA PRG320-2012, Standard for performance-rated cross-laminated timber." Tacoma, WA, USA: American National Standards Institute, 2012.
- [9] E. Karacabeyli, S. Gagnon, B. Yeh, M. Alam, Robert Jonkman, and A. Wahl, *Canadian CLT Handbook*, 2019th ed., vol. I. fpinnovations, 2019.
- [10] ISO, "Gestión ambiental Análisis del ciclo de vida Requisitos y directrices (ISO 14044:2006)," 2006.

1007

ANÁLISIS DE LOS TRABAJOS REALIZADOS EN EL EDIFICIO DE LA PUERTA DEL SOL N°9 A LO LARGO DE SU HISTORIA

Sonsoles González Rodrigo¹; Beatriz González Rodrigo¹; Janet Calixto Roca¹

¹ Universidad Politécnica de Madrid

Palabras clave / Palavras-chave:

Rehabilitación; Intervención; Arquitectura tradicional madrileña; Estructura de madera; Entramado

Resumen / Resumo:

La Puerta de Sol de Madrid constituye, desde el s. XV, uno de los centros neurálgicos más importantes de la capital y ha asistido como observadora silenciosa a números acontecimientos históricos, políticos y sociales a lo largo de su historia. Este documento, pretende completar el estudio de su evolución buscando un enfoque constructivo, revisando la configuración y los sistemas constructivos de las estructuras entramadas de uno de los edificios que lo conforman, sito en la Puerta del Sol n° 9, haciendo una revisión de todas las actuaciones de las que ha sido objeto desde su ejecución. Para ello, ha sido necesario encontrar paralelismos e hitos contemporáneos que permitan fundamentar la influencia y repercusión que han podido tener en las modificaciones arquitectónicas del edificio objeto de estudio. La intervención en estructuras con entramado de madera está poco documentada, debido a que edificios que permanecen en la actualidad, carecen en muchos casos de estudios de detalle y de análisis de las intervenciones sucedidas a lo largo del tiempo en la edificación. La importancia de dotar a los mismos de documentación gráfica y escrita sobre estas actuaciones es la prioridad de esta investigación.

1. Introducción

El elevado patrimonio arquitectónico español [1], está siendo objeto de reconsideración en las últimas décadas, donde han comenzado a integrarse edificios singulares, centros históricos, arquitectura rural y contemporánea, construcciones industriales y mineras, grandes infraestructuras y finalmente al paisaje. Coexistiendo bajo un mismo epígrafe la ciudad y el territorio [2]. En la Villa de Madrid, debido a su consideración de Capital del Reino durante largos periodos, recoge en el interior de su casco histórico grandes exponentes del mismo, muchos de ellos emplearon en su edificación primigenia la construcción entramada en muros interiores, suelos de viguería de madera y armaduras para la solución de cubiertas. Estos sistemas dejaron de utilizarse a principios del s. XX, con excepción de las cubiertas que llegaron hasta mediados del mismo siglo [3,4]. Las solicitudes de licencia antaño, se resolvían en numerosas ocasiones con un plano del levantamiento del alzado al vial principal y una memoria de materiales, por lo que en muchos de estos edificios la documentación es somera y carecen de estudios rigurosos del detalle. Por otro lado, la ubicación de los mismos en puntos estratégicos de la ciudad invita a buscar correspondencias entre las actuaciones de los mismos y los hechos históricos,

del emplazamiento donde se encuentran. La Puerta del Sol de Madrid ha presenciado la mayoría de estos sucesos [5,6], por lo que las actuaciones a las que ha sido sometido el edificio situado en el nº9 de esta plaza, están irremediabilmente unidas a los mismos (Figura 1). Este estudio se centra en el análisis de las intervenciones realizadas en los muros entramados y en los suelos, así como en la cubierta de madera, con el fin de comprender el sistema constructivo y sus intervenciones, así como establecer reglas para futuras rehabilitaciones o ser guía para su restauración y puesta en valor [7,8].

2. Metodología

Al tratarse de una investigación basada en un enfoque sobre la evolución histórica, ha sido necesaria la realización de un estudio exhaustivo de la bibliografía existente sobre la construcción entramada española, profundizando en los sistemas más profusamente utilizados en los cascos históricos, fundamentalmente el madrileño, siempre poniendo en valor la inferencia de variables sociales, históricas y políticas en los sistemas y soluciones adoptados. Así mismo, se ha llevado a cabo una búsqueda documental sobre sistemas y técnicas de intervención estructural en la rehabilitación de madera y estudio de los casos de aplicación, para lo que ha sido necesario recurrir a fuentes históricas como las obtenidas en el Archivo de Villa, el Archivo General de la Administración, el COAM y la Gerencia Municipal de Urbanismo, entre otros, que han permitido determinar y conocer los materiales y los sistemas constructivos empleados en el casco histórico madrileño. Por otro lado, se han realizado visitas al edificio de estudio durante la fase de intervención y se han mantenido entrevistas personales, durante el transcurso de todo el estudio con el estudio del Arquitecto Enrique Nuere, encargado del proyecto de rehabilitación de la última intervención del mismo.



Figura 1. Izqda. Fachada del edificio de la Puerta del Sol nº 9. Dcha. Fachada desde calle Tetuán. Fuente: Janet Calixto Roca (2016).

3. Resultados y discusión

En el edificio Puerta del Sol nº 9 se han sucedido diferentes intervenciones a lo largo del tiempo, por lo que es posible revisar los antecedentes urbanísticos mediante el análisis de los documentos de licencia

y planeamiento que obran sobre el inmueble y que permiten entender su evolución histórica desde la fecha de su construcción hasta el día de hoy, y fundamentalmente de su estructura entramada. El edificio se construyó entre 1860 y 1862, siguiendo el proyecto del ingeniero Lucio del Valle, que definió el proyecto definitivo en 1860 (Figura 2).



Figura 2. Izqda. Proyecto de Lucio del Valle en 1860. Fuente: Archivo General Central de Alcalá de Henares (AGA). Dcha. Construcción de la fuente de la Puerta del Sol, 1862 Fuente: Biblioteca Nacional de España (BNE), signatura 17/13 (42).

Desde 1918, se realizaron diversas actuaciones de sustitución de viguetas de madera por viguerías de hierro a cargo del aparejador Mariano Galán, aunque en las primeras intervenciones no se identificaron la zona de actuación. Es probable que las obras de sustitución, que se prolongaron hasta 1923, se debiesen a la aparición de pudrición en los elementos del forjado. Es bien conocido que los elementos metálicos ya se utilizaban desde el último tercio del siglo XIX y el primer tercio del XX (1898-1936) en Madrid.

Terminada la Guerra Civil Española, y tras los graves daños producidos (Figura 3), se llevaron a cabo dos actuaciones en el edificio: Por un lado, la sustitución de las viguetas de la segunda crujía de la planta baja por viguería de hierro en el local “Hogar Español”, a causa del deterioro de los maderos de piso, y por otro la reconstrucción de la planta tercera y planta quinta con el fin de levantar cerramientos y tabiques, así como trabajos de reconstrucción de la medianería, forjados y algunas traviesas provocadas por los bombardeos de noviembre de 1936, donde se destruyeron la cubierta general, el piso sotobanco y parte del tercero. El proyecto fue llevado a cabo por Francisco Travesado y suscrito por el arquitecto Daniel Zavala. A partir del año 1946, el edificio experimentó nuevas intervenciones de acondicionamiento, que afectaron fundamentalmente a los locales comerciales, implicando demoliciones de entreplantas y construcción de nuevas escaleras interiores, así como pequeñas reparaciones y trabajos de mantenimiento. Todas ellas fueron llevadas a cabo por el por el arquitecto Luis Blanco-Soler.

En 1959, el arquitecto Juan M. de Cárdenas redactó un proyecto de reforma del edificio en su planta baja, primera y ático, que incluyeron obras de reparación de la fachada y obras en el portal y la escalera. Así, las obras de reparación, pequeñas intervenciones, etc. se han ido sucediendo hasta la actualidad, a fin de adecuar el inmueble a las necesidades de cada momento. Recientemente, el edificio de estudio ha completado los trabajos de consolidación general de estructura y la restauración

funcional del sistema de muros de entramado, pero continúan con el resto de las actuaciones (Figura 4)



Figura 3. Bombardeo del edificio 10 de la Puerta del Sol, 1936. Fuente: BNE)



Figura 4. Izqda. Nueva cubierta de madera laminada del edificio. Fuente: Janet Calixto Roca. Dcha. Reparación de los pies derechos de la estructura entramada de madera con nuevas piezas en el ático. Fuente: Kalam. (2021)

4. Conclusiones

El estudio de las intervenciones realizadas en el edificio objeto de estudio no guardan relación con los aspectos políticos, económicos y sociales que ocurrieron durante su existencia, si bien es cierto que los bombardeos sufridos en la Villa de Madrid durante la Guerra Civil Española ocasionaron severas lesiones en la Puerta del Sol y en el edificio de Estudio, lo que obligó a reconstruir y reparar os daños una vez finalizó la contienda. A pesar de su desvinculación con hechos históricos, el inmueble ha sido objeto de diversas intervenciones a lo largo del tiempo, finalizando la última en el año 2021. En las ellas, la madera dañada, generalmente por pudrición, de los muros entramados y de los suelos ha sido sustituida en numerosas ocasiones por perfilera de acero laminado, augurándole mejor desempeño frente a la humedad a lo largo del tiempo. En la última intervención, gran cantidad de los elementos metálicos han tenido que ser sustituidos por su mal estado de conservación, restituyéndose soluciones más próximas a las originales con madera. Al incrementarse la sobrecarga de uso estimada, los muros entramados han sido reforzados con madera microlaminada conectada a la zapata y a los pies derechos a lo largo de su fuste, los forjados se han resuelto con una solución mixta madera-

hormigón con conectores, y la cubierta, debido a su mal estado de conservación ha sido sustituida completamente, manteniendo su geometría original y reproduciendo la solución tradicional con cerchas de madera laminada

Agradecimientos

Los autores agradecen a Enrique Nuere y a Ramón Cañil y a la empresa Kalam por la información facilitada de la obra

Referencias

- [1] Alberch M. L. (2010) El Patrimonio Arquitectónico, Una Fuente Para La Enseñanza De La Historia Y Las Ciencias Sociales, Enseñanza De Las Ciencias Sociales, (9), pp. 41-50
- [2] Bailliet Fernández, E. (2015) Historia De La Protección Del Patrimonio Arquitectónico En España. 1933-1985", E.T.S. Arquitectura (UPM)
- [3] González-Redondo, E. (2015) A timber-framed construction system preserved: the historic centre of Madrid, Journal of Architectural Conservation, vol. 21, (2), pp. 113-135, <https://doi.org/10.1080/13556207.2015.1112125>
- [4] González-Redondo E. (2022) Adding new floors to old timber-framed buildings: An assessment of demolished and preserved courtyard houses in the historic centre of Madrid, Frontiers of Architectural Research, vol. 11, (2), pp. 255-277 <https://doi.org/10.1016/j.foar.2021.10.009>
- [5] Arnaiz Gorroño M. J. (1981). Reforma urbana de la Puerta del Sol en el siglo XIX.
- [6] Gómez de la Serna R. (1987), Historia de la Puerta del Sol, Ediciones Almarabú. Spain
- [7] Nuere, E. (2000) La carpintería de armar española, Munilla-Leria. Spain
- [8] Nuere, E. (2007)"Madera, en restauración y rehabilitación", Informe de la construcción, vol. 59, (506), pp. 123-130, Spain.

1008

ANÁLISIS DE PUENTES TÉRMICOS LINEALES ENTRE MUROS Y LOSAS DE EDIFICIOS DE MADERA

José A. Paz-Pérez¹; Alexander Wenzel Schwarzenberg²; Manuel Carpio Martínez¹

¹ Pontificia Universidad Católica de Chile

² Centro Nacional de Excelencia para la Industria de la Madera

Palabras clave / Palavras-chave:

Madera contra-laminada, CLT, Puentes térmico, Conector metálico, Losa híbrida, Madera-hormigón

Resumen / Resumo:

En los últimos años se han desarrollado múltiples proyectos de edificación híbridos con madera-hormigón con resultados innovadores y eficientes desde el punto de vista estructural. Estos, de igual manera, deben garantizar una fachada resistente al flujo de calor para garantizar el confort y disminuir las demandas de energía para climatización. Sin embargo, en las uniones de los distintos componentes que conforman la fachada de una edificación se originan flujos adicionales de calor que dan origen a puentes térmicos. El presente estudio realiza un análisis de puentes térmicos lineales en uniones de fachada muro-losa para evaluar el efecto de losas híbridas de entrepiso y conexiones metálicas en este tipo de uniones. El análisis implica la determinación de la transmitancia térmica lineal en régimen estático mediante el cálculo numérico de modelos físicos bidimensionales.

1. Introducción

Los puentes térmicos (PTs) son aquellas partes de la envolvente del edificio donde la resistencia térmica se modifica por un cambio local en la geometría de las estructuras o por una penetración parcial de la envolvente del edificio por materiales con diferente conductividad térmica [1]. Un PT lineal (PTL) es un PT con una sección transversal uniforme a lo largo de uno de los tres ejes ortogonales y la influencia que el mismo tiene sobre el flujo de calor total es cuantificado a través de la transmitancia térmica lineal (ψ) [1]. Ilomets *et al.* [2] realizaron mediciones de campo y cálculos de ψ para cuatro tipos de edificios de apartamentos (hormigón prefabricado, ladrillo, madera y hormigón celular tratado en autoclave). Sus resultados muestran que los PTLs contribuyen al 23% de la pérdida total de calor por la envolvente.

La madera como material de construcción principal ha ganado el interés de la academia y la industria. La razón está dada por ser uno de los recursos más ecológicos, caracterizado por una amplia disponibilidad en la naturaleza y una relativa facilidad de manejo [3]. Yin *et al.* 2019 demostró que la construcción híbrida con madera resulta en menos emisiones de carbono, un período de construcción

más rápido y un sistema estructural más ligero que los edificios tradicionales de hormigón armado [4]. Específicamente la construcción híbrida de losas de entresijos ha mostrado un interés en estudiar la combinación de las ventajas estructurales de la madera y el hormigón [5].

Las uniones muro-losa en fachadas son determinantes en términos de transferencia de calor. Romero *et al.* [6] demuestra que estas uniones representan más del 52% del flujo total de calor a través de puentes térmicos. En estructuras de madera masiva Chang *et al.* [7] cuantificó la Ψ de PTs de estructuras de madera masiva con presencia de conectores metálicos (CM) para uniones estructurales muro-muro, muro-techo y muro-losa con una innovadora propuesta de panel que combina madera contra-laminada (CLT) y la madera contrachapada doméstica en las capas de cruce. Esto le permitió obtener una solución con un mejor desempeño en la conductividad térmica del material. Pero si bien este estudio cuantifica el efecto de los CM en uniones estructurales de madera masiva, no evalúa el caso en que las losas de entresijos varíen su espesor producto de la combinación de un panel CLT con una capa de hormigón ni el caso en que estos muros de fachadas sean no estructurales. Por tanto, el presente estudio tiene como objetivo cuantificar el efecto de losa híbrida (LH) y CM para un caso de unión muro-losa no estructural a través de la Ψ . Será resuelto mediante el cálculo numérico propuesto en la ISO10211 [1] en modelos bidimensionales con transferencia de calor en régimen estático para caracterizar el comportamiento de flujo de calor en PTLs para este tipo de uniones.

2. Materiales y métodos

Para cumplir el objetivo de estudio, primeramente, se ofrece una comprensión teórica del fenómeno de transferencia de calor en régimen estático para PTLs. Posteriormente se explica una justificación del análisis y sus etapas a partir de la definición de los casos de estudio. Los PTLs se pueden caracterizar en condiciones de estado estacionario determinando el valor Ψ y es expresado según la ecuación (1) definida en la ISO 10211 [1] como:

$$L_{2D} = \sum_{j=1}^{N_j} U_j l_j \quad (1)$$

donde L_{2D} = coeficiente de acoplamiento térmico que se obtiene de un cálculo en bidimensional (2D) del componente que separa los dos entornos considerados; U_j = transmitancia térmica del elemento j que se obtiene del cálculo unidimensional (1D) que separa los dos entornos considerados; y l_j = longitud sobre la cual se calcula el valor de U_j .

Como caso de estudio se elige una fachada de entramado ligero prefabricado cuya armadura está compuesta por canales de acero galvanizado. Los materiales componentes y condiciones de borde para la modelación se muestran en la Figura 1.(A). Se evalúa la unión en una losa de entresijo variando la presencia de LH y CM. La secuencia de simulación y casos de estudio se muestran en la Figura 1.(B). Para los casos de estudio se parte de un modelo base (Caso-01) donde no existe presencia de LH ni CM, sin embargo, son considerados en todos los casos los canales que forman parte de la armadura del panel de entramado ligero y el angular metálico del cual queda suspendido el muro. Posteriormente se evalúa la presencia de LH en (Caso-02) y (Caso04) y la presencia de CM en (Caso-03) y (Caso-04). Los planos de corte adiabáticos se establecen según la ISO10211 [1] y las conductividades térmicas (λ) de los materiales se eligen según la normativa ISO 10456 [8]. Se utilizará la herramienta COMSOL [9] para el cálculo numérico.

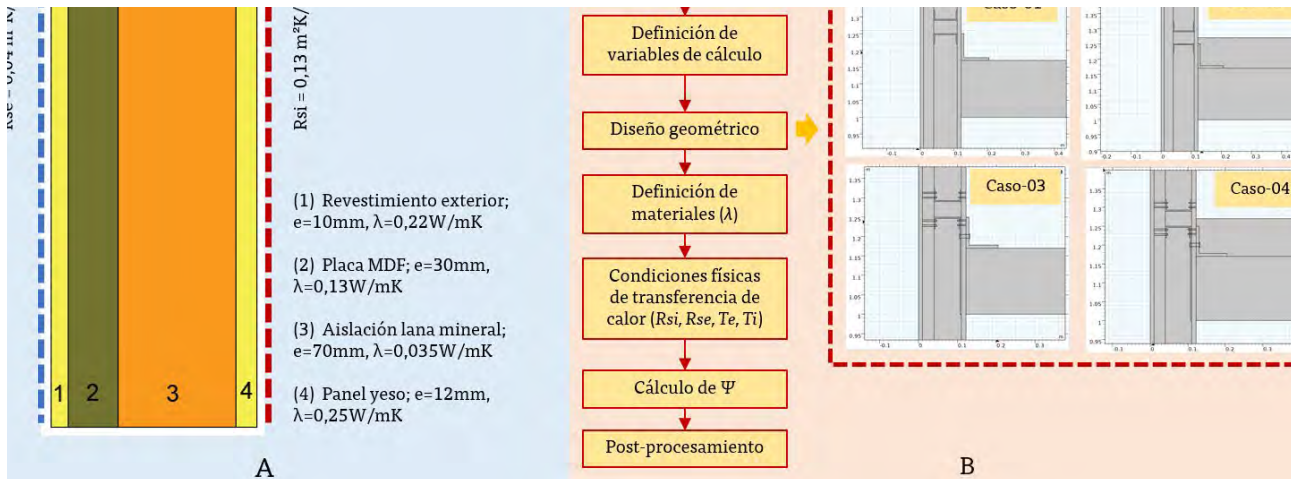


Figura 1: (A) Solución de fachada prefabricada y condiciones de borde para la modelación establecidas según la ISO 6946 [10]; (B) Secuencia de simulación y casos de estudio.

3. Resultados

Como se observa en la Tabla 1, los resultados en la simulación indican que la presencia de una LH no influye de la misma manera que los CM en el valor de Ψ . Cuando se evalúan los casos sin presencia de LH, la consideración de CM aumenta en un 56.17% el valor de Ψ , mientras que en los casos que se considera LH, los CM aumentan en un 56.06% el valor de Ψ . Finalmente, los CM tienen un mayor efecto en la transmitancia. Al tener en cuenta los tornillos, se modifica la geometría local, siendo estos, con una conductividad térmica mayor, los responsables de permitir con mayor facilidad el flujo de calor cuando existe una diferencia de temperatura. Dado que la diferencia de temperatura y la dimensión de análisis l_j se mantienen constante en los casos de estudio, el parámetro determinante en el valor de Ψ está dado por el flujo de calor. La Figura 2 muestra el comportamiento del flujo de calor en la superficie exterior para los casos de estudio. En los casos con presencia de conectores (Caso-03) y (Caso-04), el flujo de calor máximo saliente por la superficie exterior es 67% superior a los casos que no los consideran. Puede observarse los incrementos asociados a la zona donde se encuentra la unión muro-losa.

Tabla 1. Resultados de simulación de los casos de estudio.

Unión	LH e(mm)	CM	Flujo de calor (W/m)	L_{2D} (W/mK)	U (W/m ² K)	Ψ (W/mK)
Caso-01	0	no	21,555	1,078	0,401	0,192
Caso-02	100	no	21,558	1,078	0,401	0,192
Caso-03	0	si	26,467	1,323	0,401	0,437
Caso-04	100	si	26,453	1,323	0,401	0,437

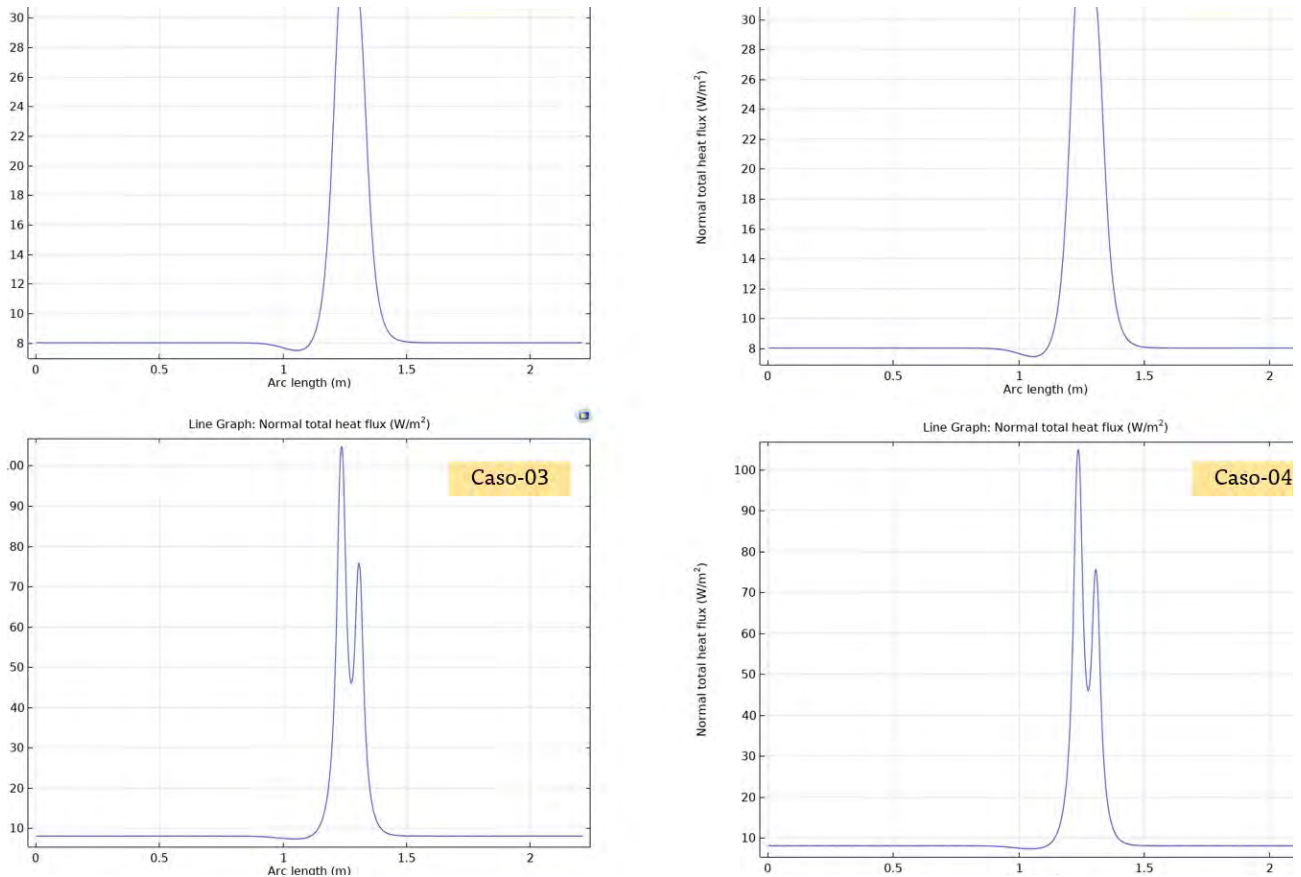


Figura 2: Curva de comportamiento del flujo de calor (W/m^2) en la superficie exterior.

4. Conclusiones

La transmitancia térmica lineal caracteriza las pérdidas de calor adicional que se producen en las uniones de los diferentes componentes de una edificación. El presente estudio determina su valor para cuatro casos de estudio de una unión no estructural entre un muro de fachada de entramado ligero prefabricada y una losa de entrepiso híbrida madera-hormigón. El efecto de la losa híbrida y conectores metálicos fue evaluado a diferentes niveles de detalle. Se observa que la losa híbrida no influye significativamente en el valor de transmitancia térmica lineal, mientras que la presencia de conectores en estas uniones aumenta el valor de ψ de 0.192 a 0.437 W/mK . Se concluye que, en edificaciones híbridas con envoltentes prefabricadas, las zonas con presencia de conectores deben ser analizadas por el aumento en flujo de calor y cambios de temperatura respecto a las zonas homogéneas. La presencia de la losa de hormigón no afecta el comportamiento térmico de los encuentros híbridos mientras la losa no cruce la sección transversal de la envoltente. Se propone a futuro evaluar otras soluciones de uniones muro-losa en fachadas estructurales y no estructurales, y establecer mejoras de diseño para cada caso cumpliendo con los estándares internacionales.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto ANID BASAL FB210015 CENAMAD.

Referencias

- [1] EN ISO 10211. Thermal bridges in building construction - Heat flows and surface temperatures - Detailed calculations. International Organization for Standardization, 2017.
- [2] S. Ilomets, K. Kuusk, L. Paap, E. Arumägi, and T. Kalamees. (2017) Impact of linear thermal bridges on thermal transmittance of renovated apartment buildings. *Journal of Civil Engineering and Management*, 23:96–104. doi:10.3846/13923730.2014.976259.
- [3] M. H. Ramage et al. (2017) The wood from the trees: The use of timber in construction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 68:333–359. doi:10.1016/j.rser.2016.09.107.
- [4] L. Yin, Bruno, and Lee. (2019) Simulation based building performance comparison between CLT-concrete hybrid, CLT, and reinforced concrete structures in Canada. in CSCE Annual Conference, Montreal, Jun. 2019.
- [5] L. Zhang, Y. H. Chui, and D. Tomlinson. (2020) Experimental investigation on the shear properties of notched connections in mass timber panel-concrete composite floors. *Constr. Build Mater.* 234:117375. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.117375.
- [6] M. J. Romero, F. Aguilar, and P. G. Vicente. (2021) Analysis of design improvements for thermal bridges formed by double-brick façades and intermediate slabs for nZEB residential buildings in Spain. *Journal of Building Engineering*. 44:103270. doi:10.1016/j.jobbe.2021.103270.
- [7] S. J. Chang, S. Wi, and S. Kim (2019) Thermal bridging analysis of connections in cross-laminated timber buildings based on ISO 10211. *Constr. Build Mater.* 213:709–722. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.04.009.
- [8] EN ISO 10456. Building materials and products - Hygrothermal properties - Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values. International Organization for Standardization, 2007.
- [9] COMSOL Multiphysics® v. 6.1. www.comsol.com, Stockholm, Sweden. 2022.
- [10] EN ISO 6946. Building components and building elements - Thermal resistance and thermal transmittance," International Organization for Standardization, 2017.

1009

ANÁLISIS DE SISTEMAS DE FIJACIÓN BAJO CARGAS SÍSMICAS PARA DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE ENTRAMADO LIGERO CON MADERA PRODUCIDA Y COMERCIALIZADA EN COSTA RICA

Francisco Rodriguez Bejarano¹; Beatriz González Rodrigo²; Jose Miguel Rico-Martínez³; Guillermo Gonzalez-Beltrán⁴

¹ Rothoblaas SRL

² Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Montes, Universidad Politécnica de Madrid

³ ETS de Arquitectura de la Universidad del País Vasco (UPV)

⁴ Facultad Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica (UCR)

Palabras clave / Palavras-chave:

Comportamiento dinámico, Curvas histeréticas, Conectores, Pushover, *Cordia alliodora*

Resumen / Resumo:

El entramado ligero con madera representa un sistema constructivo con enorme potencial para la prefabricación. La calidad del producto final, su buen comportamiento ante cargas dinámicas, los tiempos de puesta en obra y el precio pueden permitir una mayor presencia de la madera en construcción para un mercado emergente y en crecimiento como lo es el costarricense, país que presenta una fuerte amenaza sísmica. Sin embargo, existe una necesidad de investigar el comportamiento estructural los elementos constructivos fabricados con madera nacional y unidos mediante conectores normalizados y comercializados atendiendo a los requerimientos de zonas sísmicas. En la presente investigación se analiza el comportamiento de muros de cortante de entramado ligero con madera de laurel (*Cordia alliodora* Ruiz & Pav.) ensayados ante cargas laterales monotónicas y dinámicas. Para el estudio se han ensayado las uniones del tablero con los montantes, de los herrajes de sujeción del entramado y del entramado completo arriostrado con tablero estructural de contrachapado. Las curvas hísticas que presenta el efecto *pinching*, permiten analizar la ductilidad y rigidez del sistema propuesto, así como la disipación de energía del sistema ante cargas dinámicas.

1. Introducción

La construcción con madera ofrece unos beneficios ambientales relevantes si la materia prima proviene de plantaciones forestales locales y de una explotación sustentable. Costa Rica, desde los años 90, ha desarrollado una intensa política forestal, recuperando terreno para las plantaciones de árboles autóctonos o alóctonos. Actualmente, se cuenta en Costa Rica con madera de plantación de buena calidad para la construcción y que está siendo mayoritariamente exportada. En un país con una alta amenaza sísmica, este tipo de construcción es muy pertinente al presentar las estructuras de entramado de madera un buen comportamiento ante sismos de gran magnitud [1]. Hoy en día, las estructuras de entramado ligero no se limitan a una o dos alturas. Varios ejemplos demuestran el potencial de construir de manera eficiente y sostenible en construcciones de media altura [2]. En este tipo de edificios, las acciones horizontales provocadas por el viento o los sismos son resistidas por un sistema

de muros de cortante conectados a un diafragma de forjados [3]. El muro de cortante del entramado de madera consiste en montantes y travesaños o durmientes de madera maciza arriostrado por tableros estructurales conectados mediante clavijas tipo tirafondo o clavo. Esta comunicación presenta los resultados de comportamiento de muros de cortante de entramado de madera de laurel (*Cordia alliodora*), proveniente de plantaciones forestales, cuando se le somete a la acción de cargas monotónicas y cíclicas quasi-estáticas. Se analizan la rigidez de la estructura, el desplazamiento máximo, la disipación de energía y la degradación a lo largo de los ciclos. El análisis se completa con los ensayos de las uniones del tablero al montante y de la escuadra de tracción, ante cargas cíclicas. El objeto de la investigación es validar un sistema constructivo de un país pionero en su política carbono neutral, con una gran cubierta forestal, parte de esta de plantaciones y con una alta amenaza sísmica.

2. Métodos

Con el objeto de poder determinar el comportamiento del entramado de madera antes cargas monotónicas y cíclicas se establecieron dos escalas (Figura 1). La primera se trata de las conexiones individuales para determinar el comportamiento histerético de cada unión aislada. La segunda escala se trata del muro en su conjunto.

La elección de la especie de madera se realizó considerando que debía provenir de plantaciones forestales nacionales, tener buenas prestaciones estructurales, presentar buena trabajabilidad y poderse adquirir en el mercado. El laurel cumple todos los requisitos. Las escuadrías de madera tienen una dimensión de 65 mm x 90 mm y estaban secas en horno con una humedad de equilibrio entre 15 % y -18 %. El forro consiste en un tablero de contrachapado de 12 mm de espesor unido mediante clavos LBA460 de Rothoblaas colocados cada 150 mm de distancia en el perímetro, y 300 mm en los montantes centrales. El entramado está sujeto al terreno mediante una unión rígida con 8 pernos de 12 mm y 2 escuadras de tracción tipo WKR35135 de Rothoblaas, unida mediante 11 clavos tipo LBA460 entre la pletina vertical y el montante y 1 perno de 12 mm entre el durmiente y la pletina horizontal.

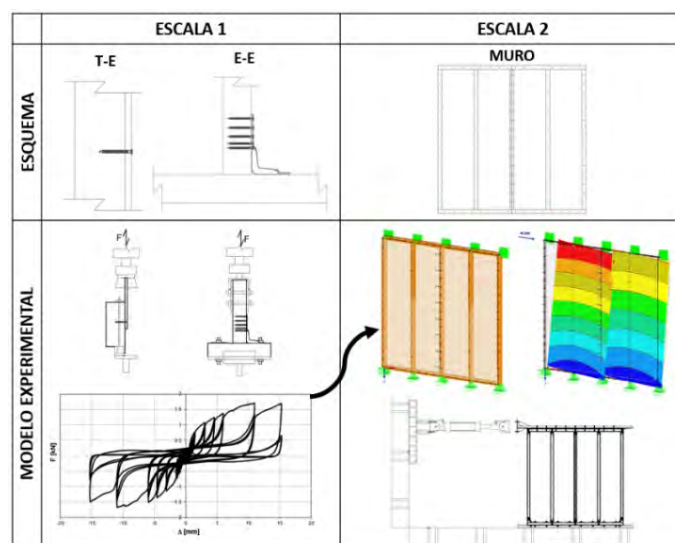


Figura 1. Esquema de la metodología seguida en esta investigación. Los resultados de los monotónicos y dinámicos sobre uniones de Tablero- Madera y escuadras de tracción (Escala 1) y del muro (Escala 2, Esquema) son necesarios para la validación de los modelos numéricos sobre un muro de entramado ligero (Escala 2 Modelo Experimental)

Para analizar el comportamiento individual de cada unión se realizaron tres ensayos del enlace entre montante y tablero con las clavijas LBA460 (Figura 2a) y otros tres de la unión del durmiente y montante mediante escuadras de tracción WKR35135 (Figura 2b). Sobre el muro, se realizó primero una prueba de carga monotónica constante en un primer muro para establecer los valores límite de capacidad de carga y deformación (Figura 2c). Con esa información, se determina la carga cíclica que se debe utilizar según el Método C de la norma ASTM E2126 [4]. Este ensayo cíclico se aplicó a dos muros.

Para validar las dimensiones de escuadría existentes en el mercado se realizó un modelo analítico con el software RFEM 5.31.01 (Dlubal) introduciendo las características mecánicas de las clavijas y herrajes empleados.

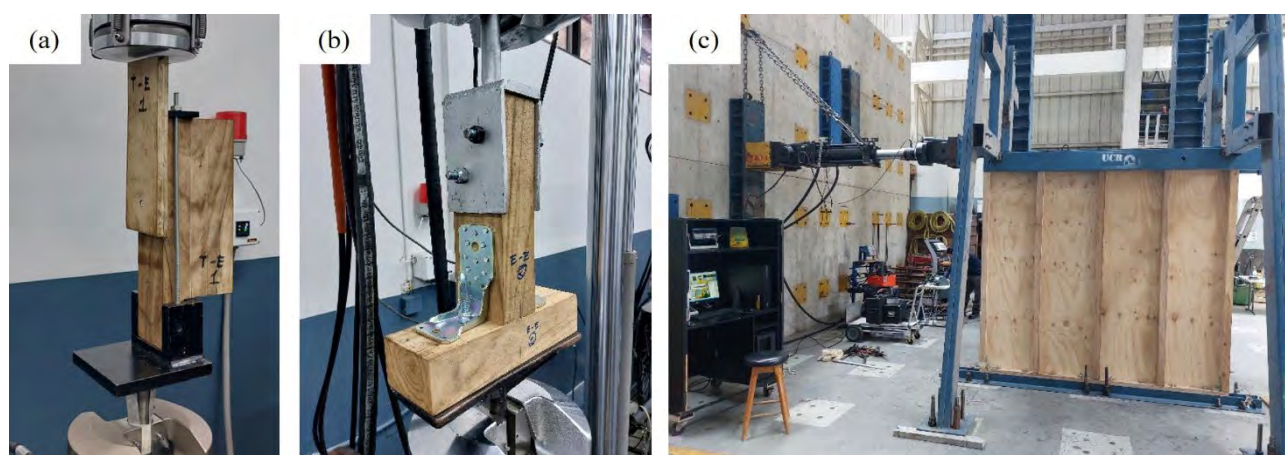


Figura 2. Pruebas de carga a conexiones Tablero-Estructura (T-E) (a), Estructura-Estructura (E-E) (b) y Muro (c)

3. Resultados y discusión

La Figura 3 presenta la comparación entre la curva obtenida en el primer muro sometida a carga monotónica y la envolvente de las curvas histeréticas del muro 2 y 3. Se puede observar que el conjunto presenta una ductilidad media mayor que 2,7 que confirma la propuesta de nuevos factores de modificación q propuestos en el capítulo 8 de la revisión del Eurocódigo 8 ($q = 2,5$ para construcciones de ductilidad media y 4 para alta) [5]. La conexión tablero-estructura ((Figura 2a) presenta una ductilidad media mayor que 5.

A partir de las pruebas cíclicas anteriores, se generan curvas del comportamiento histórico de los paneles (Figura 4). Estas curvas incluyen las envolventes positiva y negativa, así como también las curvas de energía equivalente (EEEP).

El comportamiento cíclico de en sistema de entramado es bastante complejo y es equivalente al de estructuras de paneles contralaminados [6] y muros de mampostería y está caracterizado por una curva en forma de lazo (*pinching*) con degradación de la resistencia y rigidez. El comportamiento observado en la Figura 4 es análogo al obtenido sobre distintas especies y con herrajes equivalentes [7], lo que permite confirmar que la disipación de energía del sistema está muy vinculada con las uniones metálicas.

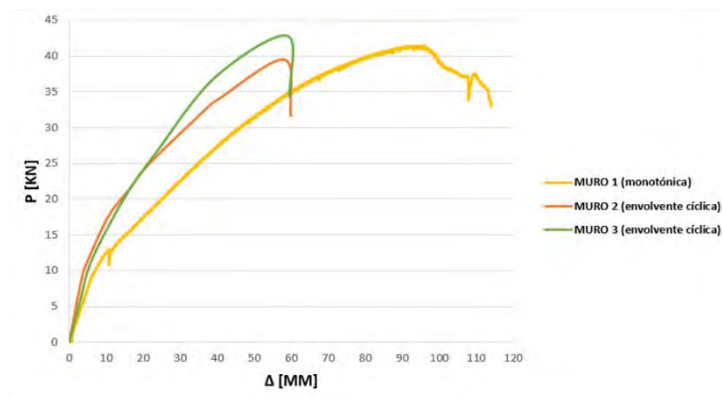


Figura 3. Comparación de resistencia entre probetas en carga monotónica y cíclica

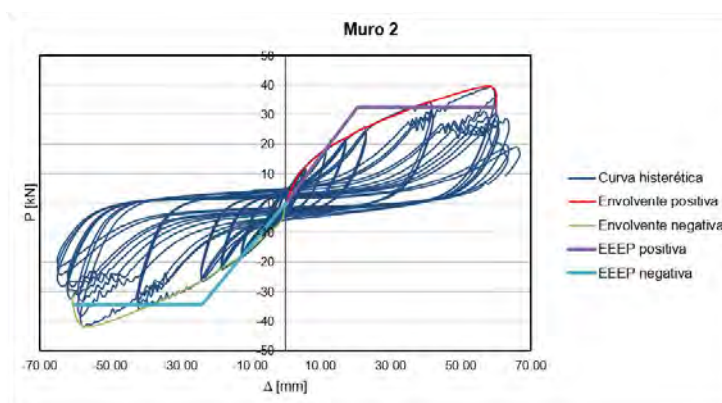


Figura 4. Comportamiento histerético y envolventes para Muro 2

4. Conclusión

La evaluación de la resistencia al cortante del muro de entramado ligero de laurel (*Cordia alliodora*) revela que los conectores son factores críticos en su resistencia, rigidez y capacidad de disipación de energía. La selección del tipo de madera tiene una baja influencia en la resistencia ante cargas laterales del muro. Se destaca la mayor disipación de energía en las uniones del tablero y el montante mientras que los conectores tipo escuadras de tracción presentan una menor ductilidad y una tendencia a la falla frágil

Además, se evidencia una degradación de la resistencia y rigidez estructural ante cargas cíclicas manifestando un comportamiento histerético tipo lazo o *pinching*. Los resultados de esta investigación son fundamentales para establecer recomendaciones específicas en el diseño y construcción de entramados ligeros no solo en Costa Rica sino también en regiones con alta actividad sísmica a nivel internacional. La investigación provee una base cuantitativa para optimizar la resistencia y el rendimiento estructural de muros similares, contribuyendo significativamente a la mitigación del riesgo sísmico en dichas áreas geográficas.

Referencias

- [1] D. W. Dinehart and H. W. Shenton, "Comparison of static and dynamic response of timber shear walls," vol. 124, no. 1. pp. 686–695, 1996.
- [2] S. Pei, J. W. Van De Lindt, S. E. Pryor, Hidemaru Shimizu, and D. R. Rammer, "Seismic testing of a full-scale mid-rise building: The NEESWood Capstone Test," vol. 0529903, no. Cmmi, 2010, [Online]. Available: <http://mceer.buffalo.edu>.
- [3] W. Seim, M. Kramar, T. Pazlar, and T. Vogt, "OSB and GFB As Sheathing Materials for Timber-Framed Shear Walls : Comparative Study of Seismic Resistance," vol. 142, no. Eta 2013, 2016, doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001293.
- [4] ATSM E2126-11 (2018), *Standard Test Methods for Cyclic (Reversed) Load Test for Shear Resistance of Vertical Elements of the Lateral Force Resisting Systems for Buildings*. EE.UU., 2018, p. 15.
- [5] M. Follesa et al., "The new provisions for the seismic design of timber buildings in Europe," *Eng. Struct.*, vol. 168, no. May 2017, pp. 736–747, 2018, doi: 10.1016/j.engstruct.2018.04.090.
- [6] G. Rinaldin and M. Fragiaco, "A Component Model for Cyclic Behaviour of Wooden Structures," *RILEM Bookseries*, vol. 9, no. 1. pp. 519–530, 2014, doi: 10.1007/978-94-007-7811-5_48.
- [7] P. Grossi, T. Sartori, and R. Tomasi, "Tests on timber frame walls under in-plane forces: Part 1," *Proc. Inst. Civ. Eng. Struct. Build.*, vol. 168, no. 11, pp. 826–839, 2015, doi: 10.1680/stbu.13.00107.

1010

ANÁLISIS DEL ESTADO DE CONSERVACIÓN DE LA ESTRUCTURA DE MADERA DE UNA AVIONETA MODELO JODEL COMPOSTELA D-119-S DE 1966

Ignacio Bobadilla Maldonado¹; Maria Aurelia Segura Lopez¹; Daniel F. Llana¹; Marina Arce Blanco²; Francisco Arriaga¹

¹ Universidad Politécnica de Madrid

² MITECO

Palabras clave / Palavras-chave:

Patología de la madera, Hongos, Carcoma, Métodos no destructivos, Ondas de impacto, Penetrómetro, Peritación

Resumen / Resumo:

Este trabajo consiste en el análisis y diagnóstico de la estructura de madera de una avioneta modelo Jodel Compostela D-119-S de 1966. Se ha efectuado una inspección visual detallada y una toma de muestras para su posterior análisis en laboratorio, y se han aplicado diversas técnicas no destructivas sobre las piezas objeto de estudio para estimar su humedad y sus propiedades físicas y mecánicas. Se ha identificado la madera de los listones como *Pinus sylvestris* L. y la de los tableros contrachapados como *Aucoumea klaineana* Pierre. Se han obtenido resultados desfavorables respecto al estado de conservación de la estructura, detectándose un ataque de carcoma común, *Anobium punctatum* De Geer, que afecta al 50% de los listones de pino silvestre analizados. Las propiedades físico-mecánicas residuales estimadas para las piezas de madera de pino silvestre analizadas están por debajo de los umbrales normales para la especie, siendo la velocidad de propagación media de ondas de impacto de 3687 m/s, un 33% menor que en madera sana. El módulo de elasticidad dinámico estimado toma valores medios de 6189 N/mm², un 56% inferiores a lo normal. Estos valores se deben principalmente al ataque patógeno de carcoma identificado. En los tableros contrachapados se han detectado mohos superficiales que no afectan a sus propiedades. La velocidad de propagación de ondas de impacto media registrada es de 3005 m/s, la densidad media estimada de 498 kg/m³ y el módulo de elasticidad estático medio de 3628 N/mm², superan por tanto los valores normales para el tipo de tablero.

1. Introducción

El uso de madera en aviación tuvo su apogeo durante las primeras décadas del siglo XX, especialmente antes de la Segunda Guerra Mundial. En esa época, muchos aviones, incluidos modelos icónicos como el Boeing 247 y el Douglas DC-3, utilizaban estructuras de madera en combinación con tela para sus alas y fuselajes. Sin embargo, con los avances tecnológicos y la necesidad de aeronaves más grandes y veloces, la industria se orientó hacia materiales metálicos y compuestos. El uso de madera en la construcción de avionetas comerciales ha disminuido considerablemente en la actualidad, pero

todavía existen algunos modelos que incorporan este material, especialmente en ciertas partes de la estructura. La avioneta Jodel D-119-S Compostela, objeto de este estudio, es una variante del modelo original, Jodel D-112 diseñado en 1946 por los franceses Edouard Joly y Jean Delmontez. La empresa española Aero Difusión S.L adquirió la licencia de fabricación en ese mismo año, y más tarde, en 1958 presentó al mercado el modelo D-119. Aproximadamente en 1962, Fernando de Caralt Cera, ingeniero aeronáutico, rediseñó y mejoró el modelo, en el aeródromo “Parayas” en Santander. Esta nueva variante se denominó D-119-S, cuenta con un motor de 90 CV ligeramente modificado respecto al francés y pasó a ser conocido como “Compostela”. Es una avioneta biplaza idónea para la formación y entrenamiento de pilotos [1, 2]. La avioneta concreta objeto de nuestro estudio es de 1966, fue anteriormente utilizada por la empresa Aerofoto y el Real Aero Club de Asturias y el anterior propietario, José Emilio Álava Quintana, la ha tenido guardada unos 10 años aproximadamente en un almacén parcialmente abierto en Asturias. Posteriormente, en 2017 fue adquirida en donación por la Fundación Infante de Orleans (FIO) y trasladada a Guadalajara, España.

2. Objetivo

La FIO solicitó la determinación del estado de conservación de su estructura de madera dando una valoración objetiva de los daños encontrados, así como una propuesta de actuación. Se planteó una inspección visual detallada, la correspondiente toma de muestras para determinar las especies de madera de estructura y recubrimiento y la patología detectada. Además, se realizaron ensayos no destructivos (ND) para estimar las propiedades de las piezas componentes de la estructura.

3. Material y métodos

Para abordar los objetivos propuestos se utilizó el equipamiento habitual de inspección de una estructura de madera, adaptándolo en este caso a las características especiales de la avioneta (tamaño de la estructura y de las piezas, accesibilidad, etc.). Además, se contó con los siguientes equipos de laboratorio para el análisis de las muestras: estufa, balanza, baño termostático y micrótopo, así como microscopio y lupa. Los ensayos ND realizados siguen el protocolo habitual de medición en cara vista, realizando por tanto ensayos indirectos en cara de la velocidad de propagación de ondas de impacto con el equipo comercial MicroSecond Timer MST (Fakopp). Se realizaron dos correcciones de la velocidad de propagación, una primera que tiene en cuenta la humedad y otra por la medida indirecta en cara de la velocidad. En este último caso se ha decidido hacer unos nuevos modelos de corrección, tomando para ello dos grupos de 8 probetas, 8 listones de pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.) de 600x30x20 mm³ y 8 tiras de tablero contrachapado de 3x50x600 mm³ de características similares al original, en estas probetas se realizaron con el MST medidas directas de testa a testa e indirectas en cara, de la velocidad de propagación. La estimación de la densidad y el estado del interior de la avioneta se auscultó con ensayos de penetración con el equipo Pilodyn 6J Forest (Proceq) y se limitaron a las piezas de mayor sección. Toda la inspección se realiza sobre la parte accesible de la estructura completa de la avioneta. La estructura del fuselaje se inspecciona desde el interior. Un plano digitalizado de la estructura [2] permitió numerar y señalar las piezas inspeccionadas (Figura 2). En las alas solo se tiene acceso a las piezas centrales que conectan con el fuselaje, por tanto, la toma de muestras y los ensayos se limitan a esa zona central.

4. Resultados

En la inspección visual del interior accesible de la estructura se observaron piezas afectadas con orificios de salida de insectos, imagos muertos en la base del fuselaje, y detritos (serrín fino) en la proximidad de los orificios de salida. Se observó así mismo que en la superficie de los tableros aparece una formación algodonosa blanquecina de forma aleatoria. Se toman muestras de madera sana y afectada, tablero, manchas blanquecinas, insectos y detritos para su análisis en laboratorio. Los resultados son los siguientes (Figura 1): La madera se corresponde con la especie *Pinus sylvestris* L. El tablero contrachapado resulta ser de tres chapas de la especie *Aucoumea klaineana* Pierre. (Okume). Tanto los insectos adultos como los detritos analizados corresponden a la carcoma común de la especie *Anobium punctatum* De Geer. Por último, las formaciones algodonosas de la superficie de los tableros son mohos. Dadas las condiciones ambientales del período de almacenaje en Asturias, que se prolongó durante 10 años, y en el que se alcanzaron con frecuencia valores de la humedad de equilibrio higroscópico (HEH) del 18%, no es de extrañar la presencia de las carcomas y los mohos. En lo que se refiere a la extensión e importancia de los patógenos identificados, la carcoma afecta al 50% de las piezas analizadas. Los mohos por su parte afectan a la práctica totalidad de los tableros. En la Figura 2 se puede observar la distribución de las piezas afectadas.

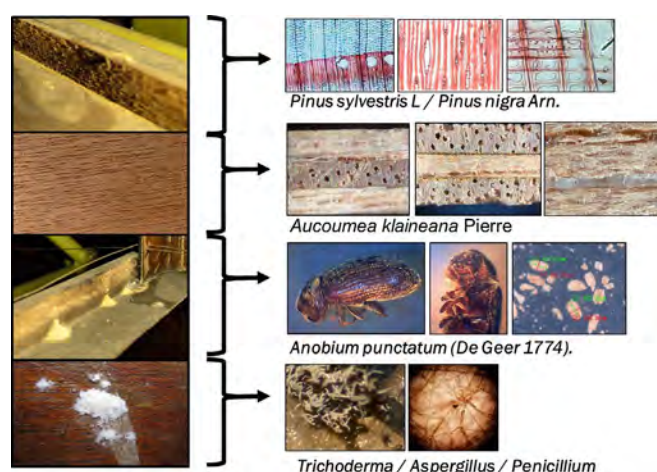


Figura 1: Esquema de los análisis e identificaciones realizados en el laboratorio tras la toma de muestras

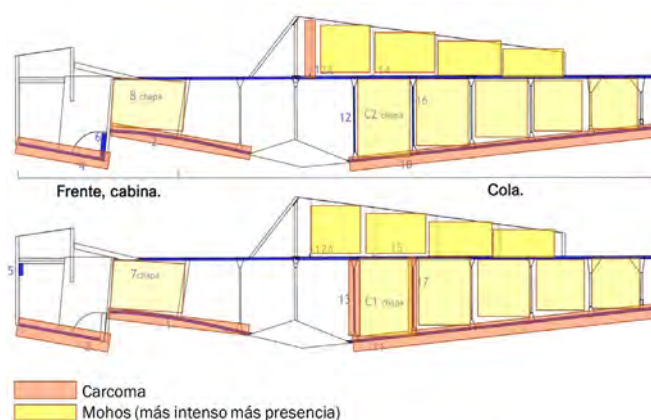


Figura 2: Piezas afectadas por los patógenos identificados. Las marcas rojas hacen referencia a los listones de pino atacados por la carcoma, las marcas amarillas a los tableros afectados por los mohos, a mayor intensidad de color mayor presencia.

.En cuanto a las mediciones no destructivas realizadas in-situ, la Figura 3 recoge de forma resumida los resultados por zonas del MOE dinámico, MOE estático estimado y densidad estimada. Las densidades en la madera han sido estimadas con Pilodyn

mediante el modelo: $\rho_{est} = 650,7 - 14,1 * P$ (R^2 0,35, siendo P la profundidad de penetración en mm) [3]. El resultado obtenido en este caso no requiere corrección [4]. En el caso de la velocidad de propagación de ondas, el valor final considerado es el resultante tras dos correcciones, una por humedad y otra por la medida indirecta en cara, ya que los modelos de estimación utilizados obtenidos en bibliografía, son realizados generalmente por medición directa de testa a testa y al 12% de HEH [5]. Las velocidades se han corregido por humedad mediante el modelo: $V_{12} = V_h / [1 - 0,064 * (H - 12)]$ [6]. Las correcciones por la medida indirecta en cara se han hecho mediante un modelo propio desarrollado para este trabajo: $V_{corr} = 0,9867 * V_{12} + 373$ (R^2 0,97). El módulo de elasticidad (MOE) dinámico se ha calculado mediante la ecuación: $MOE_{dyn} = \rho * V^2$ [7]. En los tableros contrachapados las velocidades se han corregido por humedad mediante el mismo modelo utilizado en madera maciza. Además, se ha corregido la medida indirecta en cara mediante un modelo propio desarrollado para este trabajo: $V_{corr} = 1,09 * V_{12} - 212$ (R^2 0,46). Las densidades han sido estimadas con MST mediante modelo: $\rho_{est} = 0,0642 * V_{corr} + 309$ (R^2 0,71) y el MOE se estima mediante el modelo: $MOE = 1,71 * V_{corr} - 1511$ (R^2 0,79) [8]. La figura 3 muestra la distribución de los resultados en todas las piezas medidas y su comparación con la especificación para el material sano de referencia (valores medios). Se observa que los valores obtenidos para la madera del fuselaje quedan muy por debajo de lo esperado en madera sana, en cuanto a los tableros, los valores estimados están dentro de lo normal.

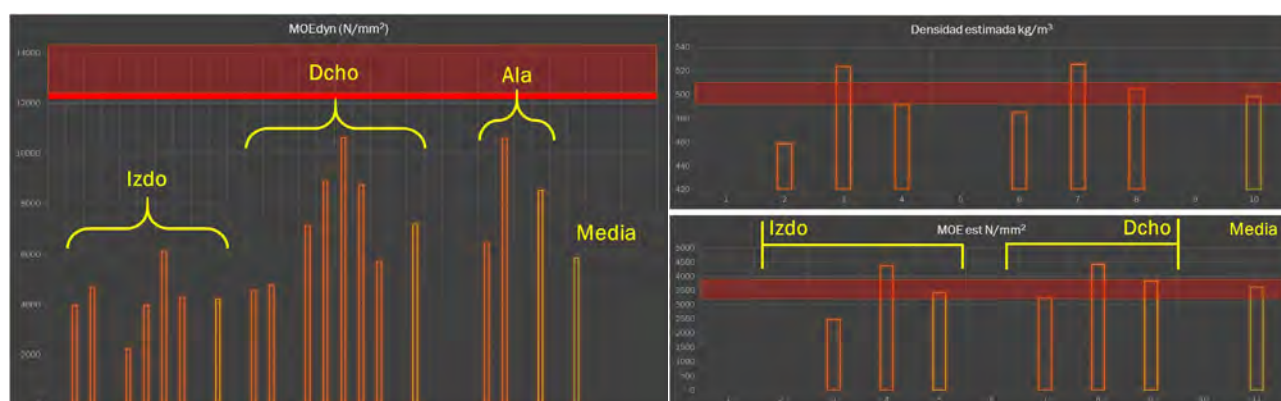


Figura 3: Resultados de estimación mediante métodos no destructivos. En naranja oscuro las medidas individuales de las piezas, en naranja claro las medias por zonas. A la izquierda MOEs dinámicos calculados en las piezas del fuselaje y alas. A la derecha densidades y MOEs estimados en los tableros. Las líneas y franjas rojas de los gráficos indican los valores umbral en material sano.

5. Conclusiones

La especie de madera de la estructura es *Pinus sylvestris* L. y la de los tableros es *Aucoumea klaineana* Pierre. Una buena parte de la estructura de la avioneta (50%) está afectada por carcoma común (*Anobium punctatum* De Geer), y la mayoría de los tableros que conforman la carcasa del fuselaje (70%) están afectados por mohos superficiales. Este estado patológico es debido a las condiciones

de almacenamiento, que han propiciado elevadas humedades relativas del aire y HEH por encima de los umbrales recomendados (18%). El ataque de la carcoma ha afectado a las piezas de madera de forma notable, lo cual se pone de manifiesto en la pérdida de un 33% en la velocidad de propagación de ondas de impacto (media global de 3687 m/s) y de un 56% en el MOE dinámico (media global de 6189 N/mm²), lo cual compromete la estabilidad estructural del conjunto. Por su parte los mohos, no parecen afectar en gran medida a los tableros, que presentan velocidades de propagación y MOE que en general se pueden considerar normales (3005 m/s y 3628 N/mm², respectivamente). El lado izquierdo del fuselaje es el más afectado, posiblemente por haber estado más expuesto durante el almacenamiento. La avioneta no se encuentra por tanto en condiciones de volar y si se desea reutilizarla para tal fin, tendría que sustituirse gran parte de la estructura de madera de pino del fuselaje.

Referencias

- [1] Lluch, J.M. (2013) Reseña de la aviación de construcción amateur en España. AEROPLANO. Revista de la Aeronáutica, 31, 160-177.
- [2] Segura López, M^a Aurelia (2021) Análisis del estado de conservación de la estructura de madera de una avioneta modelo Jodel Compostela D-119-S, propiedad de la FIO. TFG, E.T.S.I. Montes, Forestal y del Medio Natural Universidad Politécnica Madrid
- [3] Bobadilla, I.; Iñiguez, G.; Esteban, M.; Arriaga, F.; Casas, L. (2007) Density Estimation by Screw Withdrawal Resistance and Probing in Structural Sawn Coniferous Timber. 15th International Symposium on Non-destructive Testing of Wood. 247-251 Pp.
- [4] Calderón, L.(2012) Estudio sobre la influencia del contenido de humedad de la madera en ensayos no destructivos para *Pinus nigra* Arn, *Pinus radiata* D. Don. y *Pinus sylvestris* L. Madrid. PFC. Universidad Politécnica Madrid.
- [5] Arriaga, F.; Llana, D.F.; Esteban, M.; Iñiguez-González, G. (2017) Influence of length and sensor positioning on acoustic time-of-flight (ToF) measurement in structural timber. DOI 10.1515/hf-2016-0214. Holzforschung 2017; 71(9): 713–723
- [6] Llana, D.F.; Iñiguez-González, G.; Martínez, R.D.; Arriaga, F. (2018) Influence of timber moisture content on wave time-of-flight and longitudinal natural frequency in coniferous species for different instruments. Holzforschung 72(5):405-411.
- [7] Iñiguez, G. (2007). Clasificación mediante técnicas no destructivas y evaluación de las propiedades mecánicas de la madera aserrada de coníferas de gran escuadría para uso estructural. Tesis doctoral: Universidad Politécnica de Madrid.
- [8] Santirso Martin, C.;(2012) Estimación del envejecimiento físico y biológico del tablero contrachapado mediante métodos no destructivos. Madrid: TFG. Universidad Politécnica Madrid.

1012

ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LA RESISTENCIA AL ARRANQUE DE TORNILLOS ESTRUCTURALES TODO ROSCA PERPENDICULARES A LA FIBRA EN MADERA DE ROBLE EUROPEO

Pablo González-Serna¹; Josu Benito-Ayúcar¹; Daniel Luengas-Carreño²

¹ TECNALIA

² Universidad del País Vasco UPV/EHU

Palabras clave / Palavras-chave:

Análisis experimentales, Resistencia al arranque, Tornillos estructurales, Todo rosca, Roble europeo, Estructuras de madera existentes, Rehabilitación

Resumen / Resumo:

Los tornillos estructurales todo rosca presentan una gran variedad de posibles aplicaciones en la intervención en estructuras de madera, entre ellas el desarrollo de soluciones de colaboración estructural entre elementos preexistentes de madera de frondosa y elementos de madera laminada encolada o paneles contralaminados de madera de conífera. Sin embargo, las formulaciones recogidas en las normativas actuales vienen derivadas de campañas experimentales realizadas mayoritariamente en madera de coníferas y pueden no estimar con precisión la capacidad de estos tornillos cuando se utilizan en determinadas maderas de frondosa. Por esto, se ha diseñado un plan de ensayos para caracterizar el funcionamiento de estos tornillos en las especies de frondosas más habituales en edificios existentes en nuestro entorno y poder desarrollar soluciones técnicas que combinen distintos tipos de madera de forma más precisa. En este artículo se recogen los resultados obtenidos en las dos primeras campañas experimentales realizadas, en las que se ha ensayado la resistencia al arranque de tornillos perpendiculares a la fibra en madera de roble europeo (*Quercus robur* y *Quercus petraea*). El objetivo de estos ensayos ha sido analizar la influencia del diámetro del tornillo y del pretaladro, la profundidad de penetración, la densidad del material y el ángulo de inserción respecto a los anillos de crecimiento.

1. Introducción

Los tornillos estructurales todo rosca presentan distintas ventajas a nivel de operatividad en obra frente a otras técnicas en intervención en estructuras de madera. Permiten su inserción a diferentes ángulos y, cuando son de cabeza cilíndrica, pueden ser embebidos dentro de la madera hasta llegar a la profundidad de penetración deseada, lo que a su vez facilita el replanteo in situ de las soluciones diseñadas ante todo tipo de singularidades (gemas, fendas, cajeados, escuadrías diferenciales o piezas con curvatura). Además, su aplicación a 45° y/o en parejas cruzadas aporta una gran rigidez. Todo esto resulta en que con un mismo tipo de tornillo se pueda realizar una gran variedad de actuaciones de reparación o refuerzo, como la consolidación de uniones carpinteras, refuerzos a

cortante y, en particular, colaboraciones estructurales madera-madera. En la actualidad, existen en el mercado algunos modelos de tornillo estructurales todo rosca específicos para madera de frondosas, aunque la mayor parte de los tornillos que se encuentran en los catálogos están orientados a su uso en madera de coníferas, ya que es la madera predominante en la construcción de nueva planta. Por otra parte, las ecuaciones de diseño de tornillos en madera recogidas en las normas de construcción como el Eurocódigo 5 [1] y el CTE [2] están basadas en campañas de ensayo realizadas con madera de coníferas [3] y no hacen distinción entre diferentes tipos de madera, más allá de la posibilidad de corregir la resistencia de cálculo con la densidad de la especie en cuestión.

En la zona del País Vasco es frecuente encontrar estructuras anteriores al siglo XX construidas con madera de roble europeo (*Quercus robur* y *Quercus petraea*) [4], una madera con una densidad que puede duplicar a la del abeto. Sin embargo, a pesar de la existencia de estos tornillos para madera de frondosas, es común que en los trabajos de intervención estructural derivados de los proyectos de rehabilitación se acaben utilizando modelos de tornillos más generalistas para coníferas. Por una parte, por la mayor variedad en catálogo y disponibilidad de suministro y, por otra, porque es frecuente que las soluciones de refuerzo diseñadas incorporen madera laminada o CLT, lo que resulta en estructuras híbridas combinando elementos de madera de frondosa con elementos de madera de conífera [5].

Este trabajo de investigación tiene como objetivo estudiar el comportamiento y la capacidad resistente de los tornillos todo rosca comerciales más habituales en madera de roble europeo. Como primera fase del plan de ensayos global, se han realizado dos campañas experimentales de arranque de tornillos perpendiculares a la fibra con la finalidad de evaluar la influencia del diámetro del tornillo y del pretaladro, la profundidad de penetración, la densidad del material y el ángulo de inserción respecto a los anillos de crecimiento.

2. Metodología

Los ensayos realizados se dividen en (a) una campaña inicial de resistencia al arranque para el estudio de la influencia del pretaladro, y (b) una campaña de estudio de la resistencia al arranque de tornillos con diferentes rangos de profundidad de penetración y un diámetro de pretaladro fijo para cada tipo de tornillo. En ambas campañas se han utilizado tres modelos diferentes de tornillo todo rosca: un primer tornillo (T1) de 6,5mm de diámetro exterior, un segundo tornillo (T2) de 8,0mm de diámetro exterior, y un tercer tornillo (T3) de 10mm de diámetro exterior.

Se han utilizado dos partidas de madera de roble europeo; una primera partida de madera de roble recuperado en obra (L01), y una segunda partida de madera de roble aserrado de nueva producción (L02). Para la preparación de las probetas de arranque, se ha realizado una selección de la madera siguiendo los criterios de la norma de clasificación visual de madera de frondosas alemana DIN 4074-5 [6], retirándose aquellas piezas o partes con nudos, acebolladuras o fendas excesivas.

Para la realización de los ensayos se ha utilizado la configuración definida en la norma para la determinación de la resistencia al arranque de elementos de fijación en madera EN 1382 [7], siguiendo las distancias de separación entre tornillos y a borde de pieza definidas en la misma y aplicando una carga con velocidad de deformación constante hasta el fallo. Se han utilizado piezas de madera con una longitud entre 30cm y 60cm, en cada una de las cuales se han ensayado varios tornillos, alternando diámetros.

Para una medición lo más precisa posible de la densidad y humedad en el entorno del tornillo, se han dividido las probetas de madera en una retícula con cuadrantes de una dimensión aproximada de 40x40mm. Se ha calculado la densidad local de la madera en el punto de inserción del tornillo como el promedio de las densidades de las piezas correspondientes a los cuadrantes inmediatamente anterior y posterior al ensayo, siguiendo la dirección de la fibra (Fig. 1, izquierda). Tras el corte de las probetas, se ha medido el ángulo entre la directriz del tornillo y los anillos de crecimiento, con el objetivo de evaluar una posible diferencia de comportamiento entre tornillos introducidos en la dirección radial o tangencial de la sección de madera.



Figura 1. Probetas marcadas (izquierda), dispositivo de aplicación de carga (centro) y tornillo tras el arranque (derecha).

3. Resultados

La Tabla 2 y la Tabla 3 recogen la relación de ensayos realizados en cada campaña. Se indican el tipo de tornillo, la profundidad de penetración, el diámetro de pretaladro, el número de réplicas y el valor medio de la densidad de las probetas ensayadas.

Tabla 1. Relación de ensayos realizados y parámetros estudiados en la campaña de pretaladros.

Tornillo	Diámetro ext.	Diámetro pretaladro	Prof. nominal	nº de ensayos	Densidad media
	d [mm]	d _{PD} [mm]	t [mm]	n [-]	ρ_m [kg/m ³] (COV %)
Lote L01					
T1	6,5	0 - 3 - 5	45	22	829,21 (8,04)
T2	8,0	3 - 5 - 6	60	21	827,12 (8,62)
T3	10,0	4 - 7 - 8 - 9	60	32	828,43 (6,93)
Lote L02					
T2	8,0	3 - 4 - 4,5 - 5 - 5,5 - 6 - 7 - 7,5	65	40	757,30 (8,62)

Tabla 2. Relación de ensayos realizados y parámetros estudiados en la campaña de profundidad de penetración.

Tornillo	Diámetro ext.	Diámetro pretaladro	Prof. nominal	n° de ensayos	Densidad media
	d [mm]	d _{PD} [mm]	t [mm]	n [-]	ρ_m [kg/m ³] (COV %)
Lote L02					
T1	6,5	4,0	30 – 40 – 50 - 60	39	714,00 (10,00)
T2	8,0	5,0	40 – 60 – 80 - 100	31	752,37 (9,56)
T3	10,0	5,0	40 – 80 – 100 - 120	29	743,02 (8,57)

Los resultados experimentales obtenidos muestran una relación lineal con una alta correlación entre la densidad local de la madera y la resistencia y poca o ninguna influencia del ángulo entre la directriz del tornillo y los anillos de crecimiento. En la campaña de estudio del pretaladro se observa que la variación del diámetro de pretaladro no altera significativamente en la resistencia al arranque f_{ax} , salvo en diámetros por encima de 0,8 veces el diámetro exterior del tornillo (Fig. 2, izquierda), proporción a partir de la cual se detecta una notable reducción de la resistencia. Esto coincide con conclusiones de estudios similares [3] y con las propias indicaciones constructivas recogidas en el Eurocódigo 5 [1].

En la segunda campaña, la capacidad F_{max} obtenida en todo el rango de profundidades de penetración ensayado es, de media, un 54% superior a la estimada con la formulación del Eurocódigo 5 utilizando los valores de densidad obtenidos experimentalmente (Fig. 2, derecha), siendo notable esta diferencia en uniones con mayor longitud de penetración.

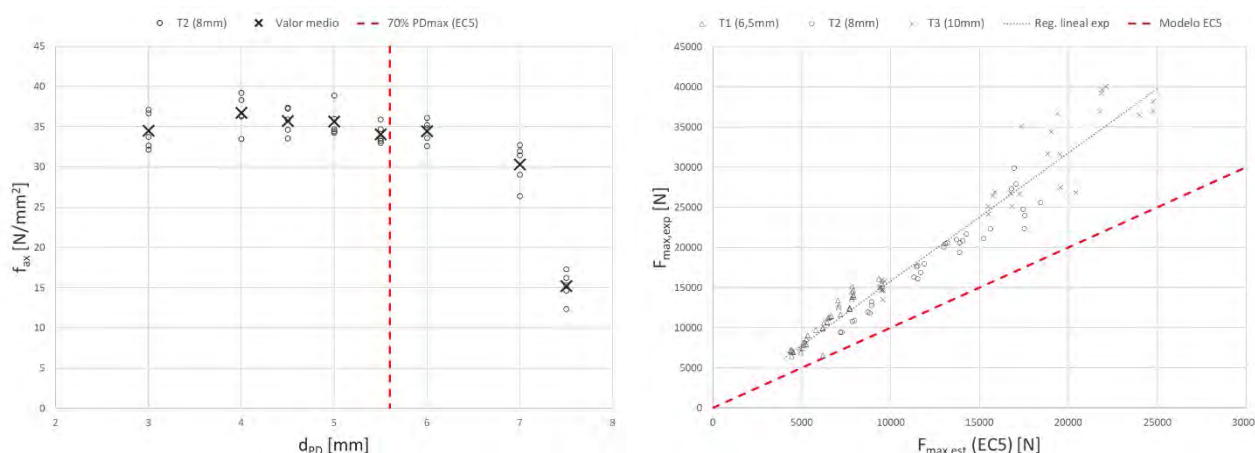


Figura 2. Gráfica de influencia del pretaladro en la resistencia al arranque del tornillo T2 (izquierda) y gráfica de evaluación de la predicción de capacidad al arranque según la formulación del Eurocódigo 5 (derecha).

Durante los ensayos se ha podido observar varios fallos por rotura del acero del núcleo del tornillo en probetas con profundidades de 80mm y 100mm en tornillos T2 (Ø8mm), y de 100mm y 120mm en tornillos T3 (Ø10mm). Analizando los resultados globalmente, no se detecta una resistencia diferencial

entre el lote de madera recuperada y el lote de madera nueva, más allá de la propia diferencia derivada de la distinta densidad que presentan los lotes.

4. Conclusiones

Para una mayor comprensión del funcionamiento de uniones con tornillos todo rosca en madera de roble europeo, se ha realizado una campaña experimental y se ha estudiado la influencia que tienen sobre la capacidad de arranque el diámetro de tornillo y de pretaladro, la profundidad de penetración, la densidad de la madera y el ángulo de inserción respecto a los anillos de crecimiento de la madera.

No se ha detectado una variación significativa de la resistencia al arranque en los ensayos realizados con diámetros de pretaladro por debajo del 80% del diámetro nominal. Tampoco se han encontrado diferencias en el comportamiento o en la capacidad al arranque cuando los tornillos se introducen tangencial o radialmente en la sección de madera. Por último, la diferencia entre la capacidad obtenida experimentalmente y la estimada con las ecuaciones del Eurocódigo 5 sugiere que existe margen de mejora para adaptar las ecuaciones de cálculo a maderas de alta densidad.

Los trabajos presentados no incluyen el análisis del ángulo de inserción del tornillo respecto de la fibra ni de la influencia de la humedad en la capacidad de arranque. Estas variables de diseño, entre otras, serán incluidas en futuras campañas experimentales.

Referencias

- [1] Asociación Española de Normalización (2016) UNE-EN 1995-1-1:2016. Eurocódigo 5. Proyecto de estructuras de madera. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para la edificación.
- [2] Código Técnico de la Edificación (2019) Código Técnico de la Edificación. Documento Básico. Seguridad estructural. Madera; 2019.
- [3] Brandner R.; Ringhofer A.; Reichinger T. (2019) Performance of axially-loaded self-tapping screws in hardwood: Properties and design. Engineering Structures. 188:677-699. doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.03.018
- [4] Benito-Ayucar J.; Gonzalez-Serna P.; Luengas-Carreño D.; Uribe-Rus E. (2024) Implementación de injerto de madera para la reparación de vigas en el palacio Zabala de Ordizia. Congreso Latinoamericano sobre patología de la construcción, tecnología de la rehabilitación y gestión del patrimonio (REHABEND 2024). 7 a 10 de mayo. Gijón, España.
- [5] Gonzalez-Serna, P.; Benito-Ayucar J.; Luengas-Carreño D. (2024) Rehabilitación estructural mediante forjados colaborantes madera-madera en el ayuntamiento de Itsaso. Congreso Latinoamericano sobre patología de la construcción, tecnología de la rehabilitación y gestión del patrimonio (REHABEND 2024). 7 a 10 de mayo. Gijón, España.
- [6] German Institute for Standardization (2008) DIN 4074-5:2008-12 Strength grading of wood - Part 5: Sawn hard wood.
- [7] Asociación Española de Normalización (2016) UNE-EN 1382:2016 Estructuras de madera. Métodos de ensayo. Resistencia al arranque de los elementos de fijación en la madera.

1013

ANALYSIS AND POST-PROCESSING OF SINGULAR GEOMETRY TIMBER BUILDINGS

Manuel Sánchez-Solís¹

¹ Degree of Freedom

Palabras clave / Palavras-chave:

Connections, Cross-laminated timber, Finite Element Method, Low-carbon construction

Resumen / Resumo:

In the past two decades, timber has evolved from a traditional construction material to a key player in complex structures worldwide, including commercial, educational, and residential buildings of significant height. Planar elements, predominantly utilizing cross-laminated wood (CLT) panels, present novel challenges in structural design, leading Degree of Freedom to develop the Timber Interactive Modelling and Post-Processing Software (TIMPS). Serving as a plug-in for popular Finite Element Method (FEM) software, TIMPS addresses the intricacies of modelling linear elements, panels, and joints in diverse timber projects, reflecting the bespoke geometries encountered on many projects both in Scandinavia and internationally. Projects realised illustrate timber's adaptability in unique forms, its strength and energy efficiency in cross-laminated timber (CLT), and the versatility of glued laminated timber columns and beams in diverse structures. Degree of Freedom's post-processing tools, to be used with commercial FEM software, bridge the gap between existing capabilities and the demands of contemporary timber structures. The software allows for the design of advanced timber products, aligning with sustainability goals. Its user-friendly interface and adaptability overcome structural calculation challenges. Examples are given showcasing TIMPS' effectiveness in addressing the specific needs of this burgeoning construction trend, emphasizing its role in advancing timber as a modern and sustainable construction material.

1. Introduction

In the last two decades, the use of timber as a principle structural material has experienced exponential growth all around the world. In many countries, structural timber has typically been used for roofs and single-family houses. More recently it has been used for larger commercial, educational and residential buildings which have additional complexity, with larger floor area or and greater height (up to 20-25 floors). In this last application, the structural typology based on planar elements (walls and slabs) predominates globally, using panels of cross-laminated wood or CLT. Regarding the structural design of this type of buildings, two great challenges appear compared to the calculation of conventional buildings: the modelling/verification of the linear elements and panels as structural elements and the modelling/design of the joints between panels. Degree of Freedom have been involved, over last decade, in the structural design of many timber buildings, mainly in Norway and the wider Scandinavia area, but also internationally. These projects have in common only the use of timber but are singular in their geometry. All give rise to challenges in their analysis and post-processing with common commercial FE software. Timber Interactive Modelling and Post-Processing Software (TIMPS)

is an internal programming routine implemented by Degree of Freedom for the scope of the analysis and design of timber structures acting as a plug-in for the most common commercial FEM software.

2. Timber projects

Many projects in Scandinavia use structural timber. Timber stands out as a low carbon construction material, due to its environmental and sustainability benefits. Unlike traditional materials such as concrete and steel, the production of timber requires significantly less energy, resulting in a lower carbon footprint. Its versatility for a wide range of applications in construction, from structural elements to finishes. Figure 1 shows how timber can be adapted to singular forms. Timber products, such as cross-laminated timber (CLT), not only exhibit strength and durability but also promote energy efficiency in buildings and can be adapted to many building uses as shown in Figure 2. Timber structures often require less energy to heat and cool, contributing to long-term energy savings. Furthermore, timber is a renewable resource, and responsible forestry practices ensure the replenishment of harvested trees. Glued laminated timber columns and beams can be combined in many forms, and at different scales, to create many different types of structures as seen in Figure 3. All these projects have given rise to the need for a bespoke analysis and post-processing routine.



Figure 1. Timber office buildings – Finanssparken and SporX.

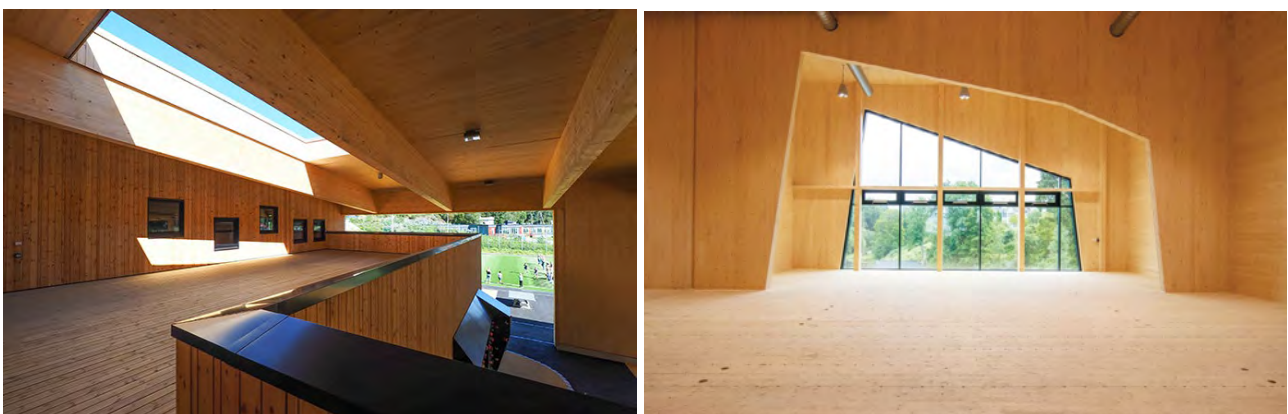


Figure 2. CLT use – school and climbing centre.



Figure 3. *Timber frame buildings – viewing hut and library.*

3. Scope of post-processing software

The post-processing tools developed are intended to be used as a plug-in or additional module of different commercial finite element software for the design of timber buildings. The novelty of this solution can be considered from several points of view. First it allows the design of technologically advanced timber products (CLT panels), which are currently the spearhead of an industry that is committed to sustainability in the construction sector, reducing the carbon footprint.

Secondly, the development of these tools was born after detecting a gap between the possibilities of the existing commercial software and the new products available in the construction sector. Structural engineers are increasingly required to design complex timber structures, and to date there is no complete tool that allows for their design (as there is for conventional materials such as concrete and steel). Finally, the existence of software that allows the integral design of timber structures in an automatic and optimized way facilitates the design of more complex buildings, such as high-rise buildings (up to 20-25 floors), which are very expensive to calculate with the currently existing software.

One of the main challenges of this task was to create a versatile post-processing tool that could be used in conventional structural calculation software, for which an input data package or “input” must be established that can be easily adapted to the different programs. Another challenge was to create a friendly interface that can be used by any technician without programming or program code knowledge. By meeting these objectives, the tool would allow an integral design of timber building structures, overcoming the limitations of existing commercial software. Finally, the existence of this tool would simplify and optimize the calculation of these structures, which would undoubtedly promote the use of timber in the construction sector.

4. Examples from post-processing

This section includes some of the outputs provided by this tool in different projects.

5. Glued laminated timber

Typical results for linear elements are shown here in Figure 1.

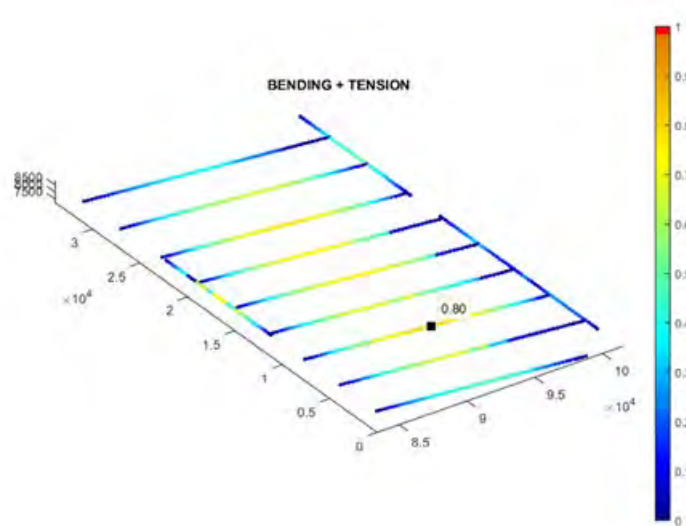


Figure 4. Bending verification of roof timber beams

6. Cross-laminated timber

Typical results for planar elements are shown here in Figure 2.

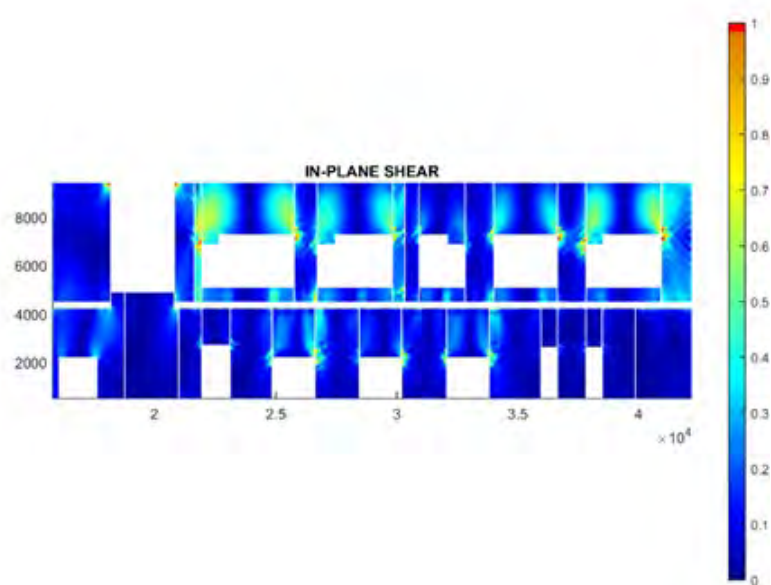


Figure 5. In-plane shear verification of façade CLT walls

7. CLT joints

Results for connections between adjacent CLT panels with timber screws are shown in Figure 3.

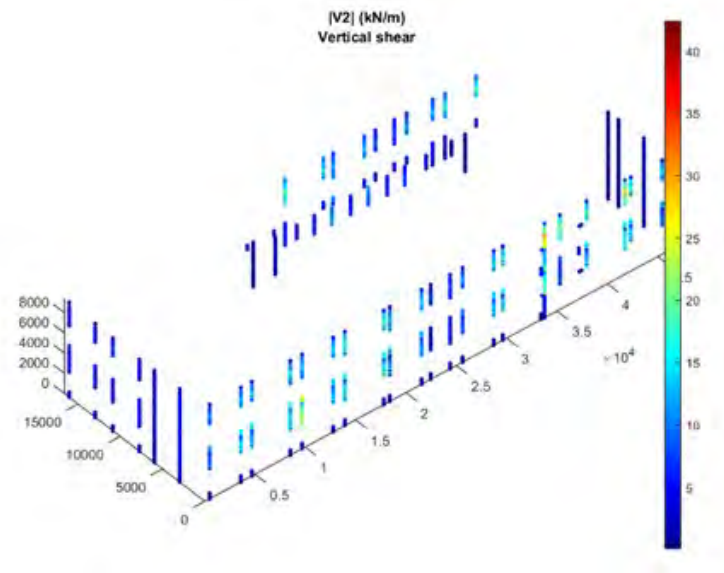


Figure 6. Vertical shear forces in CLT joints

8. Conclusions

The significance of timber as a low-carbon construction material is underscored by its environmental and sustainability benefits, ranging from lower production energy to versatile applications for different building types. The post-processing tools developed by Degree of Freedom serve as a crucial link between existing software capabilities and the evolving demands of contemporary timber structures. TIMPS not only facilitates the design of advanced timber products but also streamlines the integral design process, overcoming some of the limitations in commercial software and simplifying complex calculations. Ultimately, as showcased through examples, TIMPS emerges as an asset in addressing the specific needs of modern timber projects, fostering sustainability and innovation in the construction sector. The tool's user-friendly interface and adaptability position timber as a viable and efficient construction material for the future, marking a significant stride towards the widespread acceptance and optimization of timber structures in the built environment.

1014

APLICACIÓN DE LA MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD DE ULTRASONIDOS (SYLVATEST 4.0) A LA CARACTERIZACIÓN DE MADERA ESTRUCTURAL DE PINO SILVESTRE

Gloria Llorente Sánchez¹; Roberto D. Martínez López¹; Luis-Alfonso Basterra¹

¹ Universidad de Valladolid

Palabras clave / Palavras-chave:

Ensayos no destructivos, Sylvatest 4, Fakopp MST, Módulo de Elasticidad, Técnicas acústicas, Estructuras existentes

Resumen / Resumo:

La necesidad de conocer las propiedades mecánicas de las estructuras de madera existentes ha dado lugar a numerosos avances en las técnicas no destructivas, pero pocas veces se tiene oportunidad de contrastar sus resultados con datos obtenidos de ensayos hasta rotura. Este trabajo parte de las características mecánicas de un lote de 13 vigas de *Pinus sylvestris* L., de tamaño estructural (90 x 140 x 4840 mm) establecidas mediante máquina según norma UNE EN 408, y las compara con los datos obtenidos por el Sylvatest 4.0, versión más reciente del veterano dispositivo de ultrasonidos, de funcionamiento inalámbrico y que opera mediante una app de teléfono móvil, cuyo algoritmo interno no es transparente al operador. Se realizan diversas mediciones con el Sylvatest 4.0 y el también muy conocido Fakopp MicroSecond Timer (MST), en distintas disposiciones y ángulos. Y también se recurre al uso de un gel especial de acoplamiento, con el objetivo de estudiar cuán relevante es en la calidad de los resultados. Tras un estudio estadístico, descriptivo y comparativo, destaca la precisión de las mediciones indirectas en seco realizadas con Sylvatest 4.0, y se establece un modelo de correlación entre sus valores y los establecidos por máquina. Además, se demuestra que el gel de acoplamiento no aporta mejora al procedimiento. Por último, se desestiman las mediciones transversales a 90° y a 45° por su imprecisión, con ambos equipos.

1. Introducción

La madera ha acompañado al ser humano en su evolución, siendo utilizada en numerosas estructuras de edificios que han llegado hasta hoy; entre otras cosas por sus buenas prestaciones constructivas y el componente estético que supone su uso. Hoy en día, por razones variadas y que no caben en este trabajo, la sociedad apuesta por la rehabilitación del patrimonio existente, una gran parte sustentado en estructuras construidas con madera que, por consiguiente, procede conocer técnicamente a fondo. Para ello surgen y evolucionan los Ensayos No Destructivos (END) basados en diversas técnicas que permiten estimar características del material sin alterarlo, o haciéndolo mínimamente (EPND).

Existen multitud de técnicas y dispositivos, siendo las acústicas y ultrasónicas de las más conocidas y aplicadas. Entre ellas destacan los equipos CBS-Sylvatest y Fakopp MST. El primero utiliza ondas

ultrasónicas, desarrolladas en profundidad desde la década de 1970. Este concreto dispositivo surge en 1990 y ha evolucionado enfocando sus avances en la mejora de la facilidad de aplicación. Así, ya cuenta con cuatro generaciones consiguiendo en la última (Sylvatest 4.0) un funcionamiento inalámbrico con conectividad bluetooth integrada. Por su parte, el Fakopp MST utiliza la onda inducida por golpeo, se crea cuatro años más tarde y cuenta con dos versiones, habiendo sido la primera ya descatalogada.

1.1. Antecedentes

Extensa literatura atestigua cómo estos equipos han sido aplicados en multitud de ensayos, en diferentes condiciones y con diferentes especies, y analiza exhaustivamente sus resultados y conclusiones, generando una importante base de conocimiento.

De su estudio se pueden obtener cuatro conclusiones principales. En primer lugar, que conviene que los END se complementan con una clasificación visual. También, que una la velocidad de propagación superior a 5000 m/s es indicador, en general, de una buena calidad de la madera. Además, se deberían estandarizar las condiciones en las que se realizan estos ensayos, como podría ser trabajar con CH del 12%; en caso contrario, es conveniente aplicar algunas correcciones. Por último, que, en la práctica, el aumento de la distancia entre palpadores supone una atenuación de la onda emitida que también se debe considerar.

1. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo fue generar un modelo de correlación entre los valores previamente conocidos y establecidos por ensayos normalizados en máquina y algunos de los resultantes del equipo Sylvatest 4.0 y el Fakopp MST, comprobando la precisión del algoritmo interno del primero, opaco al operador. Como objetivos secundarios se buscaba comprobar si la aplicación de gel de acoplamiento supone una diferencia en los valores resultantes y, finalmente, conocer cuál es el modo de medición que arroja los valores más parecidos a los establecidos por máquina, con especial atención a las mediciones indirectas, comúnmente aplicadas en obra con estos equipos.

2. Material y método

2.1. Equipos de laboratorio y material fungible

Los dos equipos principales han sido el Sylvatest 4.0 y el Fakopp MST. Secundariamente se han empleado otros, como taladro, xilohigrómetro, martillo, etc.

2.2. Material de ensayo

El material de ensayo es un lote de 13 vigas de pino silvestre de tamaño estructural, suministradas por Maderas Barrio al GIR Estructuras y Tecnología de la Madera de la UVA. Fueron previamente clasificadas en una máquina universal de ensayos, según la norma UNE EN 408. Todas tenían una humedad relativa (CH) del 10% y sus dimensiones nominales son 90 x 140 x 4840 mm.

2.3. Ensayos sylvatest

Con este equipo se realizaron mediciones directas e indirectas, en seco y con gel de acoplamiento, específico para su uso en el ámbito médico con equipos de ultrasonidos.

2.4. Ensayos microsecond timer

Las mediciones realizadas con el Fakopp MST fueron: directa, indirecta, transversal a 90° y transversal a 45° respecto del eje de las piezas.

2.5. Método estadístico

El análisis estadístico comienza con una comprobación de normalidad mediante la prueba Shapiro-Wilk buscando conocer si los datos siguen o no una distribución normal. A continuación, se analizan las diferencias estadísticas entre variables a través de un test ANOVA, una verificación de múltiples rangos y una verificación de varianzas. Por último, se desarrollan modelos de regresión simple relacionando los valores previamente establecidos por máquina con los de las distintas mediciones que se han citado.

3. Resultados

Los resultados estadísticos muestran que todos los valores de velocidades de propagación y MOE tienen valores-P mayores a 0,05 y por lo tanto no se puede rechazar que sigan una distribución normal.

Los Módulos de Elasticidad (MOE) ya previamente conocidos de este lote de vigas estaban comprendidos entre 9500 N/mm² y 12700 N/mm², valores que atestiguan una buena calidad estructural de las piezas, como era esperable para esta especie tras una preselección inicial con criterios exigentes. Todas cumplían los criterios de calidad MEG, y por lo tanto les corresponde una clase resistente C-22.

Las velocidades de propagación obtenidas están en torno a 5000 m/s, compatibles con dicha calidad.

En cuanto a las comparaciones entre resultados, se dedujo claramente que la aplicación de gel en las mediciones del Sylvatest 4.0, tanto directas como indirectas, no arrojaron diferencias estadísticamente significativas.

Con el Sylvatest, la comparativa entre los MOE resultantes de las mediciones directas e indirectas en seco muestran diferencias estadísticamente significativas. Sin embargo, las mediciones directas e indirectas con el Fakopp MST no arrojaron diferencias estadísticamente significativas.

En cuanto a las velocidades de propagación transversales, su comparativa con las velocidades tomadas como referencia (velocidad longitudinal de la medición indirecta con el MST) muestran diferencias estadísticamente significativas tanto a 90° como a 45°.

Por último, se obtuvo el siguiente modelo de correlación (1):

$$MOEGTO = 3795,75 + 0,655943 \times MOESIS \quad (1)$$

Donde $MOEGTO$ = MOE establecido por máquina y $MOESIS$ = MOE establecido por medición indirecta en seco con el Sylvatest. R^2 de 55,36%.

[Los resultados completos se omiten en este resumen, y serán incorporados en la ponencia final, de ser esta aceptada].

4. Conclusiones

- Las mediciones directas de Sylvatest 4.0 subestiman los valores reales de Módulo de Elasticidad determinados por máquina. Esto pudiera ser favorable en el ámbito de la construcción por estar del lado de la seguridad.
- La medición indirecta en seco con el Sylvatest 4.0 ofrece los resultados que mejor correlación tienen con los estimados por máquina.
- Los resultados de los Módulos de Elasticidad de las mediciones directas e indirectas del equipo Sylvatest 4.0 muestran diferencias estadísticamente significativas entre sí.
- Se desestima la aplicación de gel de acoplamiento por no presentar diferencias estadísticamente significativas con las mediciones en seco, además de complicar y retrasar el desarrollo del proceso.
- Los Módulos de Elasticidad obtenidos a partir de la medición indirecta con Fakopp MST ofrecen una buena correlación con los de máquina. Añadiendo su facilidad de ejecución, resulta el procedimiento más recomendable en la práctica.
- No existen diferencias estadísticamente significativas entre los valores de módulo de elasticidad estimados de forma directa e indirecta mediante el Fakopp MST y los valores de referencia obtenidos con máquina.
- Se desestiman las mediciones transversales a 45° y 90° al no presentar buena correlación con la velocidad de referencia.

Referencias

- [1] Acuña, L., Díez, M. R., & Casado, M. (2006). Los ultrasonidos y la calidad de la madera estructural. Aplicación a Pinus Pinaster Ait. *Boletín Del CIDEU*, 2.
- [2] Arriaga, F., Llana, D. F., Esteban, M., & Iñiguez-González, G. (2017). Influence of length and sensor positioning on acoustic time-of-flight (ToF) measurement in structural timber. *Holzforschung*, 71(9). <https://doi.org/10.1515/hf-2016-0214>
- [3] Bucur, V., & Böhnke, I. (1994). Factors affecting ultrasonic measurements in solid wood. *Ultrasonics*, 32(5). [https://doi.org/10.1016/0041-624X\(94\)90109-0](https://doi.org/10.1016/0041-624X(94)90109-0)
- [4] Divos, F., & Tanaka, T. (1997). Lumber strength estimation by multiple regression. *Holzforschung*, 51(5). <https://doi.org/10.1515/hfsg.1997.51.5.467>
- [5] Llana, D. F., Iñiguez-Gonzalez, G., Arriaga, F., & Wang, X. (2016). Time-of-Flight adjustment

procedure for acoustic measurements in structural timber. *BioResources*, 11(2). <https://doi.org/10.15376/biores.11.2.3303-3317>

- [6] Llana, D. F., Íñiguez-González, G., Díez, M. R., & Arriaga, F. (2020). Nondestructive testing used on timber in Spain: A literature review. *Maderas: Ciencia y Tecnología*, 22(2). <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2020005000201>
- [7] Montero, M. J., de La Mata, J., Esteban, M., & Hermoso, E. (2015). Influence of moisture content on the wave velocity to estimate the mechanical properties of large cross-section pieces for structural use of scots pine from Spain. *Maderas: Ciencia y Tecnología*, 17(2). <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2015005000038>
- [8] Osuna-Sequera, C., Llana, D. F., Hermoso, E., & Arriaga, F. (2021). Acoustic wave velocity in long pieces of Salzmann pine for in-situ structural assessment. *Construction and Building Materials*, 269. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121256>
- [9] European Standard (2010 + A1:2012) EN 408. Timber structures. Structural timber and glued laminated timber. Determination of some physical and mechanical properties. European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium.

1016

AVALIAÇÃO COMPARATIVA DA SUSTENTABILIDADE DE SOLUÇÃO PREFABRICADA EM MADEIRA

Patricia Rocha¹; Nuno Ferreira¹; Nelson Pereira¹

¹ HOUSELAB

Palabras clave / Palavras-chave:

Sistema avançado, Componentes, Ciclo de vida, Processo produtivo

Resumen / Resumo:

É consensual a necessidade de garantir o desenvolvimento sustentável e o impacto ambiental no setor da construção. A análise do impacto ambiental do setor da construção expõe indicadores preocupantes. O sector da construção foi responsável por cerca de 40% das emissões de CO₂, e a produção de resíduos 36% de todos os resíduos produzidos na Europa [1].

Com o propósito de contribuir para uma otimização e sistematização de recursos no setor da construção, foi desenvolvido um projeto denominado de STEPS, que envolveu um consórcio HOUSELAB, FEUP e CENTI e que foi cofinanciado pelo Portugal 2020/Norte 2020, através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) (NORTE-01-0247-FEDER-047054).

Este projeto foi baseado no desenvolvimento de uma solução tecnológica específica, que corresponde a um sistema de componentes prefabricados com alto nível de automação, leves e de dimensões reduzidas, cuja ligação entre os componentes de todo o sistema é somente realizada através de encaixes e fixações.

Com base no trabalho desenvolvido propõe-se uma metodologia que visa utilizar critérios de sustentabilidade ambiental através duma análise das fases do ciclo de vida dos edifícios (baseada na norma EN 15978: 2011) [2] e num pressuposto de avaliação “cradle-to-grave”, de modo a comparar dois tipos de soluções construtivas. Esta metodologia será aplicada a um caso de estudo que considera um modelo de 6x6m com uma solução de estrutura em betão e outra solução prefabricada em madeira (STEPS). Através da aplicação ao caso de estudo foi possível concluir acerca do potencial que representa este tipo de sistema construtivo prefabricado em madeira.

References

- [1] European Construction Sector Observatory. 2017. Analytic Report - Improving the human capital basic.
- [2] Sustainability of construction works - Methodology for the assessment of performance of buildings - Part 1: Environmental Performance.

1017

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA E DA RIGIDEZ AO ROLLING SHEAR EM CORPOS DE PROVA DE CLT CONFECCIONADOS COM DIFERENTES COMBINAÇÕES ESPÉCIE-ADESIVO

Julio Cesar Molina¹; Mileny Suellen Garcia De Souza¹; Carlito Calil Júnior¹; João Vitor Felipe Silva²

¹ Universidade de São Paulo

² Universidade Estadual Paulista

Palabras clave / Palavras-chave:

CLT, Resistência, Rigidez, Rolling shear, Madeiras de reflorestamento

Resumen / Resumo:

A Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC) é um produto industrializado de madeira que vem conquistando o mercado da construção civil brasileira. Sua maior utilização depende do conhecimento de suas propriedades mecânicas de resistência e de rigidez. O efeito de maior interesse, que governa o dimensionamento do elemento estrutural, é o rolling shear, que ocorre quando as camadas das lamelas centrais de madeira que formam o elemento “rolam” devido aos esforços de cisalhamento no caso da flexão, ou seja, quando o painel está sujeito a cargas fora do seu plano. Este trabalho fez um estudo da resistência e da rigidez ao rolling shear a partir da utilização de elementos de MLCC confeccionados com 4 espécies de madeiras brasileiras e adesivo poliuretano bicomponente. Os ensaios foram realizados em dois modelos de corpos de prova de cisalhamento (vertical e inclinado) retirados de painéis MLCC. Os resultados mostraram que não existiram grandes diferenças entre os valores de resistência ao rolling shear (f_{vt}) dos corpos de prova das quatro espécies de madeira, sendo as maiores diferenças observadas para o parâmetro rigidez (G_{vt}). Os resultados de resistência ao rolling shear variaram de 2,15 MPa a 4,00 MPa e os resultados de rigidez (G_{vt}) de 80,0 MPa a 270 MPa. Esses valores superaram as recomendações normativas para o efeito rolling shear, que preveem 1,1 MPa para a resistência e 50 MPa para a rigidez, quando testes experimentais não estão disponíveis.

1. Introdução

Os painéis de Madeira Lamelada Colada Cruzada (sigla MLCC), também conhecidos no meio técnico pela sigla CLT (em inglês *Cross Laminated Timber*), são elementos de alta resistência e rigidez, confeccionados em forma de painéis, fabricados em camadas (usualmente em números ímpares: 3, 5 ou 7), sendo cada camada composta por lamelas adjacentes com alternância de 90°. Os painéis de MLCC têm comprimentos entre 3 m e 18 m e espessuras variando de 57 mm a 400 mm, limites estes impostos de acordo com o fabricante. Na fabricação desses painéis, é comum a utilização de camadas centrais de madeiras orientadas na menor dimensão do elemento [7]. Essas camadas contribuem menos para as propriedades mecânicas nas placas de MLCC quando comparadas às camadas orientadas na direção principal [4]. Quando o painel de CLT é submetido a um carregamento fora do plano observa-se a ocorrência de ruptura nas camadas transversais por cisalhamento, efeito este

conhecido por *rolling shear* que provoca deformações através de esforços cisalhantes [6]. Assim, é importante o conhecimento das propriedades relativas ao *rolling shear* por se tratar de um potencial mecanismo de falha para esses elementos, principalmente quando esses apresentam vãos curtos e estão sujeitos solicitações fora do plano, como ocorre nos ensaios de flexão [4]. Os procedimentos para a determinação da resistência (f_{vt}) e da rigidez (G_{vt}) ao *rolling shear* são padronizados pela ABNT NBR 7190-7:2022 [1], recentemente publicada no Brasil. Além disso, encontram-se na literatura diversos modelos de corpos de prova para a determinação desses parâmetros. A norma europeia BS EN 16351: 2015 [2], e a atual norma brasileira ABNT NBR 7190-7:2022 [1], recomendam de um ensaio alternativo para determinação das propriedades de resistência (f_{vt}) e rigidez (G_{vt}), utilizando um corpo de prova vertical cuja geometria é determinada bom base em uma inclinação de 14° , mas não incluem procedimentos para testar amostras inclinadas de corpos de prova como se observam alguns ensaios na literatura. Vale mencionar que a norma BS EN 408: 2012 [3], serviu de base para o projeto de revisão da ABNT NBR 7190-7:2022 [1]. O procedimento que considera o corpo de prova vertical tem sido utilizado por alguns autores para determinar as propriedades ao *rolling shear* devido a facilidade na preparação dos copos de prova e de ensaio. Devido a importância destas propriedades para o dimensionamento destes elementos, a norma europeia BS EN 16351: 2015 [2], na ausência de recomendações experimentais mais precisas, estabelece que a resistência característica ao *rolling shear* (f_{vt}) para painéis MLCC, feitos de madeira macia, com uma relação largura-profundidade mínima de 4 e sem colagem lateral das lamelas, deve ser de 1,1 MPa, e de 0,7 MPa para outras configurações. Além disso, a *European Technical Assessment* ETA-06/0138:2017 [5], assume que a resistência ao *rolling shear* pode ser estimada em 50 MPa. Diante disso, o presente trabalho teve o objetivo determinar e comparar experimentalmente as propriedades de resistência e de rigidez ao *rolling shear* e, dois diferentes modelos de corpos de prova de CLT confeccionados com utilização de quatro diferentes espécies de madeiras de reflorestamento brasileiras.

2. Materiais e métodos

A realização dos ensaios de cisalhamento dos corpos de prova foi realizada no Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo

2.1. Materiais

Os corpos de prova de MLCC foram produzidos com quatro diferentes espécies de madeira: *Pinus elliottii* ($\rho_{12\%} = 383 \text{ kg/m}^3$), *Eucalyptus grandis* ($\rho_{12\%} = 415 \text{ kg/m}^3$), Cedro indiano ($\rho_{12\%} = 393 \text{ kg/m}^3$) e Cedro australiano ($\rho_{12\%} = 292 \text{ kg/m}^3$). As dimensões dos corpos de prova verticais foram definidas como base nos valores mínimos estabelecidos pela norma brasileira [1] e os corpos de prova inclinados com base no trabalho [7]. Os corpos de prova verticais apresentavam dimensões 301 mm x 110 mm x 75 mm (Figura 1a), sendo considerado o ângulo de 14° entre vértices opostos, sendo o mesmo ângulo exigido pela BS EN 408 (2012) em ensaios de rigidez ao cisalhamento. Além disso, os entalhes localizados nas extremidades do corpo de prova (Figura 1b) foram previstos para que fosse possível realizar o ensaio com o corpo de prova inclinado. Os corpos de prova inclinados apresentavam dimensões: 110 mm de largura, 75 mm de espessura e 120 mm de altura. Ao todo foram experimentalmente avaliados 160 corpos de prova, sendo 20 amostras para cada uma das espécies de madeira e modelo de corpo de prova, conforme estipulado pelas normas [1] e [2]. As

dimensões do corpo de prova estão representadas na Figura 1.

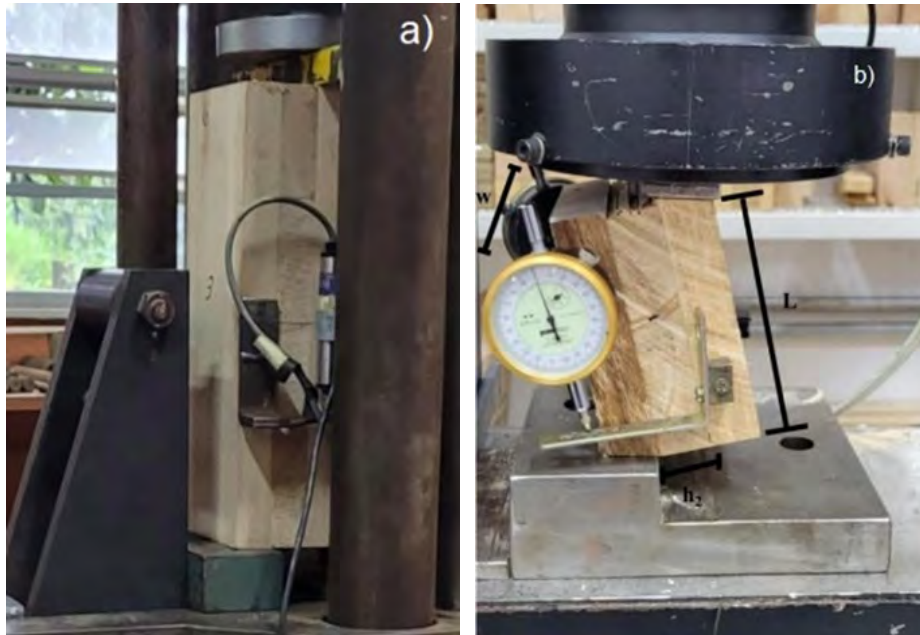


Figura 1. Corpos de prova para os ensaios de cisalhamento

2.2.Métodos

O presente trabalho seguiu as recomendações de ensaio propostas pela norma brasileira [1] para a determinação da resistência (G_v) e da rigidez (f_v) ao rolling shear dos corpos de prova vertical e inclinado. Os corpos de prova verticais foram instrumentados com dois transdutores de deslocamento LVDT e os corpos de prova inclinados com relógios comparadores, sendo as medidas de deslocamentos aferidas nos dois lados opostos do corpo de prova. Além disso, foi posicionado, no local de aplicação do carregamento, uma célula de carga para medidas de força. Para ambos os corpos de prova foi obtida a carga última em corpo de prova gêmeo. Além disso, as Equações (1) e (2) foram utilizadas para o cálculo da resistência e da rigidez ao *rolling shear*, respectivamente.

$$f_{Vt} = \frac{F_{m\acute{a}x} \cdot \cos 14^\circ}{b \cdot c} \quad (1)$$

Onde f_{Vt} = resistência ao *rolling shear*, $F_{m\acute{a}x}$ = máxima força obtida durante o ensaio, b = largura do corpo de prova e c = comprimento do corpo de prova.

$$G_{Vt} = \frac{(F_2 - F_1) \cdot \cos 14^\circ \cdot t_{cam}}{(\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \cdot b \cdot c} \quad (2)$$

Onde G_{Vt} = rigidez ao rolling shear, F_1 e F_2 = forças correspondentes a 10% e 40% da força máxima, ε_1 e ε_2 = deslocamentos correspondentes a 10 % e 40 % da força máxima, t_{cam} = espessura da camada transversal, b = largura do corpo de prova e c = comprimento do corpo de prova.

3. Resultados e discussões

Na Tabela 1, está representado um resumo das propriedades de resistência e rigidez ao rolling shear obtidas no ensaio. Os valores de ambas as espécies superaram as prescrições normativas, indicando sua adequação para o uso em CLT. Além disso, a análise estatística demonstrou que não havia diferença significativa entre as duas espécies, e os coeficientes de variação estavam dentro dos limites relatados em estudos anteriores. Com relação aos valores característicos das resistências, para as espécies de *Pinus taeda* L. e *Eucalyptus grandis* foram encontrados os valores de $f_{Vt} = 1,6$ MPa e $f_{Vt} = 1,5$ MPa, respectivamente. Esses valores também excederam as diretrizes normativas europeias, que permitem 1,1 MPa ou 0,7 MPa em casos especiais quando não há ensaios disponíveis.

Tabela 1. Resumo dos resultados medios encontrados e valores de dispersão

Tipo de madeira	Corpo de prova vertical		Corpo de prova inclinado	
	G_{Vt} (MPa)	f_{Vt} (MPa)	G_{Vt} (MPa)	f_{Vt} (MPa)
<i>Pinus elliottii</i>	80,0 (6,5*) [8,3%**]	2,15 (0,30) [12,1%]	155 (37,0) [23,0%]	2,54 (0,60) [24,1%]
<i>Eucalyptus grandis</i>	120 (7,3) [6,0%]	2,75 (0,30) [11,3%]	270 (35,0) [13,0%]	3,50 (0,40) [11,1%]
<i>Cedro indiano</i>	81 (13,0) [17,0%]	3,00 (0,18) [12,0%]	241 (58,0) [24,0%]	4,00 (0,48) [12,2%]
<i>Cedro australiano</i>	135,0 (117) [87,0%]	2,00 (0,15) [12,1%]	135 (87,0) [117,0%]	3,00 (0,35) [12,1%]

Nota: valores entre parênteses (Desvio padrão*); valores entre colchetes [coeficiente de variação**]

Com relação aos modos de falha, no ensaio alguns corpos de prova falharam abruptamente apresentando grandes trincas, outros apesar de rompidos quando retirados o carregamento as fissuras ficaram quase imperceptíveis a olho nu. As formas como ocorreram as rupturas apresentaram-se muito semelhantes. Pode-se notar um padrão de ruptura conforme mostrado na Figura 2, em que as rupturas se apresentam no mesmo padrão. Uma explicação para os modos de ruptura é que os esforços de compressão aplicados as lamelas externas, orientadas na direção longitudinal, geram nas lamelas internas, orientadas na direção transversal, esforços de tração perpendiculares as fibras. Portanto, o modo de falha mais crítico foi a ruptura por tração perpendicular as fibras e não o cisalhamento como se esperava.



Figura 2. Formas de ruptura encontradas nos corpos de prova durante os ensaios

4. Conclusões

As madeiras de maior densidade (cedro indiano e Eucalipto grandis) apresentaram maiores valores de G_{vt} e f_{vt} para os corpos de prova inclinados e não existiram diferença estatísticas significativas entre as espécies de madeira. Os valores de G_{vt} mais próximos daqueles observados na literatura foram obtidos pelo modelo de corpo de prova de cisalhamento inclinado, enquanto para os resultados de f_{vt} , os dois modelos de corpo de prova geraram valores semelhantes em termos de ordem de grandeza. Os modos de falha obtidos nos ensaios rolling shear foram semelhantes entre si, mas dependentes do tipo de madeira, e ocorreram predominantemente por tração perpendicular as fibras das madeiras. O modelo de corpo de prova inclinado possibilitou com maior facilidade de ensaio para a obtenção da ruptura por rolling shear, efeito este mais pronunciado em elementos MLCC.

Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP – Processo numero 2020/00555–6

References

- [1] Brazilian standard (2022) NBR 7190-7. Projeto de estruturas de madeira Parte 7 – Métodos de ensaio para caracterização de madeira lamelada colada cruzada estrutural. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro, Brasil.
- [2] European standard (2010) BS EN 16351:2015 - Timber structures - Cross laminated timber – Requirements. British standards institution (BS), Brussels, Belgium.
- [3] European standard (2012) BS EN 408 - Timber structures. Structural timber and glued laminated timber- Determination of some physical and mechanical properties. British standards institution (BS), Brussels, Belgium.
- [4] Cao, Y.; Street, J.; Li, M.; Lim, H. (2019) Evaluation of the effect of knots on rolling shear strength of cross laminated timber (CLT). Construction and Building Materials, Elsevier, v. 222, p. 579–587.
- [5] European Technical Approval (2017) ETA 06/01 38 – KLH MassivHolzplatten. European Organisation for Technical Approvals. Viena, AT, Pp.14.
- [6] Wang, T.; Yang, Y.; Li, Y.; Wang, Z.; Gong, Y.; Zhou, J.; Gong, M. (2022) Rolling shear failure damage evolution process of CLT based on AE technology and DIC method. European Journal of Wood and Wood Products. Germany.
- [7] Silva, J. V. F.; Pereira, M. C. M.; Silva, M. F. F.; Molina, J. C (2023) Experimental and numerical analysis of specimen configurations for Cross Laminated timber on rolling shear stiffness and strength response. Engineering Structures, Elsevier, v. 284, p. 1–17.

1018

AVALIAÇÃO DE DURABILIDADE EM PAINÉIS DE VEDAÇÃO EXTERNOS PRÉ-FABRICADOS COM MADEIRA DE PLANTIOS FLORESTAIS

Eduardo Jodar¹; Laura Scrideli¹; Akemi Ino¹

¹ Universidade de São Paulo

Palabras clave / Palavras-chave:

Painéis pré-fabricados de madeira, Revestimento externo, Desempenho, Avaliação de pós-ocupação

Resumen / Resumo:

O uso de materiais renováveis, tais quais a madeira, passaram a desempenhar um papel imprescindível frente aos desafios da crise ambiental global. Porém, a aplicação de materiais madeireiros ainda é limitada no Brasil, e seu desempenho ao longo prazo ainda é pouco estudado. Este artigo apresenta os resultados de uma Avaliação Pós-Ocupação – em média, com mais de 20 anos de uso – do revestimento externo dos painéis de vedação de madeira de florestas plantadas, aplicados em cinco estudos de caso, no estado de São Paulo. Inicialmente foram diagnosticados aspectos relacionados à durabilidade de cada painel, realizando levantamento in loco com uma ficha de avaliação para coletar informações relativas a características da madeira, detalhes construtivos do sistema de vedação, estado de conservação e os defeitos observados nos painéis. Posteriormente, com os resultados individuais desta etapa passou-se para a etapa de análise comparativa, o que possibilitou verificar como o desenho dos painéis, os detalhes de fixação, a execução, o uso e a manutenção de painéis pré-fabricados de madeira, como vedação externa, afetam a sua durabilidade. Finalmente, esses dados foram convertidos em diagnósticos com o objetivo de contribuir na otimização, melhoria e desenvolvimento de futuros projetos e sistemas construtivos similares. Este artigo pretende contribuir para a fundamentação científica da arquitetura em madeira e apoiar a otimização do processo de tomada de decisão para projetos de madeira.

1. Introdução

A construção civil tem como característica o grave impacto ambiental que ela promove, principalmente devido à extração de matérias primas não renováveis, bem como seus processos industriais de alto consumo energético [1]. Nesse contexto, vê-se a necessidade de que os atores envolvidos na construção civil proponham e investiguem formas de mitigar o impacto desse setor. Em vista disso, a madeira de plantios florestais, enquanto material construtivo, pode ter uma importante contribuição na redução desse impacto negativo, pois apresenta baixos níveis de: energia incorporada; emissão

de CO₂; poluição direta do ar e da água; e na geração de resíduos sólidos é 75% menores, quando comparados com o aço e 90% menores, se comparados ao concreto [2]. Além disso, dentre os diferentes sistemas pelos quais a madeira pode ser inserida como alternativa construtiva, os processos que envolvem a pré-fabricação de componentes apresentam vantagens consideráveis, visto que o planejamento detalhado e a sistematização de etapas produtivas viabilizam a redução no consumo energético, dentre outras características vantajosas [3].

Partindo do entendimento de que a pré-fabricação de sistemas construtivos com madeira se apresenta como uma alternativa viável, conforme defende Ghellere [3] o presente artigo pretende apresentar os resultados de uma análise da avaliação do desempenho, com foco na durabilidade. Foram estudados cinco painéis pré-fabricados em madeira de plantios florestais desenvolvidos para cinco edifícios projetados pelo Grupo Habis (Grupo de Habitação e Sustentabilidade) do Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (IAU-USP), são eles: Casa do Horto (1996), Sede do Parque dos Mananciais (1998), Unidade 001 - Nomads (1999), Unidade 002 - HABIS (1998) e Sede Imaflora (2001). Esses edifícios, todos localizados no estado de São Paulo, no Brasil, foram estudados após, em média, 20 anos de uso.

2. Desenvolvimento

2.1.Método

A pesquisa tem caráter qualitativo e cinco estratégias foram empregadas para dar suporte à Avaliação Pós-Ocupação (APO), sendo elas: Revisão Bibliográfica, Planejamento da Análise, Levantamento de Campo, Análise Individual e Estudo Comparativo. Cada etapa se baseia na precedente, dessa forma, cada painel tem seu desempenho analisado individualmente, e posteriormente realizada uma análise comparativa dos resultados obtidos dos 5 edifícios e uma síntese final do diagnóstico como conclusão da pesquisa.

A revisão bibliográfica foi realizada ao longo de todo o desenvolvimento do trabalho, visando a coleta do material necessário para a análise do painel e a definição dos critérios de avaliação. Para o planejamento do diagnóstico de desempenho e durabilidade, foi elaborada uma Ficha de Avaliação, que teve como premissa a metodologia desenvolvida por Arakaki [4], a qual se baseia na identificação de defeito e a descrição do estado de conservação dos painéis em visita de campo. A ficha de avaliação lista e classifica a frequência e a gravidade de defeitos pré-estabelecidos, são eles: 1) partes apodrecidas; 2) destacamentos; 3) presença de nós; 4) rachaduras e/ou partes quebradas; 5) frestas e defeitos na pingadeira. Os dados colhidos em visitas de campo foram tabulados em planilhas que deram suporte ao diagnóstico de desempenho individual do painel.

Finalmente, esse diagnóstico foi submetido a um estudo comparativo, considerando dados qualitativos e quantitativos junto aos outros diagnósticos. Essa última etapa foi organizada em cinco partes, sendo a primeira parte a comparação de defeitos por fachada (norte, sul, leste e oeste) e, seguida por uma análise em números totais de tais defeitos. A apresentação de cada uma das partes desse estudo é feita por meio de um quadro que sintetiza características relevantes sobre a fachada a ser analisada em cada edificação. Em seguida, para cada um dos defeitos considerados na análise individual, são apresentados uma tabela e um gráfico que relacionam os números totais e os percentuais de peças comprometidas pelo defeito em questão. A discussão da incidência do defeito em cada fachada, por sua vez, contempla: leitura dos dados; possíveis causas do defeito e conclusão parcial. Na quinta e

última parte do estudo comparativo, é apresentada uma conclusão geral sobre o comportamento de cada defeito avaliado de cada fachada em cada edifício.

2.2.Resultados

Apresenta-se, a seguir, a comparação e a análise geral sobre cada defeito analisado nos painéis, com enfoque nos dois defeitos mais relevantes do ponto de vista da madeira: partes apodrecidas (Tabela 1) e rachaduras (Tabela 2). Como explicado anteriormente, essa etapa se baseou na produção e na análise de tabelas e gráficos com os valores coletados durante a pesquisa de campo.

Para o defeito **“Partes apodrecidas”**, averiguou-se que, como todo material orgânico, a madeira está sujeita à decomposição por ação da água e de xilófagos em geral, e o conhecimento sobre o comportamento de cada espécie é fundamental para a defesa contra a decomposição precoce e o prolongamento indefinido da matéria-prima. Por isso, conforme observado no projeto e na análise do edifício sede do Imaflora por exemplo, estruturas bem protegidas, com ótimo detalhamento de projeto nas interfaces entre painéis e esquadrias/pingadeiras, e com boa execução da construção, são as melhores opções preventivas e de longa duração recomendadas. Mais especificamente, para evitar o apodrecimento de peças de revestimento na fachada, é ideal que o edifício esteja elevado do chão, afastando assim seus painéis da umidade do solo e dos respingos de água da chuva. Danos na cobertura e outros subsistemas dos edifícios de madeira precisam ser reparados com urgência, de modo a evitar que outros elementos, como a vedação vertical, fiquem vulneráveis às intempéries.

Tabela 1 - Partes apodrecidas totais de cada edifício

DEFEITO D1: PARTES APODRECIDAS TOTAIS						
Edifício	Total de peças avaliadas	Quantidade de peças afetadas		Quantidade de peças a substituir		Peças afetadas a substituir
IMAFLOA	143	0	0,0%	0	0,0%	0,0%
002 - HABIS	256	209	81,6%	196	76,6%	93,8%
001 - NOMADS	309	3	1,0%	3	1,0%	100,0%
MANANCIAIS	206	23	11,2%	7	3,4%	30,4%
HORTO	163	7	4,3%	6	3,7%	85,7%

Em relação ao defeito **“Rachaduras e/ou Partes Quebradas”**, chegou-se à conclusão de que o conhecimento sobre o comportamento de cada espécie é fundamental para a proteção das tábuas contra quebras e rachaduras durante a execução e a manutenção dos painéis. Isto, visto que existem espécies de madeira, tal como o *Eucalyptus* sp., que são menos suscetíveis a rachaduras decorrentes da aplicação de pregos – além de que o emprego desses elementos de fixação em menor espessura evita o aparecimento de rachaduras no revestimento dos painéis.

Tabela 2 - Rachaduras e/ou partes quebradas totais de cada edifício

DEFEITO D1: RACHADURAS E/OU PARTES QUEBRADAS TOTAIS						
Edifício	Total de peças avaliadas	Quantidade de peças afetadas		Quantidade de peças a substituir		Peças afetadas a substituir
IMAFLOA	143	33	23,1%	0	0,0%	0,0%
002 - HABIS	256	167	65,2%	109	42,6%	65,3%
001 - NOMADS	309	148	47,9%	42	13,6%	28,4%
MANANCIAIS	206	8	3,9%	0	0,0%	0,0%
HORTO	163	99	60,7%	18	11,0%	18,2%

Com a análise do defeito “**Destacamentos**”, foi possível concluir que o tipo de encaixe utilizado entre as peças é importante para evitar o destacamento destas e, ainda, é importante se atentar também ao tipo de preenchimento utilizado na construção do painel, pois ele afeta diretamente as camadas precedentes e subsequentes das peças, comprometendo todo o seu sistema.

Já ao verificar o defeito **“Presença de Nós”**, verificou-se que a sua existência nas peças não representa necessariamente um problema e, sim, apenas uma característica da espécie de madeira utilizada. Porém, quando exposto a condições ambientais de maior agressividade, como alto índice de umidade e insolação, o nó tem propensão a comprometer a peça – como é o caso da fachada oeste dos edifícios estudados. Dessa maneira, é necessário estar atento para a seleção das tábuas na execução do edifício, visto que o cuidado na separação dessas é fundamental e relevante, especialmente quando empregadas em situações de maior solicitação.

Por fim, no defeito “**Frestas**”, percebeu-se que o seu aparecimento pode estar ligado ao contato do painel de vedação com a estrutura do edifício, uma vez que neste momento temos uma diferença no comportamento dos componentes, fazendo com que o sistema de vedação sofra com esta desigualdade e favorecendo o surgimento de frestas nas extremidades das peças.

É válido ressaltar que o item “**Defeitos na pingadeira**”, presente na avaliação individual de cada painel, não foi considerado no estudo comparativo dos desempenhos. Isso porque, em razão da diversidade entre os tipos, funções e localizações das pingadeiras nos cinco edifícios estudados, cada análise adotou abordagens diferentes ao registrar o impacto deste item sobre o desempenho do painel. Dessa forma, uma comparação baseada em dados quantitativos levaria a conclusões incongruentes com o real desempenho das soluções de pingadeira presentes nos edifícios.

Em síntese, a análise dos resultados demonstrou a enorme influência exercida pelas técnicas construtivas adotadas sobre a durabilidade dos painéis de madeira. Também, se mostraram preponderantes na determinação do desempenho: a espécie de madeira utilizada; o tipo de tratamento, tanto impregnante quanto superficial, recebido pelas peças expostas; a rotina de manutenção do edifício; a orientação solar da fachada na qual estão posicionadas; a presença e as características de beirais; o nível de umidade do exterior do edifício; e, principalmente, o correto desenho de projeto.

3. Conclusões

Tendo em vista o atual cenário da construção civil, caracterizado por cadeias produtivas de alto impacto ambiental, o presente artigo contribui com a expansão do arcabouço científico acerca do desempenho de construções em madeira. A análise dos resultados demonstrou a enorme influência exercida no cuidado de detalhes construtivos adotados sobre a durabilidade dos painéis de madeira e, também, se tornaram preponderantes na determinação do desempenho: a espécie da madeira, o tipo de tratamento, a rotina de manutenção do edifício, a orientação solar da fachada e a presença ou ausência de beirais. Tais diagnósticos apontam na direção de que o conhecimento e o emprego de boas práticas de projeto, construção e manutenção podem fazer com que a durabilidade não seja um empecilho para a inserção de sistemas construtivos baseados em cadeias de menor impacto ambiental, em especial de madeira de plantios florestais.

Referências

- [1] United Nations Environmental Programme (2020). Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient. Buildings and Construction Sector. Nairobi.
- [2] Canadian Wood Council (1999). Life Cycle Analysis for Residential Buildings. In Wood: the Renewable Resource, n. 05, 1999.
- [3] Ghellere, F. B. (2018). Painel de vedação vertical pré-fabricado em madeira. Dissertação (Mestrado). Instituto de Arquitetura e Urbanismo. Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, Brasil..
- [4] Arakaki, E. M., & Ino, A. (2000). Avaliação de durabilidade em sistema construtivo pré-fabricado com madeira de rejeito comercial: Estudo de caso: conjunto habitacional Pedra 90. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo.

1022

BLUEWOODENHOUSE - CASA MODULAR EM MADEIRA GRID-OFF E DE BAIXO CONSUMO DE ÁGUA

Nuno Ferreira¹; Jorge M. Martins²; Nuno Vale³; Ricardo M. S. F. Almeida²; Ana S. Guimarães⁴; João M. P. Q. Delgado⁴; Adélio M. Mendes⁵; Luisa Hora De Carvalho²

¹ Associação Rede de Competência em Polímeros

² Instituto Politécnico de Viseu

³ Kozowood

⁴ CONSTRUCT, Faculty of Engineering, University of Porto

⁵ LEPAE, Faculty of Engineering, University of Porto

Palabras clave / Palavras-chave:

Construção modular, Casas em madeira, Eficiência energética, Conforto térmico

Resumen / Resumo:

Apesar de não ser um conceito novo, a construção modular tem sido alvo de crescente interesse e investimento nos últimos anos. A construção modular em madeira tem vantagens económicas e ambientais, pois a madeira é um material natural, renovável, reciclável, com propriedades térmicas relevantes e constitui um sumidouro de carbono, contribuindo para a descarbonização do setor da construção. Considerando a situação ambiental mundial, a escassez dos recursos naturais e o impacto que o sector da construção tem sobre o planeta, o conceito de casa modular “off-the-grid,” inclui vantagens como autossuficiência energética, a utilização de fontes de energia renovável, a redução do consumo de água, minimizando o desperdício e maximizando o uso, a utilização de sistemas de captação e de reutilização da água e a utilização de materiais eco eficientes e de origem renovável. As casas modulares oferecem uma maior flexibilidade no *design* e no *layout*, podendo ser personalizadas conforme as necessidades do utilizador, mantendo um espaço funcional e acolhedor, contribuindo para a redução da pegada de carbono e contribuindo para a conservação dos recursos naturais, reduzindo o impacto ambiental [1,2].

O projeto BlueWoodenHouse visou o desenvolvimento, construção e avaliação da primeira casa modular em madeira energeticamente autónoma e esteticamente adequada, sem ligação à rede elétrica e à rede de gás, e com um TCO (*Total Cost of Ownership*) inferior às casas convencionais equivalentes. Para que isto fosse possível, a equipa proponente concebeu um conjunto eficaz de soluções passivas e ativas que materializou, caracterizou, otimizou e validou, desenvolvendo simultaneamente as ferramentas que tornarão a casa autónoma uma prática corrente e desejada em Portugal e no mundo. A nova casa foi ainda projetada para ter uma utilização eficiente dos recursos hídricos (esquema na Figura 1).

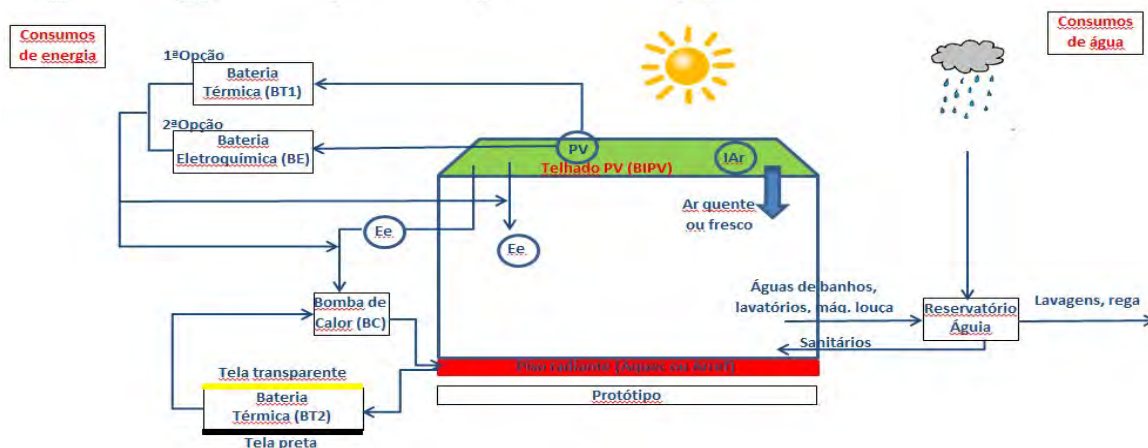


Figura 1. Esquema do circuito de energia da casa protótipo a construir.

O projeto BlueWoodenHouse caracterizou/monitorizou uma casa de referência já construída pela empresa líder do consórcio, posteriormente a 2015, com cerca de 150 m² e habitada por uma família de 4 pessoas. A avaliação da casa autónoma construída, no decorrer do projeto – casa protótipo – foi assim avaliada contra os dados recolhidos da “casa de referência”; a casa protótipo foi construída na mesma região que a casa de referência [3]. A casa protótipo respeita a legislação das casas com consumo energético quase nulo – NZEB – *Nearly Zero Energy Building*, e pretendeu ir muitíssimo além deste objetivo. O projeto BlueWoodenHouse desenvolveu ferramentas numéricas de simulação que permitirão o projeto de uma casa com uma probabilidade definida de nunca ter um consumo nominal superior à produção horária de energia. Esta nova ferramenta tira partido da média e variância dos dados climáticos nos últimos 10 ou mais anos.

Em concreto, a Casa Protótipo foi projetada, para ter consumos próximos de 15 kWh/m²/ano, um valor drasticamente inferior aos 40 kWh/m²/ano (obrigatórios a partir de 2021) e bastante longe dos atuais valores de 70-80 kWh/m²/ano (média das construções existentes). Foi realizada uma análise económica detalhada, através da avaliação da contribuição para o conforto térmico e autonomia energética, de cada um dos elementos propostos, bem como a determinação dos seguintes indicadores: 1) fator de mérito económico/funcional; 2) ROI (return of investment); 3) TCO (total cost of ownership); 4) EPBT (energy payback time); 5) EYR (energy yield ratio) e 6) GYR (greenhouse gas yield ratio).

O projeto BlueWoodenHouse foi concluído com um *design* otimizado da nova casa modular em madeira, com a solução NZEB implementada, com a disponibilização de um manual de boas práticas para construção de habitações modulares em madeira NZEB e com um TCO otimizado. Foram ainda disponibilizadas as novas rotinas numéricas necessárias à simulação dos elementos passivos e ativos integrados no protótipo e que não estejam disponíveis da aplicação informática de base usada.



Figura 2. Exterior da Casa Protótipo



Figura 3. Interior da Casa Protótipo

Por fim, o projeto BlueWoodenHouse (Figuras 2 e 3) visou desenvolver soluções integradas de conforto térmico baseadas em soluções passivas e ativas, onde se dará preferência à minimização do TCO, para além de apresentar soluções que permitam a redução dos consumos de água doméstica. Os objetivos gerais do projeto são agregados em 4 grandes blocos:

1. Desenvolvimento e otimização de soluções integradas, passivas e ativas, com o objetivo de construir uma casa autónoma (probabilidade > 95% de numa situação de consumo nominal este horário, este nunca exceder a produção com minimização do TCO;
2. Desenvolvimento e otimização de soluções que permitam a redução em 50 % dos consumos de água, da rede pública;
3. Desenvolvimento de ferramentas e metodologias que permitam projetar casas energeticamente autónomas e com minimização do TCO;
4. Desenvolvimento de uma base de dados que permita minimizar os indicadores de impacto ambiental (indicadores de sustentabilidade).

O projeto BlueWoodenHouse teve como objetivo contribuir para a rápida implementação do PNEC 2030 e da diretiva 2018/844/EU [4,5,6] e demonstrar que a energia não deve ser apenas “verde”, mas “azul”, isto é, “verde”, de baixo custo e com estética. Apenas casas “azuis” atrairão proprietários, investidores e construtores e a mudança para a descarbonização da energia acontecerá de uma forma rápida e natural.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado por: BlueWoodenHouse SI 1&DT – Projeto em co-promoção POCI-01-0247-FEDER-047157) no âmbito do Portugal2020, cofinanciado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), através do Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (COMPETE 2020); UIDB/00511/2020 e UIDP/00511/2020 (LEPABE) e LA/P/0045/2020 (ALiCE) financiados por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC).

Kozowood

References

- [1] Ferdous, W.; Bai, Y.; Ngo, T.D.; Manalo, A.; Mendis, P. (2019) New advancements challenges and opportunities of multi-storey modular buildings—A state-of-the-art review. *Eng. Struct.*, 183: 883–893.
- [2] Stepien, A.; Piotrowski, J.Z.; Munik, S.; Balonis, M.; Kwiatkowska, M.; Krechowicz, M. (2022) Sustainable Construction—Technological Aspects of Ecological Wooden Buildings, *Energies* 15, 8823.
- [3] Delgado, J.M.P.Q.; Almeida, R.M.S.F.; Matos, A.M.; Barreira, E.; Carvalho, L.; Martins, J.; Ferreira, N.; Guimarães, A. (2023) Multi-Performance Characterization of a Modular Wooden House. *Energies* 16, 5795.
- [4] Diretiva Europeia 2018/844/EU, do Parlamento Europeu e do Conselho de 30 de maio de 2018 que altera a Diretiva 2010/31/UE relativa ao desempenho energético dos edifícios e a Diretiva 2012/27/UE sobre a eficiência energética, *Jornal Oficial da União Europeia*, 2018.
- [5] PNEC 2030, Plano Nacional Energia e Clima 2021-2030, Portugal, dezembro de 2019.
- [6] Diretiva Europeia 2010/31/EU do Parlamento Europeu e do Conselho de 19 de Maio de 2010 relativa ao desempenho energético dos edifícios (reformulação), *Jornal Oficial da União Europeia*, 2010.

1023

CALIBRACION DEL MODELO NUMERICO DE UN EDIFICIO CLT DE 5 PISOS CONSIDERANDO MEDICIONES DE SUS PROPIEDADES DINAMICAS LATERALES

Alexander Opazo Vega¹; Alan Jara Cisterna¹; Franco Benedetti Leonelli¹; Víctor Rosales Garcés¹

¹ Universidad del Bío-Bío

Palabras clave / Palavras-chave:

Análisis de sensibilidad, Madera masiva, Modelos de elementos finitos, Propiedades mecánicas ortotrópicas

Resumen / Resumo:

La modelación numérica de edificios de madera contralaminada (CLT) es un proceso desafiante, ya que requiere el conocimiento de las propiedades mecánicas ortotrópicas de los paneles CLT, de las rigideces de las distintas conexiones del sistema constructivo, y de las masas involucradas. Estas propiedades no siempre se conocen con certeza, por lo que es común generar simplificaciones en los modelos numéricos que deben ser validadas experimentalmente. El presente trabajo tiene por objetivo mostrar los resultados de la calibración del modelo numérico de un edificio CLT de 5 pisos, basada en la minimización de las diferencias entre las propiedades dinámicas laterales entregadas por el modelo y las propiedades dinámicas medidas experimentalmente. Para lograr lo anterior, se implementó una metodología de calibración que combinaba mediciones de vibraciones ambientales en el edificio, modelos de elementos finitos, análisis de sensibilidad global, y métodos de optimización no lineal. A partir de la aplicación de la metodología, se obtuvieron un set de parámetros óptimos del modelo que minimizaron las diferencias entre las frecuencias de vibración lateral medidas versus las simuladas, con errores menores a un 5% en promedio. Para el caso en estudio, los parámetros más influyentes del modelo fueron los módulos de elasticidad en el eje fuerte de los paneles de muro, los módulos de corte en el plano de muros, y la rigideces antideslizamiento entre los muros y las losas CLT. Con estos resultados se espera aportar a la nueva normativa de diseño estructural de edificios CLT que se está desarrollando en Chile.

1. Introducción

En los últimos años se ha intensificado la investigación asociada a la calibración de modelos numéricos de edificios existentes estructurados con paneles de madera contralaminada (CLT), considerando la medición de sus propiedades dinámicas laterales [1]. Lo anterior es debido a que la modelación de edificios CLT es un proceso desafiante, que requiere de la estimación de una serie de parámetros, tales como las propiedades ortotrópicas de los paneles CLT y las rigideces de sus diferentes conexiones, las cuales no siempre se conocen con exactitud [2]. Esta problemática se incrementa cuando los edificios CLT tienen ciertas exigencias arquitectónicas que generan irregularidades estructurales

en sus elevaciones. Por lo tanto, en estos contextos, es necesario calibrar los modelos numéricos de edificios CLT existentes, considerando la medición in situ de sus propiedades dinámicas laterales. El presente trabajo tiene por objetivo mostrar los resultados del proceso de calibración del modelo numérico de un edificio CLT de 5 pisos que tiene una distribución irregular de aberturas en sus muros y la combinación de dos sistemas constructivos (plataforma y balloon). Para lograr lo anterior, se plantea una metodología que combina técnicas de análisis modal operacional, simulaciones numéricas de elementos finitos, análisis de sensibilidad global y algoritmos de optimización no lineal. Con los resultados del trabajo se espera contribuir a las nuevas normativas de diseño estructural de edificios CLT que se están desarrollando en Chile.

2. Materiales y métodos

2.1.Descripción del edificio analizado

El edificio estudiado corresponde a una torre experimental de 5 pisos de altura construida íntegramente de paneles CLT. La estructura posee una planta rectangular de 6.6 m x 4.2 m, y una altura total de 14.5 m. La Figura 1 muestra imágenes del edificio, donde se pueden apreciar la distribución irregular de las aberturas en sus muros. Además, desde el punto de vista constructivo, el edificio combina el sistema plataforma, para los primeros tres niveles, con el sistema balloon en los dos pisos superiores. Los muros de los tres primeros pisos y todas las losas corresponden a placas de CLT de pino radiata de 5 capas (165 mm de espesor), mientras que para el sistema balloon se consideran muros de 3 capas (100 mm de espesor). Las conexiones entre paneles fueron ejecutadas con herrajes metálicos tipo hold-down y angle-brackets, más una serie de clavos anulares y tornillos autoperforantes. Mas detalles constructivos del edificio se pueden encontrar en [3] y [4].

2.2.Medición de propiedades dinámicas

La medición de las propiedades dinámicas se realizó mediante ensayos de vibraciones ambientales. Para medir la respuesta dinámica se distribuyeron 10 acelerómetros de sensibilidad sísmica en los 5 pisos del edificio. Con esta configuración se lograron identificar 5 sets de propiedades modales laterales, con la ayuda del software ARTeMIS Modal Pro [5]. Mas detalles de la configuración experimental se pueden encontrar en [4].

2.3.Metodología de calibración del modelo

2.3.1. Descripción del modelo numérico

El modelo numérico se implementó en el software de elementos finitos ETABS. Todos los paneles CLT se modelaron con elementos Shell-thick cuadriláteros de 4 nodos, con propiedades de materiales ortotropas. Por otra parte, dado que el modelo buscaba ser calibrado con respecto a mediciones de vibraciones ambientales de baja intensidad, algunas conexiones entre paneles se modelaron de forma rígida y otras de forma flexible, con elementos del tipo two-joint-link. Por ejemplo, como es esperable que no se activen de forma relevante las deformaciones verticales por rocking del edificio, las conexiones del tipo hold-down y las conexiones atornilladas en los bordes verticales de los muros se asumieron rígidas. Sin embargo, las conexiones angle-bracket entre los paneles CLT de muros y paneles CLT de losas inferiores se asumieron flexibles en la dirección horizontal. En la Figura 1 se muestra el modelo numérico.

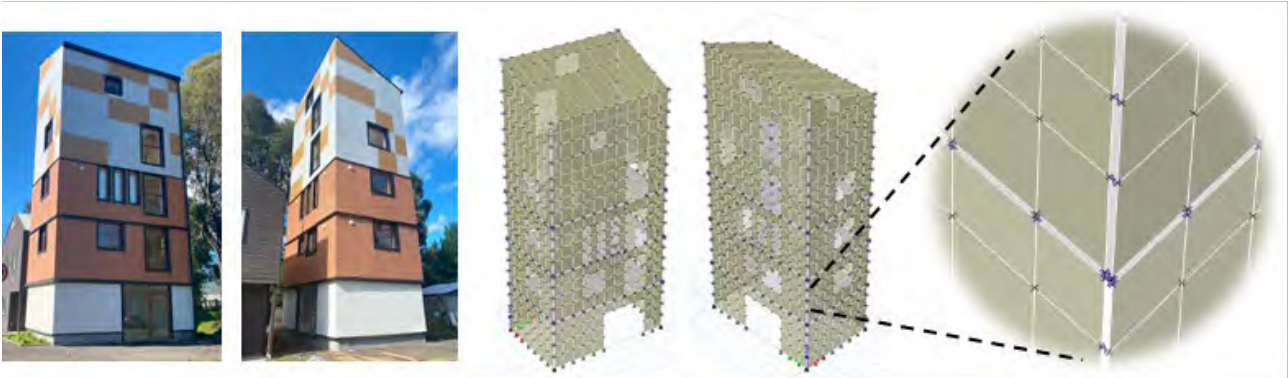


Figura 1. Vistas del edificio CLT y su respectivo modelo numérico

2.3.2. Análisis de sensibilidad y calibración determinística

Algunos parámetros de entrada del modelo, como la geometría y la masa, se conocían con bastante certeza, por lo tanto, se asumieron como valores constantes. Sin embargo, el valor de las propiedades elásticas ortotropicas de los paneles CLT (de 5 y 3 capas) y las rigideces al corte de los conectores angle-bracket no se conocían con exactitud. En consecuencia, se definieron 13 variables independientes a estudiar en el modelo, tal como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros de entrada relevantes del modelo (variables independientes)

Rango	Para panel CLT de 5 capas						Para panel CLT de 3 capas						Conexión
	E_{11_5} (MPa)	E_{22_5} (MPa)	E_{33_5} (MPa)	G_{12_5} (MPa)	G_{13_5} (MPa)	G_{23_5} (MPa)	E_{11_3} (MPa)	E_{22_3} (MPa)	E_{33_3} (MPa)	G_{12_3} (MPa)	G_{13_3} (MPa)	G_{23_3} (MPa)	$K_{AB_{hor}}$ (N/mm)
Min	3818	1230	1230	308	62	44	4576	472	472	308	72	41	1800
Max	8910	2870	2870	720	146	104	10676	1102	1102	720	168	95	4200

Esta cantidad de parámetros puede ser reducida a través de un Análisis de Sensibilidad Global (índices de Sobol) que permita determinar que variables son más influyentes en el error generado por las diferencias entre las propiedades dinámicas simuladas versus las medidas. De esta forma, se definen rangos mínimos y máximos de cada variable y posteriormente se realizan una serie de simulaciones numéricas que consideran distintas combinaciones aleatorias de las 13 variables. Finalmente, las variables más influyentes se utilizan para calibrar el modelo numérico definitivo, a través de un algoritmo de optimización (NL2SOL) que minimiza las diferencias entre las propiedades dinámicas simuladas y las medidas. Para el cálculo de los índices de Sobol y del algoritmo NL2SOL se utilizó la aplicación quoFEM [6].

3. Resultados

3.1. Propiedades dinámicas laterales

Las propiedades dinámicas obtenidas en las mediciones de vibraciones ambientales se muestran en la Figura 2. Mas detalles de esta determinación se pueden revisar en [4]. También en la Figura 2 se muestran algunos modos de vibrar obtenidos en los modelos numéricos.

Figura 2. Propiedades dinámicas medidas y simuladas del edificio

3.2. Analisis de sensibilidad y calibracion del modelo

El análisis de sensibilidad arrojo que de las 13 variables de interés solo 5 eran influyentes en el error entre las propiedades dinámicas simuladas y las medidas. La más influyente fue la rigidez horizontal de los angle-bracket (K_{AB_hor}), seguida por el módulo de corte en el plano de los muros CLT de 5 capas (G_{12_5}), el módulo de elasticidad en el eje fuerte de los muros CLT de 5 capas (E_{11_5}), el módulo de corte en el plano de los muros CLT de 3 capas (G_{12_3}), y el módulo de elasticidad en el eje fuerte de los muros CLT de 3 capas (E_{11_3}). Por otra parte, la calibración determinística de las 5 variables más influyentes arrojo los siguientes valores óptimos: $K_{AB\_hor}=2775$ N/mm, $G_{12\_5}=426$ MPa, $E_{11\_5}=5308$ MPa, $G_{12\_3}=720$ MPa, y $E_{11\_3}=10676$ MPa. Con estos parámetros óptimos se logran las siguientes frecuencias de vibración en el modelo: $f1=3.25$ Hz, $f2=3.66$ Hz, $f4=10.87$ Hz y $f5=12.43$ Hz. Estas frecuencias tienen un 4.4% de error en promedio, con respecto a las medidas experimentalmente, lo cual es un excelente ajuste.

4. Conclusiones

En el presente trabajo se mostraron los resultados de la implementación de una metodología de calibración del modelo numérico de un edificio CLT de 5 pisos que presentaba una serie de irregularidades en elevación. La metodología propuesta combina mediciones de vibraciones ambientales en el edificio, simulaciones de elementos finitos, análisis de sensibilidad global, y métodos de optimización no lineal. A partir de la aplicación de la metodología, se obtuvieron un set de parámetros óptimos del modelo que minimizaron las diferencias entre las frecuencias de vibración lateral medidas versus las simuladas, con errores menores a un 5% en promedio. Para el caso en estudio, los parámetros más influyentes del modelo fueron las rigideces horizontales antideslizamiento de los conectores angle-bracket entre los muros y las losas CLT, seguidos en menor medida por algunas propiedades elásticas ortotropicas de los paneles CLT. Este resultado confirma la importancia de incluir la flexibilidad de algunas conexiones relevantes en los modelos numéricos de edificios CLT, para evitar la ocurrencia de errores mayores en la estimación de las frecuencias. Con estos resultados se espera aportar al desarrollo de la nueva normativa chilena de diseño estructural de edificios CLT.

Agradecimientos

Este trabajo fue apoyado por la Universidad del Bío-Bío a través de los proyectos DICREA 2260525 IF/R e INES I+D 22-18. Los autores también agradecen al proyecto ANID BASAL FB210015 por la

colaboración científica con nuestros departamentos académicos.

Referencias

- [1] Kurent, B.; Brank, B.; Ao, W. K. (2021) Model updating of seven-storey cross-laminated timber building designed on frequency-response- functions-based modal testing. *Structure and Infrastructure Engineering*, 19(2), 178-196.
- [2] Tulebekova, S.; Malo, K.A.; Ronnquist, A. (2023) Dynamic identification and model calibration of connection stiffness in multi-storey cross-laminated timber buildings. *Journal of Building Engineering*. 72:106607.
- [3] Benedetti, F.; Valenzuela, T.; Jara-Cisterna, A.; Opazo-Vega, A.; Rosales, V. (2023). Incremental dynamic analysis of a five storeys CLT building designed through force-based methods. In *Proceedings of the World Conference on Timber Engineering 2023, WCTE 2023*. 19-23 de Junio, Oslo, Noruega.
- [4] Opazo-Vega, A.; Benedetti, F.; Jara-Cisterna, A. (2023) Vibration-Based Monitoring of a 5-Story Cross-Laminated Timber (CLT) Building Prototype. In *Proceedings of the International Conference on Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures*. 30 de Agosto a 1 de Septiembre. Milano, Italia. Pp. 211–221.
- [5] ARTeMIS Modal Pro, Version 7.2.1.6, Structural Vibration Solutions A/S, Aalborg Den-mark, Copyright 1999–2022. Available online: <http://www.svibs.com/index>, last accessed 2022/12/01.
- [6] Deierlein, G.G., McKenna, F., et al. (2020). A Cloud-Enabled Application Framework for Simulating Regional-Scale Impacts of Natural Hazards on the Built Environment. *Frontiers in Built Environment*. 6, 196.

1024

CAPACIDAD A HENDIDO DE VIGAS DE HAYA CARGADAS PERPENDICULARMENTE A LA FIBRA MEDIANTE CONEXIONES CON PASADORES: INFLUENCIA DE LAS PROPIEDADES DE FRACTURA

José Luis Gómez Royuela¹; Almudena Majano Majano¹; Antonio José Lara Bocanegra¹; José Xavier²; Marcelo F.s.f. De Moura³

¹ ETS de Arquitectura, Universidad Politécnica de Madrid (UPM); Departamento de Estructuras y Física de Edificación;

² UNIDEMI, Department of Mechanical and Industrial Engineering, School of Science and Technology, NOVA University Lisbon

³ Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial

Palabras clave / Palavras-chave:

FEA, DCB, ENF, Ley cohesiva, Clavijas, *Fagus sylvatica* L

Resumen / Resumo:

El haya europea (*Fagus Sylvatica* L.) es una de las especies de frondosas de mayor abundancia y utilización en Europa para la elaboración de productos estructurales. Su alta resistencia y rigidez la convierten en una excelente alternativa para el diseño de estructuras de madera con conexiones mecánicas con clavijas, que son soluciones de unión muy habituales pero que pueden provocar fallos frágiles por hendidado cuando los esfuerzos son perpendiculares a la fibra. En este trabajo se analiza numéricamente mediante elementos finitos la influencia de las propiedades de fractura del haya europea en la estimación de la carga de rotura por hendidado de vigas cargadas perpendicularmente a la fibra mediante pasadores. Se utilizan modelos de zona cohesiva implementando leyes con evolución de daño exponencial para reproducir el inicio y la propagación de la fisura, considerando los valores medios y el límite superior e inferior de las propiedades de fractura en modos I y II obtenidas experimentalmente de ensayos DCB y ENF. Las leyes cohesivas del material se determinan aplicando el método directo analizando el campo de desplazamientos en el frente de la fisura mediante técnicas de correlación de imágenes digitales (DIC) 3D. La tasa crítica de energía de fractura es obtenida aplicando el método CBBM, el cual prescinde de la monitorización del crecimiento de la fisura durante el ensayo. Los modelos numéricos incluyendo la variabilidad de las leyes cohesivas del material reproducen el comportamiento experimental a hendidado de las vigas de haya con pasadores para la configuración analizada.

1. Introducción

Las conexiones mecánicas con elementos tipo clavija están siendo ampliamente usadas y demandadas en el ámbito de la construcción con madera. Sin embargo, su comportamiento es complejo y, aunque pueden ser diseñadas para tener un modo de fallo dúctil, hay ciertas situaciones en las que las

conexiones generan tracciones perpendiculares a la fibra que pueden desencadenar en un fallo por hendido de los elementos de madera. Este modo de fallo frágil es uno de los más críticos en estructuras de madera, ya que ocurre de manera repentina y se puede producir incluso con bajos niveles de carga, por lo que merece especial atención en el diseño de conexiones con clavijas.

Una de las maneras más sencillas de abordar la fractura del elemento de madera simulando el inicio y la propagación de las fisuras a través de análisis por elementos finitos (FEA) es aplicando leyes cohesivas a patrones de propagación de fisuras predefinidos geométricamente en el modelo de análisis. Esta metodología fue implementada inicialmente con los modelos de fisura ficticia [1, 2], ahora conocidos como modelos de zona cohesiva (CZM) aplicados por primera vez a madera en [3]. Los análisis por elementos finitos para el estudio del hendido requieren conocer diferentes propiedades del material, especialmente las propiedades de fractura y, por tanto, las leyes cohesivas.

El objetivo principal de este trabajo es analizar numéricamente mediante elementos finitos la influencia de las propiedades de fractura del haya europea en la estimación de la carga de rotura por hendido de vigas cargadas perpendicularmente a la fibra mediante pasadores. Para ello se utilizan modelos de zona cohesiva implementando en ellos las leyes cohesivas del material en modos I y II de fractura obtenidas experimentalmente para reproducir el inicio y la propagación de la fisura. La metodología directa aplicada en la determinación de los parámetros de fractura necesarios para derivar las leyes cohesivas ofrece la ventaja de no requerir la medición del desarrollo de la fisura durante el ensayo, una tarea ardua en un material heterogéneo como es la madera, especialmente si se trata del modo II de fractura. Se realizaron ensayos experimentales de las vigas con conexiones para validar los resultados numéricos.

2. Materiales y métodos

2.1. Material

Se utilizó madera de haya (*Fagus sylvatica* L.) de procedencia europea. Las probetas fueron mecanizadas con orientación según el sistema de propagación tangencial-longitudinal (TL). El material fue acondicionado previamente a la realización de los ensayos a 20 °C y 65% de humedad relativa hasta alcanzar el contenido de humedad de equilibrio. Se utilizaron valores constantes de $E_T=832$ N/mm² y $G_{LT}=706$ N/mm², derivados de trabajos previos de los autores [4].

2.2. Ensayos DCB y ENF

Las leyes cohesivas en modos I y II fueron obtenidas de ensayos tipo DCB (Double Cantilever Beam) y ENF (End Notched Flexure) respectivamente, según los esquemas mostrados en la Figura 1(a) y Figura 1(b). Éstas resultan de la relación entre la tasa de liberación de energía de deformación (G) y los desplazamientos producidos en el frente de la fisura (δ), los cuales fueron monitorizados sincronizadamente durante los ensayos mediante un equipo de mediciones ópticas por correlación de imágenes digitales ARAMIS® 3D. La tasa de energía de fractura crítica (G_c) se deriva de las curvas de resistencia aplicando el método CBBM (Compliance Based Beam Method), el cual está basado en la teoría de vigas y en el concepto de longitud de fisura equivalente (α_{eq}). Este método tiene la ventaja de requerir únicamente la curva carga-desplazamiento ($P-\delta$) experimental evitando la monitorización del crecimiento de la fisura durante el ensayo.

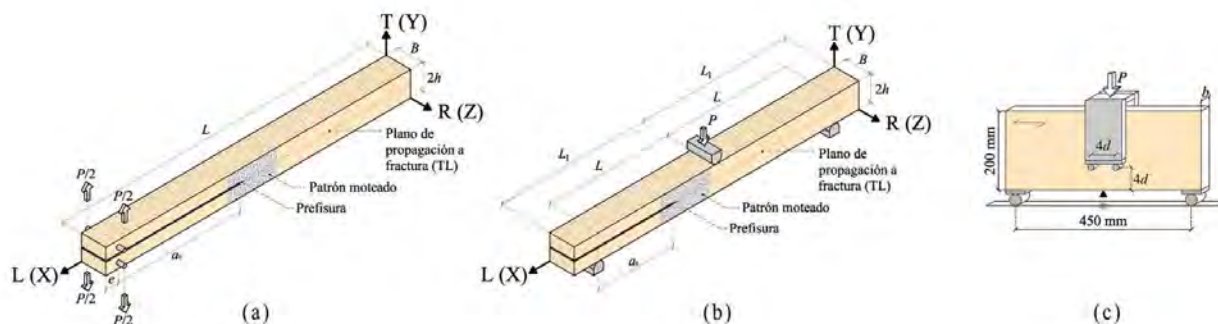


Figura 1. Configuración de los ensayos: DCB (a), ENF (b) y vigas con conexiones (c).

2.3. Ensayos de vigas con conexiones

Se realizaron ensayos de flexión a tres puntos en vigas de haya cargadas perpendicularmente a la fibra por medio de una conexión con dos pasadores de 16 mm de diámetro (d) separados una distancia $4d$ entre sí, y situados a una distancia del borde cargado (h_e) de $4d$, según el esquema mostrado en la Figura 1(c). Durante el ensayo se registraron la carga aplicada y el desplazamiento de la cara inferior de la viga en su punto central.

Así mismo, se llevó a cabo la modelización numérica por elementos finitos en 2D de estos ensayos utilizando CZM en un plano situado a la mitad de la altura de los agujeros para reproducir el crecimiento de la fisura, implementando en ellos las leyes cohesivas numéricas del material en modos I y II definidas con una rama inicial elástica y lineal sin daño hasta alcanzar la tensión máxima, seguida de otra rama con evolución de daño exponencial según las leyes experimentales, considerando tanto la ley cohesiva media como los límites superior e inferior. Estos límites son obtenidos escalando la función de la ley cohesiva media al área correspondiente al límite superior e inferior de G_c sumando o sustrayendo su desviación estándar.

3. Resultados

3.1. Leyes cohesivas

En la Tabla 1 se resumen los valores medios experimentales, desviación estándar (SD) y coeficientes de variación (CoV) de la energía de fractura crítica (G_c), la tensión máxima de inicio del daño (f_v) y el desplazamiento relativo máximo en la punta de la fisura (δ_v) para los modos I y II de fractura, obtenidos de los ensayos DCB y ENF del haya europea. Estos valores conforman las correspondientes leyes cohesivas del material.

Tabla 1. Energía de fractura crítica (G_c), tensión máxima (f_u) y desplazamiento relativo máximo (δ_u) en modos I y II.

	modo I			modo II		
	$G_{I,c}$ (N/mm)	$f_{I,u}$ (N/mm ²)	$\delta_{I,u}$ (mm)	$G_{II,c}$ (N/mm)	$f_{II,u}$ (N/mm ²)	$\delta_{II,u}$ (mm)
Media	0,46	8,74	0,020	1,17	18,88	0,32
SD	0,10	1,97	0,005	0,26	3,34	0,10
CoV (%)	21,3%	22,5%	27,1%	22,1%	17,7%	30,2%

Todas las leyes cohesivas obtenidas experimentalmente (en gris) así como la ley cohesiva media (en rojo) en modos I y II de fractura para el sistema de propagación TL se muestran en la Figura 2.

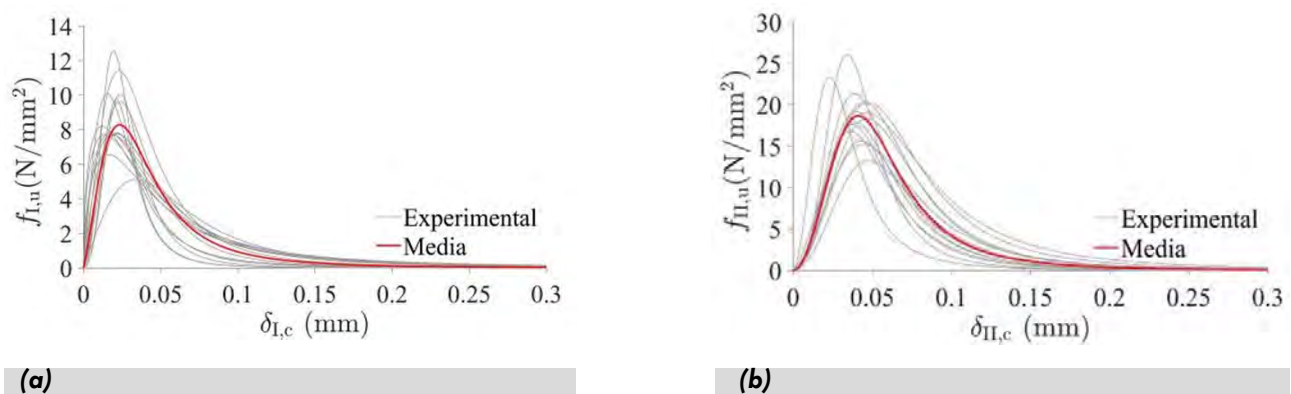


Figura 2. Leyes cohesivas experimentales (gris) y ley cohesiva media (rojo): modo I (a) y modo II (b).

3.2. Validación numérica

En la Figura 3 se muestran las curvas P - δ de las vigas de haya cargadas perpendicularmente a la fibra mediante dos pasadores obtenidas experimentalmente (en gris) y numéricamente, resultantes de la implementación de la ley cohesiva media (rojo), su límite superior (azul) y el límite inferior (verde).

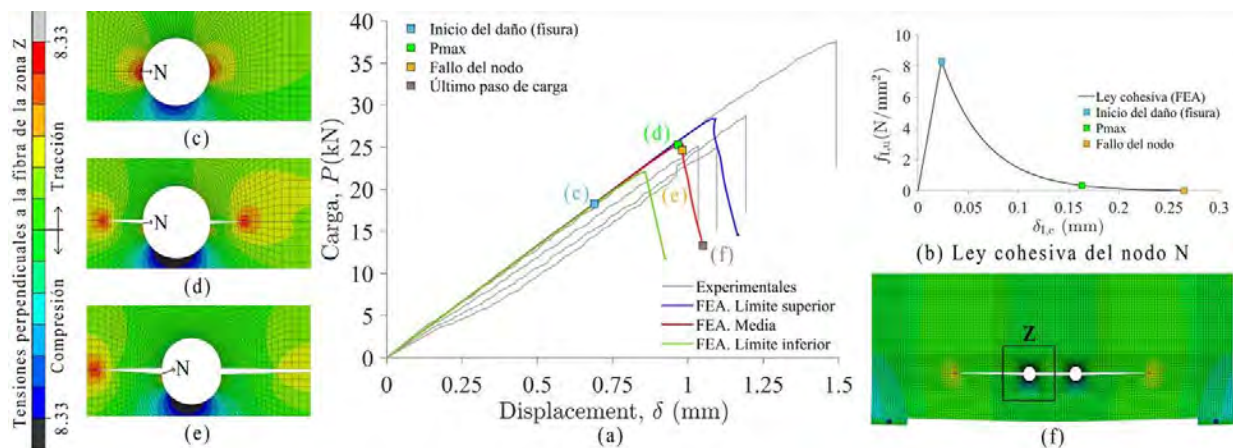


Figura 3. Curvas carga-desplazamiento experimentales y numéricas de la viga con conexión (a). Evolución del daño del primer nodo que falla numéricamente (b), tensiones perpendiculares a la fibra en la zona de interés Z y monitorización de la fisura correspondiente a: inicio del daño (c), carga máxima (d), rotura del primer nodo (e) y último paso de carga registrado (f).

La curva $P-\delta$ numérica obtenida a partir de la ley cohesiva media es consistente con las curvas experimentales. Los análisis numéricos indican que la madera inicia el daño en torno al 73% de la carga de rotura, mostrando una zona en proceso de fisuración. La carga máxima numérica se alcanza antes de la rotura total del primer nodo dañado. Las curvas $P-\delta$ numéricas correspondientes con el límite superior e inferior reproducen la variabilidad de la madera.

4. Conclusiones

Los modelos de elementos finitos con zona cohesiva, considerando la variabilidad de las leyes cohesivas del material con evolución de daño exponencial, reproducen el comportamiento experimental de las vigas de haya cargadas perpendicularmente a la fibra con dos pasadores para la configuración estudiada.

Agradecimientos

La metodología numérica de este trabajo es parte del proyecto de I+D+i PID2020-112954RA-I00, financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033.

Referencias

- [1] Hillerborg, A.; Modéer, M.; Petersson, P.-E. (1976) Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements. *Cem. Concr. Res.* vol. 6. pp. 773–782.
- [2] Petersson, P.-E. (1981) Crack growth and development of fracture zones in plain concrete and similar materials. *Rep. TVBM, Div. Build. Mater. Lund Inst. Technol. Lund, Sweden.*
- [3] Boström, L. (1994) The stress-displacement relation of wood perpendicular to the grain - Part 1. Experimental determination of the stress-displacement relation. *Wood Sci. Technol.* vol. 28, no. 4. pp. 309–317. <https://doi.org/10.1007/BF00204218>.
- [4] Gómez-Royuela, J. L.; Majano-Majano, A.; Lara-Bocanegra, A. J.; Reynolds, T. P. S. (2021) Determination of the elastic constants of thermally modified beech by ultrasound and static tests coupled with 3D digital image correlation. *Constr. Build. Mater.* vol. 302. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124270>.

1025

CARACTERIZAÇÃO DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS DE MADEIRA LAMELADA COLADA DE *SCHIZOLOBIUM AMAZONICUM* (PARICÁ)

Carlito Calil Júnior¹; Fabiana Moritani²; Felipe Hideyoshi Icimoto³; Rodrigo Souza Nogueira¹

¹ University of São Paulo

² University of Coimbra, ISISE, ARISE, Department of Civil Engineering, SerQ

³ URBEM

Palabras clave / Palavras-chave:

Madeiras tropicais, Adesivos estruturais, Madeira lamelada colada, Schizolobium amazonicum.

Resumen / Resumo:

Os produtos de madeira engenheirada, como a madeira lamelada colada (MLC), devem ser submetidos ao controle de qualidade e à caracterização em indústrias ou laboratórios. Assim, a nova norma brasileira (ABNT NBR 7190 - parte 6) foi desenvolvida para fornecer diretrizes para o controle de qualidade da madeira lamelada colada nas indústrias brasileiras. Neste contexto, foi realizada a avaliação da compatibilidade de *Schizolobium amazonicum* com adesivos estruturais em elementos estruturais de MLC. Foram utilizados três tipos de adesivos estruturais (Melamina-urea-formaldeído (MUF), Poliuretano monocomponente (1C-PUR) e Fenol-Resorcinol Formaldeído (RF)) foram utilizados na produção das amostras. No programa experimental foram realizados ensaios de resistência ao cisalhamento nas linhas de cola e de delaminação para utilização em ambientes externos. De modo geral, o desempenho da colagem das vigas de MLC com a espécie *Schizolobium amazonicum* tiveram resultados favoráveis o uso dos três adesivos estruturais para o uso externo, tornando viável a espécie para a produção de elementos estruturais em MLC.

1. Introdução

A madeira vem ganhando espaços importantes em projetos estruturais como edificações, pontes e pavilhões esportivos, sendo imprescindível conhecer suas propriedades físicas e mecânicas para o melhor aproveitamento e o uso apropriado do material. Dentre estes usos a madeira lamelada colada (MLC) se destaca pela utilização racional da madeira em elementos estruturais. A MLC é um produto de madeira engenheirada, formado a partir de lamelas de madeira unidas por adesivos certificados para o uso estrutural. Estas estruturas têm alta capacidade de carga, baixo peso próprio e a possibilidade de confeccionar elementos estruturais de diferentes formas e dimensões, inclusive curvos.

Segundo Zangiácomo (2003) [1], muitas espécies tropicais alternativas apresentam propriedades físicas e mecânicas compatíveis para emprego na produção de elementos estruturais de MLC. Em particular, as espécies com densidade inferior a $0,75\text{g/cm}^3$, a 12% de umidade, são potencialmente indicadas para emprego em elementos estruturais de MLC, o que é o caso de muitas espécies de florestas nativas. Concomitantemente, a conscientização para o uso e a preservação dos recursos naturais provenientes das florestas tropicais vem sendo aplicada com a divulgação dos conceitos de manejos florestais sustentáveis e da comercialização de madeira certificada, em combate a exploração seletiva e predatória.

A norma brasileira ABNT NBR 7190 [2] foi desenvolvida para o projeto de estruturas de madeira e para a caracterização de espécies de madeira isentas de defeitos. A nova norma brasileira é composta por sete partes, sendo que a parte principal, ABNT NBR 7190 - parte 1 [3], introduz uma nova metodologia para o projeto de estruturas de madeira, enquanto que as outras partes (partes 2-7) incluem ensaios de caracterização de espécies florestais nativas e plantadas, controle de qualidade de produtos de madeira engenheirada e ensaios de ligação em estruturas de madeira.

A espécie *Schizolobium amazonicum*, popularmente conhecida como Paricá, pertencente à família *Leguminosae*, é pioneira e nativa da Amazônia que despertou o interesse no setor florestal por substituir outras espécies nativas devido a qualidade, rendimento, boa adaptação aos plantios limpos e rápido incremento volumétrico ($30\text{m}^3/\text{ha}/\text{ano}$) e, mesmo sem melhoramento genético, pode ser colhida aos seis anos de idade [4]. A espécie oferece também vantagens como a baixa densidade (na faixa de $0,3\text{ g/cm}^3$) e propriedades mecânicas favoráveis para seu uso. É cultivada na Amazônia do Brasil, Venezuela, Colômbia, Peru e Bolívia [5-6].

A nova norma brasileira ABNT NBR 7190 - parte 6 [7] abrange os ensaios de caracterização de elementos estruturais em MLC. Os ensaios disponíveis nessa norma [7] são ensaios de delaminação para a exposição externa e interna, ensaio de resistência ao cisalhamento na linha de cola, resistência à tração paralela às fibras da emenda denteada e a medição do adesivo aplicado. Além disso, a nova norma brasileira ABNT NBR 7190 - parte 6 [7] fornece algumas orientações para a produção da emenda denteada para elementos de MLC. Os ensaios de delaminação e de resistência ao cisalhamento na linha de cola foram baseados na norma EN 14080 [8] com algumas adaptações. Por outro lado, o ensaio de resistência à tração paralela às fibras foi baseado na norma EN 408 [9], enquanto os exemplos de modos de falha das emendas por união denteada foram baseados na norma ASTM D4688/D4688M [10].

Atualmente, existem apenas sete empresas de madeira lamelada colada no Brasil [11]. Entretanto, o controle de qualidade da madeira lamelada colada fabricada por essas empresas deve ser realizado de acordo com a nova norma brasileira ABNT NBR 7190 - parte 6 [7]. Assim, o objetivo desta pesquisa foi verificar a viabilidade de uso de *Schizolobium amazonicum* como alternativa de matéria-prima para a produção de elementos estruturais em MLC com diferentes adesivos estruturais. Para atingir esse objetivo, foram realizados ensaios de delaminação e de resistência ao cisalhamento nas linhas de cola em amostras produzidas com três adesivos estruturais: Melamina-urea-formaldeído (MUF), Poliuretano monocomponente (1C-PUR) e Fenol-Resorcinol Formaldeído (RF).

2. Materiais e métodos

Os ensaios foram realizados no LaMEM (Laboratório de Madeira e Estruturas de Madeira), do Departamento de Engenharia de Estruturas (SET), na Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP).

2.1. Materiais

Schizolobium amazonicum (Paricá) foi a espécie nativa utilizada para produzir as lamelas das vigas. Foram selecionadas 36 lamelas para a produção de 12 vigas com 3 lamelas cada uma. As lamelas foram cortadas no comprimento de 210 cm, e passaram para o aplainamento, desengrossadeira e desempenadeira. As lamelas tiveram seção transversal de 3,0 cm x 9,0 cm. A espécie *Schizolobium amazonicum* apresentou uma densidade média aparente de 344 kg/m³. Para a colagem foram utilizados três adesivos estruturais: Melamina-urea-formaldeído (MUF), Poliuretano monocomponente (1C-PUR) e Fenol-Resorcinol Formaldeído (RF). O processo de colagem e prensagem das vigas de MLC foram realizadas seguindo as instruções de cada fabricante.

2.2. Ensaio de delaminação

Os ensaios de delaminação foram realizados de acordo com a norma brasileira ABNT NBR 7190 - Parte 6 [7] para o elemento no uso em ambiente externo.

2.3. Ensaio de resistência ao cisalhamento na linha de cola

Para determinar a resistência ao cisalhamento nas linhas de cola das vigas de MLC, foram realizados ensaios de acordo com a ABNT NBR 7190 - parte 6 [7].

3. Resultados e discussões

Na Tabela 1 são apresentados os valores do ensaio de delaminação das vigas de MLC. Foram calculados os valores médios de delaminação total. Na Tabela 2 são apresentados os resultados dos ensaios de cisalhamento na linha de cola das vigas de MLC.

Tabela 1: Resultados do ensaio de delaminação (%)

	Vigas					
Adesivos	1	2	3	$\bar{x}$	DP	CV (%)
MUF	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1C-PUR	7,3	6,3	4,2	5,9	1,6	27,0
RF	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

$\bar{x}$: valor médio;
DP: desvio padrão;
CV: coeficiente de variação.

Tabela 2: Resultados da resistência ao cisalhamento na linha de cola (MPa) e porcentagem de ruptura na madeira

Viga	Adesivo					
	MUF		1C-PUR		RF	
	%	f_{v0}	%	f_{v0}	%	f_{v0}
1	96,0	8,7	100,0	7,1	100,0	6,6
2	100,0	7,4	100,0	4,9	99,0	6,8
3	95,0	6,3	100,0	6,6	100,0	7,0
$\bar{x}$	97,0	7,5	100,0	6,2	99,7	6,8
DV	4,7	1,1	0,0	1,1	0,8	0,4
CV (%)	4,8	15,3	0,0	18,4	0,8	6,0

Pelos resultados de delaminação para as vigas de MLC de *Schizolobium amazonicum*, observa-se que somente as vigas com 1C-PUR apresentaram delaminação, sendo o maior valor de 7.3% para a viga 1. De acordo com a norma brasileira ABNT NBR 7190 – parte 6 [7], o limite máximo para o uso em ambiente externo é de 6% e para ambiente externo protegido é de 8%, e por isso a viga 1 e 2 produzidas com 1C-PUR não passariam caso fossem consideradas para o uso externo. A norma ainda especifica que se os valores de delaminação excederem os limites máximos apresentados, o ciclo de ensaio deve ser repetido com novos corpos de prova, e a delaminação registrada para esses corpos de prova não devem exceder os 10%. Foram realizados novos ensaios, e nesses corpos de prova foram registrados delaminação de 0%. Para os corpos de prova com MUF e RF foram registrados 0% de delaminação, apresentando uma boa compatibilidade da espécie com adesivos analisados. A espécie de *Schizolobium amazonicum* apresenta uma densidade e porosidade que favorece a compatibilidade com vários adesivos utilizados para MLC. Esse resultado de delaminação também foi observado no estudo de Almeida *et al.* (2014) [12], no qual os corpos de prova de MLC de *Schizolobium amazonicum* com MUF e RF não apresentaram nenhuma delaminação nos seus corpos de prova.

De acordo com os resultados dos ensaios de cisalhamento na linha de cola, observa-se que a MUF foi o adesivo que obteve o maior valor médio de resistência ao cisalhamento (7,5 MPa). Além disso, constata-se que para os três adesivos a ruptura dos corpos de prova aconteceram majoritariamente na madeira, indicando que a colagem foi efetiva e a resistência na linha de cola é maior do que a própria madeira. A norma EN 14080 [8] especifica a porcentagem mínima (%) de ruptura na madeira relativa à resistência ao cisalhamento na linha de cola. Para valor médio de 6 MPa, a porcentagem de ruptura na madeira deve ser acima de 90%. Sendo assim, a espécie *Schizolobium amazonicum* cumpre esse requisito para os três adesivos estruturais avaliados.

4. Conclusões

Este estudo teve como objetivo realizar a caracterização da compatibilidade e controle de qualidade da colagem em elementos estruturais de MLC produzidas com a espécie *Schizolobium amazonicum* e três adesivos estruturais: MUF, 1C-PUR e RF. A partir dos resultados obtidos, foi possível destacar que:

- De modo geral, o desempenho da colagem das vigas de MLC com a espécie *Schizolobium amazonicum* tiveram ótimos resultados;
- Pelos resultados dos ensaios de delaminação da *Schizolobium amazonicum*, as vigas produzidas com os adesivos MUF e RF demonstraram melhores resultados, enquanto que o com o uso do adesivo 1C-PUR foram registrados porcentagem de delaminação e o requisito para o uso externo foi cumprido ao refazermos o ensaio;
- Dos ensaios de resistência ao cisalhamento nas linhas de cola, foi possível observar que a maior resistência foi obtida com o adesivo MUF, com ruptura predominantemente na madeira. Os três adesivos apresentaram ruptura predominantemente na madeira e que satisfazem os requisitos exigidos pela norma.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao CIPEM, e ao Laboratório de Madeira e Estruturas de Madeira (LaMEM), do Departamento de Engenharia de Estruturas (SET), na Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP) pela disponibilidade para realizar esse trabalho. Este trabalho também foi financiado pela FIPAI (Fundação para o Incremento da Pesquisa e do Aperfeiçoamento Industrial), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES), código de financiamento - 001.

References

- [1] Zangiácomo, A. L. (2003) Emprego de espécies tropicais alternativas na produção de elementos estruturais de madeira laminada colada. São Carlos. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. 78p.
- [2] ABNT NBR 7190. Projeto de estruturas de madeira. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brasil, 1997.
- [3] ABNT NBR 7190. Projeto de estruturas de madeira - Parte 1: Critérios de dimensionamento. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brasil, 2022.
- [4] Urbinati, C. V. Influência das características anatômicas em juntas coladas de *Schizolobium parahyba* var *amazonicum* (Huber ex. Ducker) Barneby (Paricá). 2013. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.
- [5] Calil Neto, C. Madeira Laminada Colada (MLC): controle de qualidade em combinações espécie-adesivo - tratamento preservativo. 2011. 118 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

- [6] Carvalho, P. E. R. Espécies florestais brasileiras: recomendações silviculturais, potencialidades e uso da madeira. Colombo: Embrapa-CNPQ, 1994. 640 p.
- [7] ABNT NBR 7190. Projeto de estruturas de madeira - Parte 6: Métodos de ensaio para caracterização de madeira lamelada colada estrutural. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brasil, 2022.
- [8] EN 14080. Timber structures — Glued laminated timber and glued solid timber — Requirements. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2013.
- [9] EN 408. Timber structures - Structural timber and glued laminated timber - Determination of some physical and mechanical properties. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2012.
- [10] ASTM D4688/D4688M. Standard Test Method for Evaluating Structural Adhesives for Finger Jointing Lumber. ASTM International, West Conshohocken, USA, 2014.
- [11] Leite T. M., Santos P. A. F. M., do Valle I. M. R.: The use of glued laminated timber in Brazil: overview and challenges. In: II Congresso Latinoamericano de Estructuras de Madera II Congresso Ibero-Latinoamericano de la Madera en la Construcción, Buenos Aires, Argentina, 2017.
- [12] Almeida, D. H. D.; Cavaleiro, R. S.; Macêdo, L. B. D.; Calil Neto, C. et al. Evaluation of quality in the adhesion of glued laminated timber (Glulam) of Paricá and Lyptus wood species. International Journal of Materials Engineering, 4, n. 3, p. 114-118, 2014.

1026

CARACTERIZAÇÃO ELÁSTICA DA MADEIRA POR ULTRASSOM UTILIZANDO CORPO DE PROVA POLIÉDRICO COM NÚMERO REDUZIDO DE FACES

Cinthya Bertoldo¹; Raquel Gonçalves¹

¹ Universidade Estadual de Campinas

Palabras clave / Palavras-chave:

Módulo de elasticidade longitudinal; Módulo de cisalhamento; Coeficiente de Poisson; Inclinação de anéis de crescimento

Resumen / Resumo:

A caracterização completa da madeira, com a determinação das doze constantes elásticas que representam sua ortotropia, é de grande importância em aplicações nas quais softwares de cálculo estrutural são utilizados. O ultrassom permite essa caracterização com relativa simplicidade quando comparado a outros métodos, sendo o poliedro considerado como o formato mais adequado por permitir que as doze constantes possam ser calculadas com o uso de um único corpo de prova. A precisão desta técnica tende a ser reduzida com o aumento da inclinação dos anéis de crescimento, uma vez que as ondas se desviam das direções principais de ortotropia. O objetivo desta pesquisa foi verificar se a redução do número de faces do corpo de prova poliédrico de 26 faces, tradicionalmente utilizado, altera os resultados dos parâmetros elásticos obtidos na caracterização da madeira por ultrassom. Os resultados mostram que a redução do número de faces (26 para 18) permite a obtenção de anéis de crescimento mais retilíneos, mas que, em geral, os parâmetros elásticos não sofrem variações estatisticamente significativas.

1. Introdução

A madeira tem sido altamente recomendada na construção civil em várias partes do mundo, por suas características de sustentabilidade, já que se trata de recurso natural renovável, de baixo consumo energético e de grande contribuição na redução de gases efeito estufa [1, 2]. Atualmente há, no mercado, softwares de cálculo estrutural que permitem dimensionamentos precisos de estruturas, sendo a precisão dessas ferramentas dependente da inserção de dados de forma completa e coerente com o tipo de material, tornado esse conhecimento fundamental.

De forma simplificada a madeira é considerada ortotrópica, com três eixos principais de simetria (longitudinal - L, radial - R e tangencial - T) que respondem de forma distinta à ação de cargas. Sendo assim, para a caracterização completa desse material é necessária a determinação de doze constantes elásticas (nove delas independentes): três módulos de elasticidade longitudinais, três módulos de elasticidade transversais e seis coeficientes de Poisson.

A tecnologia de ultrassom permite determinar, de forma não destrutiva, todas as constantes elásticas de materiais ortotrópicos, como é o caso da madeira, sendo as bases teóricas discutidas por Bucur [3], Musgrave [4] e Hearmon [5]. Ao longo dos anos, com o desenvolvimento de equipamentos, diversos estudos vêm sendo conduzidos corroborando a eficácia e a precisão da tecnologia de ultrassom na caracterização e na inferência de propriedades da madeira [6-12]. Para a caracterização completa da madeira por ultrassom é possível a utilização de diversos formatos de corpo de prova, como por exemplo os esféricos, os prismáticos, os poliédricos e os discos multifacetados. Os corpos de prova poliédricos foram propostos inicialmente por Francóis [12] em dois formatos, com 26 e 18 faces.

No processo de caracterização completa da madeira por ultrassom, alguns autores relatam problemas na determinação dos termos fora da diagonal principal da matriz de rigidez [3, 10], uma vez que há a distorção da frente de onda provocada pela inclinação dos anéis de crescimento da madeira. Segundo Bucur e Archer [13], a redução da dimensão do corpo de prova favorece a aproximação da ortotropia, pois a curvatura dos anéis de crescimento pode ser desprezada. Considerando a identificação de interferências da inclinação dos anéis de crescimento nos resultados da caracterização por ultrassom e maior viabilidade de se obter corpos de prova com anéis de crescimento mais retilíneos reduzindo a dimensão do corpo de prova, o objetivo da pesquisa foi verificar se a redução do número de faces do poliédrico, passando de 26 para 18 faces, altera os resultados dos parâmetros elásticos obtidos na caracterização da madeira por ultrassom.

2. Materiais e métodos

Para os ensaios foram selecionadas três espécies de madeira: Garapeira (*Apuleia leiocarpa*), Angelim vermelho (*Dinizia excelsa*) e Cedrorana (*Cedrelinga catenaeformis*), sendo que para cada uma foram obtidas três peças de 0,10 x 0,20 x 1,0 m³, com cerca de 12% de umidade. De cada uma das peças foram confeccionados 2 poliedros de 26 faces (P26), com dimensão tradicionalmente utilizada na literatura e, 2 poliedros de 18 faces (P18), totalizando 36 poliedros.

Os poliedros foram retirados a partir de cubos orientados nas três direções principais da madeira (L ou 1, R ou 2 e T ou 3), com os anéis de crescimento mais retilíneos e paralelos quanto possíveis em relação a aresta do cubo. O poliedro de 26 faces de dimensões tradicionalmente utilizadas [7-11] foi obtido a partir de um cubo de 70 mm de aresta (Figura 1a). A dimensão da aresta do cubo que originou o poliedro de 18 faces (Figura 1b) foi adotada de forma a manter, como dimensão mínima das faces, o diâmetro do transdutor de 1,0 MHz de frequência (12 mm), garantindo que o transdutor pudesse ficar circunscrito à face do poliedro, evitando-se o efeito parede durante a propagação da onda [3].

A inclinação dos anéis de crescimento foi mensurada a fim de verificar se a redução no número de faces do poliedro permite reduzir a inclinação dos anéis em relação a face radial ou tangencial e, que essa redução minimiza efeitos de dispersão da onda, melhorando a propagação mais pura nos eixos ou nos planos.

Os ensaios nos corpos de prova poliédricos foram realizados com equipamento de ultrassom (EP1000, Olympus, EUA) e transdutores de ondas de compressão e de cisalhamento de 1 MHz de frequência (Figura 1c).



b



A photograph showing a person's hands holding a small, round, brown object (likely a piece of wood or a fruit) against a white background. The object is connected to a handheld electronic device (a multimeter or impedance analyzer) via two wires. The device has a screen displaying a graph and various buttons. The person is wearing a white shirt.

C

3. Resultados e discussões

3.1. Inclinação dos anéis de crescimento nas faces RT dos poliedros

Para todas as espécies estudadas, as inclinações médias dos anéis de crescimento foram menores para o P18 (Tabela 1). O processo de fabricação dos poliedros pode explicar esse resultado, pois o processo é muito mais simples para a execução das 18 faces do que das 26 faces, melhorando as condições para que o corte contemple maior precisão para as direções principais.

Tabela 1. Valores médios e coeficientes de variação (entre parêntesis) dos ângulos de inclinação dos anéis de crescimento nas faces RT dos poliedros de 26 faces (P26) e de 18 faces (P18) nas diferentes espécies e média geral independente da espécie.

	P26	P18
Garapeira (<i>Apuleia leiocarpa</i>)	13,0° (81%) b	1,8° (20,1%) a
Angelim vermelho (<i>Dinizia excelsa</i>)	3,3° (49,8%) a	2,6° (51,5%) a
Cedrorana (<i>Cedrelinga catenaeformis</i>)	5,1° (71,7%) a	5,9° (46,0%) a
Média Geral	7.1° (105%) b	3.5°(72%) a

Nas linhas, letras diferentes indicam diferenças estatisticamente significativas com 95% de nível de confiança.

3.2. Parâmetros elásticos

Os parâmetros elásticos obtidos utilizando os corpos de prova poliédricos de 18 faces, indicaram valores compatíveis com os obtidos da literatura e, também, com os esperados considerando as propriedades acústicas e mecânicas da madeira (Tabela 2). Os módulos transversais nos planos RT e RL foram afetados pela redução dos corpos de prova de 26 e 18 faces para o Angelim-vermelho e o coeficiente de Poisson no plano TR para a Garapeira (Tabela 2). Esta baixa incidência de diferenças em termos gerais (cerca de 4%) indica que a redução no número de faces não alterou, de forma significativa, os resultados quando se compara com os obtidos com o corpo de prova tradicional.

No caso desta pesquisa é importante destacar que, em alguns casos, os valores de módulos transversais e, principalmente, de coeficientes de Poisson, apresentaram valores elevados de coeficiente de variação para os corpos de prova de 18 faces, o que indica que a redução não foi tão efetiva quanto o esperado para reduzir, pela redução da inclinação dos anéis de crescimento, a variabilidade dos resultados obtidos pelo método. Além disso, valores de coeficientes de variação elevados podem ter influenciado, em alguns casos, a equivalência estatística dos resultados.

Tabela 2. Parâmetros elásticos e coeficientes de variação (%) obtidos na caracterização utilizando os corpos de prova poliédricos com 26 faces (P26) e poliédricos com 18 faces (P18).

	Garapeira		Angelim-vermelho		Cedrorana	
	P26	P18	P26	P18	P26	P18
E_L (MPa)	16136 (24,5%) a	15749 (22,7%) a	21767 (7,3%) c	22107 (9,9%) c	11723 (10,0%) e	10182 (19,8%) e
E_R (MPa)	2574 (13,9%) a	2599 (9,8%) a	3346 (6,5%) c	3293 (4,6%) c	1250 (21,2%) e	1126 (17,0%) e
E_T (MPa)	1904 (7,8%) a	1808 (9,9%) a	2446 (6,0%) c	2519 (7,6%) c	624 (23,7%) e	620 (26,7%) e
G_{RT} (MPa)	673 (15,6%) a	662 (14,7%) a	918 (0,7%) d	864 (4,2%) c	183 (10,2%) e	229 (36,1%) e
G_{LT} (MPa)	1193 (15,8%) a	1130 (20,4%) a	1496 (4,1%) d	1430 (3,0%) c	602 (19,9%) e	643 (19,6%) e
G_{LR} (MPa)	1514 (9,8%) a	1479 (9,7%) a	2111 (14,6%) c	2132 (20,6%) c	921 (14,1%) e	884 (10,5%) e
ν_{RL}	0,10 (49,6%) a	0,11 (29,3%) a	0,12 (15,3%) c	0,11 (20,3%) c	0,05 (22,7%) e	0,07 (27,2%) e
ν_{TL}	0,07 (39,2%) a	0,08 (36,1%) a	0,07 (31,3%) c	0,08 (26,2%) c	0,05 (25,8%) e	0,05 (79%) e
ν_{LR}	0,62 (29,3%) a	0,62 (25,2%) a	0,76 (18,4%) c	0,71 (16,1%) c	0,50 (22,1%) e	0,66 (38,5%) e
ν_{TR}	0,44 (4,3%) b	0,37 (11,7%) a	0,41 (9,4%) c	0,41 (6,9%) c	0,39 (12,7%) e	0,44 (11,9%) e
ν_{LT}	0,58 (27,8%) a	0,71 (30,8%) a	0,63 (25,3%) c	0,71 (32,2%) c	0,85 (14,2%) e	0,69 (36,8%) e
ν_{RT}	0,55 (14,9%) a	0,54 (13,2%) a	0,55 (2,2%) c	0,53 (3,6%) c	0,79 (6,7%) e	0,84 (5,0%) e

Nas linhas, letras diferentes indicam diferenças estatisticamente significativas com 95% de nível de confiança.

4. Conclusões

Os resultados da pesquisa permitem concluir que, em geral, a redução do número de faces do poliedro não afeta significativamente os resultados e os coeficientes de variação dos parâmetros elásticos da madeira obtidos na caracterização por propagação de ondas ultrassônicas. No entanto, a utilização de poliedros de 18 faces, permite a redução da inclinação dos anéis de crescimento que, de acordo com as bases do ensaio, tende a aumentar a precisão dos parâmetros elásticos, uma vez que viabiliza direções transversais (radiais e tangenciais) mais puras. Adicionalmente, o corpo de prova de 18 faces permite simplificar a confecção do poliedro, sendo um aspecto positivo para a metodologia do ensaio de caracterização da madeira.

Agradecimientos

Os autores agradecem ao grupo de pesquisa do Laboratório de Ensaios Não Destrutivos (LabEND - FEAGRI/UNICAMP) pelo suporte nos ensaios e ao Laboratório de Protótipos (FEAGRI/UNICAMP) pela confecção dos corpos de prova necessários para a conclusão desse trabalho. À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP - Processo nº 2016/00658-4) pelo financiamento dessa pesquisa.

Referencias

- [1] Mitterpach, J.; Vaňová, R.; Sedivka, P.; Stefko, J. A Comparison of the Environmental Performance between Construction Materials and Operational Energy of Nearly Zero-Energy Wood-Based Educational Building. *Forests*, 2022. doi.org/10.3390/f13020220.
- [2] Amiri A.; Ottelin J.; Sorvari J.; Junnila S. Cities as carbon sinks - classification of wooden buildings. *Environment Research Letters*, v. 15 (n. 9), 2020. DOI 10.1088/1748-9326/aba134
- [3] Bertoldo, C. (2014) Propriedades de resistência e de rigidez da madeira obtidas a partir da avaliação acústica na árvore. Tese de doutorado. Faculdade de Engenharia Agrícola. Universidade Estadual de Campinas, SP, Brasil. 146 p.
- [4] Musgrave, M. J. P. *Crystal Acoustics*, Holden Day, San Francisco, 1970.
- [5] Hearmon, R. F. S. *An introduction to applied anisotropic elasticity*, Oxford University Press, Oxford, 1961.
- Esteban, M. (2013) Treinta y seis torres de madera en Europa, 36 propuestas diferentes. *Boletín de información técnica* nº 286, AITIM. Pp. 36-43.
- [6] Keunecke, D.; Sonderegger, W.; Pereteanu, K.; Lüthi, T.; Niemz, P. Determination of Young's and shear moduli of common yew and Norway spruce by means of ultrasonic waves. *Wood Science and Technology*. V. 41, p. 309-327, 2007.
- [7] Gonçalves, R.; Trinca, A. J.; Ferreira, G.S. Effect of coupling media on velocity and attenuation of ultrasonic waves in Brazilian wood. *Journal of Wood Science*. v. 54 (4), p. 282-287, 2011.
- [8] Gonçalves, R.; Trinca, A. J.; Cerri, D. G. P. Comparison of elastic constants of wood determined by ultrasonic wave propagation and static compression testing. *Journal Wood and Fiber Science*, v. 43(1), p. 64-75, 2011.
- [9] Bertoldo C.; Gonçalves, R.; Merlo, E.S.; Santaclara, O.; Ruy, M.; Moreira, M.E.M. Elastic constants of Pinus pinaster wood determined by wave propagation. In: 18th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium. Madison, EUA, September, 2013.
- [10] Gonçalves, R.; Trinca, A. J.; Pellis, B.P. Elastic constants of wood determined by ultrasound using three geometries of specimens. *Wood Science and Technology*, 48 :269-287, 2014.
- [11] Vázquez, C.; Gonçalves, R.; Bertoldo, C.; Baño, V.; Vega, A.; Crespo, J.; Guaita, M. Determination of the mechanical properties of Castanea sativa (Mill) using ultrasonic wave propagation and comparison with static compression and bending methods, *Wood Science and Technology*, v.49 (3), p.607-622, 2015.
- [12] François, M. Identification des symmetries matérielles de matériaux anisotropes. France, PhD Thesis – University Paris, 137p, 1995.
- [13] Bucur, V. Archer R.R. Elastic constants for wood by an ultrasonic method. *Wood Sci Technologic* v.18, p.255-265, 1984.

1027

CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DE PAINEL OSB DE *PINUS* spp. AGLUTINADO COM RESINA FENÓLICA COM LIGNINA

Danilo Soares Galdino¹; Marcia Braga González²; Claudia Marcela Ibañez Ojeda²; Carlos Manuel Romero Luna¹; Cristiane Inácio De Campos¹

¹ UNESP

² UDELAR

Palabras clave / Palavras-chave:

Lignina kraft, Adesivo estrutural, Sustentabilidade, Construção industrializada

Resumen / Resumo:

Este estudo investiga a substituição do fenol por lignina na fabricação de resinas fenólicas para painéis OSB, utilizando lignina comercial derivada do licor negro, um subproduto da indústria de papel e celulose que passou a ser produzido no Brasil a partir de 2019. A lignina obtida de *Eucalypto* spp. foi integrada com fenol, formaldeído e outros reagentes químicos no processo de produção dos painéis. Estes foram avaliados conforme padrões europeus, atendendo aos requisitos de densidade, umidade, absorção de água e inchamento em espessura. Notavelmente, os painéis fabricados com resina à base de lignina (LPF) mostraram desempenho superior em testes de absorção de água e inchamento em espessura após imersão em água por 24 horas. A análise por microscopia eletrônica revelou que as lascas nos painéis com resina LPF interagem melhor, com menos evidência de vazios. Conclui-se, portanto, que a lignina representa uma alternativa eficiente e sustentável ao fenol, melhorando significativamente as propriedades dos painéis OSB e ampliando sua aplicabilidade na construção civil, especialmente em ambientes expostos à umidade.

1. Introdução

As indústrias de produtos de madeira frequentemente usam resina fenol-formaldeído (PF) como agente aglutinante devido à sua alta resistência a temperaturas e umidade, bem como propriedades mecânicas superiores, ideal para aplicações estruturais[1]. Painéis OSB e compensados, produzidos com essa resina, são amplamente utilizados em sistemas construtivos industrializados, como *Wood Frame* e *Steel Frame*, para fechamento de paredes, forros, pisos e como substrato para cobertura do telhado[2].

No entanto, a instabilidade dos preços do fenol, vinculada às flutuações do mercado de petróleo e gás, tem impulsionado pesquisas e indústrias na busca por alternativas renováveis. A lignina emerge como um substituto promissor devido à sua riqueza em unidades fenil propano, oferecendo uma alternativa para a produção de resinas fenólicas[3].

Desde 2019, o setor brasileiro de papel e celulose tem transformado seus processos produtivos, incorporando a extração de lignina e conferindo valor a um material anteriormente considerado resíduo industrial. Isso reflete um senso crescente de responsabilidade ambiental e avanços notáveis na eficiência da extração e refinação da lignina para aplicações comerciais[4]. O licor negro, anteriormente um subproduto para recuperação energética, agora passa por tratamento para isolar a lignina, tornando-a uma valiosa matéria-prima para usos industriais, incluindo resinas mais ecológicas[5].

No entanto, a extração eficaz da lignina e sua aplicação industrial apresentam desafios significativos, influenciados pela fonte da matéria-prima e pelas condições do processo de polpação, afetando propriedades como grupos reativos e peso molecular[6]. Portanto, a pesquisa deve continuar a aprimorar o uso da lignina para criar produtos finais comerciais de alta qualidade. Também persistem incertezas sobre a capacidade dos painéis com lignina em atender ou superar as propriedades dos painéis convencionais, impulsionando a pesquisa e a inovação tecnológica[7].

Nesse contexto, esta pesquisa busca avaliar a viabilidade do uso de lignina comercial obtida do processo de polpação kraft de eucalipto spp. para formular uma resina lignina-fenol-formaldeído (LPF) melhorada, destinada à produção de painéis OSB. Procurou-se preservar e potencializar as propriedades físicas dos painéis, ao mesmo tempo que surge uma alternativa mais sustentável em relação às resinas fenólicas convencionais.

2. Materiais e métodos

2.1. Materiais

Para a fabricação dos painéis OSB, utilizou-se como matéria-prima lascas de madeira de *Pinus spp.* do sudoeste do Estado de São Paulo, Brasil. A lignina kraft, extraída do processo de polpação do *Eucalipto spp.*, com pureza superior a 95%, foi fornecida por uma produtora de polpa celulósica no mesmo estado. Os reagentes químicos necessários, como metanol (99,7%), hidróxido de sódio (NaOH, 60%), formaldeído (37%) e fenol (99,5%), foram adquiridos da empresa Nox Solutions Indústria de Produtos Químicos, no Brasil.

2.2. Síntese das resinas

O processo de síntese das resinas ocorreu em um reator de quatro bocas equipado com agitador mecânico, termômetro, condensador de refluxo e funil de adição. A mistura reacional consistiu de fenol fundido, formaldeído e metanol, aquecidos a 80°C por duas horas, enquanto o hidróxido de sódio a 60% foi adicionado gradualmente. Foram usados 270g de formaldeído (37%), 150g de fenol (99%), 60g de metanol (50% v/v) e 36 mL de NaOH (50%). Na síntese da resina LPF, 30% dos 150g de fenol foram substituídos por 45g de lignina. A mistura de lignina e fenol foi homogeneizada a 40°C por uma hora antes de ser incorporada ao processo de síntese da resina.

2.3. Produção do painel

A produção dos painéis OSB ocorreu no Laboratório de Painéis do Instituto de Ciência e Engenharia da UNESP, Itapeva, seguindo metodologias estabelecidas anteriormente [8]. As tábuas de pinus foram cortadas em dimensões menores, umedecidas, e processadas em um gerador de partículas. Após a secagem ao ar e remoção de finos, as partículas foram secas em estufa a 103°C até atingirem cerca de 3% de umidade. Os painéis com dimensões de 370 x 370 x 12 mm foram formados utilizando 1500g de strands e adesivo na proporção de 10% em relação à massa seca das partículas. O adesivo foi aplicado por pulverização, seguida de pré-prensagem com carga de 2 toneladas por 5 minutos. A prensagem final foi realizada em uma prensa hidráulica termomecânica.

2.4. Caracterização do painel

A caracterização dos painéis seguiu padrões europeus, incluindo testes de densidade (EN 323), teor de umidade (EN 322), absorção de água e inchamento em espessura após imersão em água (EN 317). Foram caracterizadas dez amostras de cada ensaio, e a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi realizada em um equipamento da marca Jeol Inc. (Massachusetts, USA), modelo JCM-6000 PLUS, com aceleração de elétrons de 10 kV.

3. Resultados

3.1. Caracterização física

A Tabela 1 mostra os valores médios das propriedades físicas dos painéis OSB fabricados com as resinas LPF e PF, ambas sintetizadas em laboratório em um período de 2 horas.

Tabela 1. Resultados das propriedades físicas dos painéis fabricados

ENSAIO	PF	LPF
DA (kg/m ³)	628 a*	671 a
U (%)	9,43 a	9,24 a
AA (%)	83 a	68 b
IE (%)	19,2 a	13,4 b

* Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Os resultados indicam que a inclusão de lignina na resina LPF não afetou significativamente essa propriedade em comparação com a resina PF padrão. Quanto à umidade, os painéis com ambas as resinas apresentaram valores dentro dos limites estabelecidos pela norma EN 300, que especifica um intervalo de umidade entre 5 e 12%. Isso sugere que a umidade não é um fator decisivo na escolha da resina para a produção de painéis OSB destinados a aplicações estruturais, pois ambos os tipos atendem aos requisitos normativos.

No entanto, as propriedades relacionadas à absorção de água e ao inchamento em espessura após imersão mostraram diferenças significativas entre as resinas. Os painéis com resina PF apresentaram maior absorção e inchamento em comparação com os painéis com resina LPF. Esses resultados estão em linha com estudos anteriores[9,10] que mostraram que a lignina fenolada na resina LPF contribui para reduzir a absorção de água e o inchamento de painéis, tornando-o mais adequado para aplicações em ambientes úmidos.

3.2. Microscopia eletrônica de varredura (mev)

As imagens microscópicas dos painéis OSB revelam diferenças significativas entre os produzidos com resina LPF e resina PF. Os painéis com resina LPF apresentaram uma superfície mais lisa e uniforme, com menos vazios. Isso indica que as lascas interagiram melhor, com uma distribuição de resina mais uniforme e melhor aderência entre as partículas.

Essa melhoria na interação entre o adesivo e as lascas de madeira sugere um produto final com integridade estrutural aprimorada (Figura 2b). A consistência mais homogênea também reflete em menos áreas de potencial absorção de água, o que contribui para um desempenho superior em condições de uso externo. Portanto, a análise microscópica não apenas destaca as diferenças no nível microscópico, mas também indica uma maior qualidade e confiabilidade dos painéis OSB fabricados com resina LPF para uso externo.

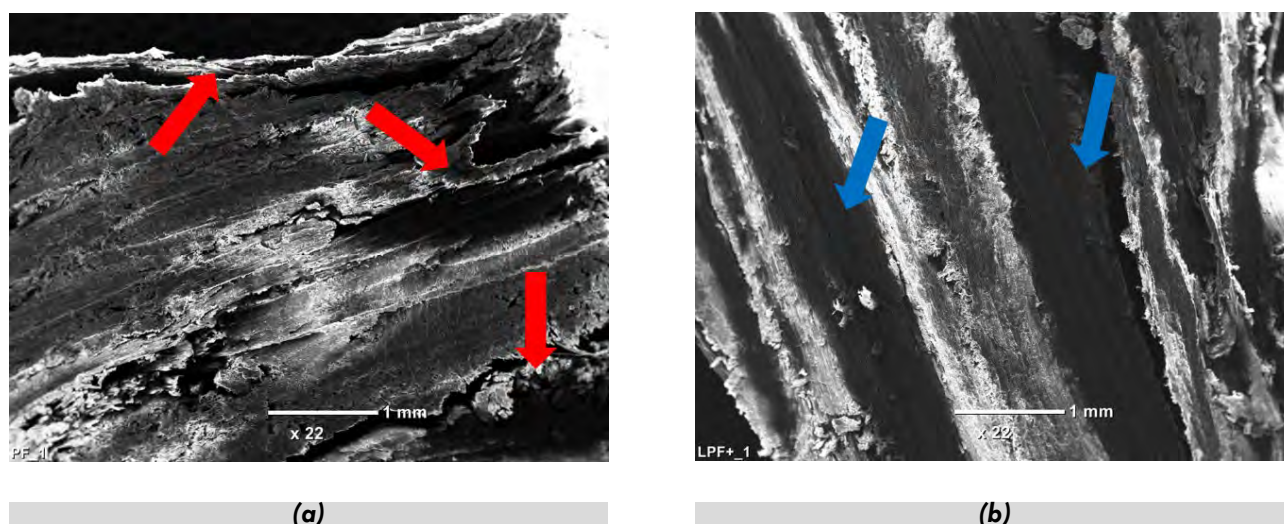


Figura 2. Micrografias das superfícies de OSB produzido com resina PF (a) e LPF (b).

4. Conclusões

Os resultados deste estudo confirmam que a substituição parcial do fenol por lignina (30% neste estudo) na produção de resina fenólica para painéis OSB é viável, não afetando a densidade e mantendo o teor de umidade dentro dos padrões normativos. Os painéis produzidos com resina LPF mostraram menor absorção de água e inchamento, adequados para uso em condições de umidade, o que sugere uma melhora na resistência à água em comparação com os painéis fabricados com resina PF. As observações microscópicas evidenciam uma melhor qualidade visual e integridade estrutural nos painéis com resina LPF. Portanto, a lignina é uma opção viável para substituir o fenol na síntese de resinas, com benefícios ecológicos e de desempenho para painéis OSB estruturais.

Agradecimentos

Agradecemos ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e às empresas Sguario Indústria e Madeiras Ltda. e Suzano S.A. pela doação de materiais.

References

- [1] Pizzi, A.; Papadopoulos, A.N.; Policardi, F. Wood Composites and Their Polymer Binders. *Polymers (Basel)*. **2020**, *12*, doi:10.3390/POLYM12051115.
- [2] Xu, Y.; Guo, L.; Zhang, H.; Ren, H. Prospects of Phenolic Resin. *RSC Adv. Open* **2019**, 28924–28935, doi:10.1039/c9ra06487g.
- [3] Galdino, D.S.; Kondo, M.Y.; Araujo, V.A. De; Larisa, G.; Arce, A.; Faustino, E.; Ferreira, H.; Christoforo, L.; Manuel, C.; Luna, R.; et al. Thermal and Gluing Properties of Phenol-Based Resin with Lignin for Potential Application in Structural Composites. *Polymers (Basel)*. **2023**, *15*, doi:10.3390/polym15020357.
- [4] Liao, J.J.; Latif, N.H.A.; Trache, D.; Brosse, N.; Hussin, M.H. Current Advancement on the Isolation, Characterization and Application of Lignin. *Int. J. Biol. Macromol.* **2020**, *162*, 985–1024, doi:https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.06.168.
- [5] Dessbesell, L.; Paleologou, M.; Leitch, M.; Pulkki, R.; Xu, C. (Charles) Global Lignin Supply Overview and Kraft Lignin Potential as an Alternative for Petroleum-Based Polymers. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2020**, *123*, 109768, doi:10.1016/j.rser.2020.109768.
- [6] Costes, L.; Laoutid, F.; Brohez, S.; Dubois, P. Bio-Based Flame Retardants : When Nature Meets Fire Protection. *Mater. Sci. Eng. R* **2017**, *117*, 1–25, doi:10.1016/j.mser.2017.04.001.
- [7] Lubis, M.A.R.; Labib, A.; Sudarmanto; Akbar, F.; Nuryawan, A.; Antov, P.; Kristak, L.; Papadopoulos, A.N. Influence of Lignin Content and Pressing Time on Plywood Properties Bonded with Cold-Setting Adhesive Based on Poly (Vinyl Alcohol), Lignin, and Hexamine. *Polymers (Basel)*. **2022**, *14*, 1–20, doi:10.3390/polym14102111.
- [8] Silva, J.V.F.; De Campos, C.I.; Ferreira, B.S.; Silva, M.F.F. Production and Characterization of Heat Treated Osb Made of Pinus Taeda. *Acta Sci. - Technol.* **2019**, *41*, 1–6, doi:10.4025/actascitechnol.v41i1.39505.
- [9] Younesi-kordkheili, H.; Pizzi, A. A Comparison among Lignin Modification Methods on the Properties of Lignin-Phenol-Formaldehyde Resin as Wood Adhesive. *Polymers (Basel)*. **2021**.
- [10] Iwakiri, V.T.; Trianoski, R.; Razera, D.L.; Iwakiri, S.; Rosa, T.S. da Production of Structural Particleboard of Mimosa Scabrella Benth With Lignin Phenol-Formaldehyde Resin. *Floresta e Ambient.* **2019**, *26*, doi:10.1590/2179-8087.100617.

1028

MECHANICAL CHARACTERIZATION OF CROSS LAMINATED TIMBER-CONCRETE PANELS IN BENDING TESTS

Cassiano Barros¹; Gustavo Violin¹; Ramon Vilela Bergamin¹; Nilson Tadeu Mascia¹; Sergio Adati¹

¹ Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

Palabras clave / Palavras-chave:

Bending stiffness, Experimental analysis, Failure modes, Micro-notches, Shear stiffness

Resumen / Resumo:

O emprego da madeira como elemento estrutural, especialmente em produtos engenheirados, está recebendo crescente destaque em todo o mundo, sobretudo devido à sua natureza sustentável, tema amplamente discutido atualmente. Painéis de madeira engenheirada em CLT (*Cross Laminated Timber*) têm sido cada vez mais adotados em aplicações para pisos e paredes em construções ao redor do mundo. Como o CLT é um produto de destaque nessa área, a caracterização das propriedades estruturais desses elementos é de extrema importância. Nesse sentido, este trabalho objetiva realizar a caracterização mecânica de placas de CLT por meio da análise da rigidez à flexão e ao cisalhamento de placas de CLT em situação de momento fletor positivo e negativo, através de ensaios de flexão à quatro pontos e à três pontos, respectivamente. Estes compõem um conjunto de investigações que farão parte do estudo de peças compostas de CLT-Concreto que, além da análise da flexão, visa estudar o comportamento de ligações (chapa expandida e microentalhes) entre os elementos e, portanto, a influência da presença dessas conexões também é discutida na análise dos resultados.

1. Introdução

Ao redor do mundo, cada vez mais são debatidos os impactos ambientais causados pelos seres humanos. Neste cenário, no setor da construção civil, destaca-se a madeira, graças a sua natureza sustentável. Somando-se a isso, a recente possibilidade de se construir edificações de grande porte com o uso da madeira engenheirada em âmbito mundial [1]. Um desses produtos é o CLT (*Cross Laminated Timber*), caracterizado pela disposição de camadas ortogonais de lamelas de madeira, coladas entre si, formando placas ou chapas. Essa configuração garante uma ação bidirecional, fazendo com que o CLT seja muito empregado como estrutura de paredes e pisos [2,3]. Além disso, por conta da alternância do sentido das lamelas, há uma redução no efeito da temperatura e da umidade no plano do painel, minimizando a aparição de rachaduras e do empenamento, criando um produto mais estável com relação à madeira serrada [4].

Este trabalho visa analisar a rigidez a flexão e ao cisalhamento de painéis de CLT, a fim de se realizar a caracterização das peças e assim utilizá-las em ensaios posteriores. Desta maneira, pretende-se contribuir para um maior entendimento em relação a esse produto engenheirado de madeira, além de auxiliar a comunidade científica e os profissionais da área.

2. Materiais e métodos

O procedimento experimental consiste em duas configurações de ensaios de flexão em placas de CLT para a obtenção das rigidezes efetivas à flexão e ao cisalhamento. Este procedimento faz parte de um subconjunto de ensaios que serão previamente executados a fim de se realizar a caracterização de placas compostas de CLT-Concreto ao longo da pesquisa.

2.1. Materiais

Foram ensaiados doze corpos de prova de CLT de cinco camadas feitos com madeira da espécie de *Pinus taeda*. A largura das peças é de 800 mm e a altura das seções transversais é de 155 mm. Os ensaios são divididos em seis corpos de prova para o caso de momento fletor positivo e seis para momento fletor negativo, contendo 4000 mm e 3000 mm de comprimento, respectivamente. Além disso, as peças já contêm os elementos que estabelecerão conjuntamente a conexão entre o CLT e o concreto: a chapa expandida e os microentalhes. A primeira é composta por um par de chapas perfuradas dispostas longitudinalmente no CLT fixadas através de uma usinagem (para o encaixe da chapa) com adição de adesivo estrutural. Já a segunda, proposta por Müller [6], diz respeito a recortes de pequenas dimensões (30 mm x 4 mm) no CLT em formato de dentes de serra, direcionados de forma a restringir o deslizamento entre a camada de concreto e o CLT.

2.2. Métodos

A metodologia adotada nesta pesquisa está descrita a seguir. Observa-se que os corpos de prova ainda serão utilizados para ensaios de placas compostas de CLT-Concreto, apenas 40% da carga máxima estimada.

2.2.1. Ensaio de flexão à quatro pontos

Para se avaliar o momento fletor positivo, foi realizado o ensaio de flexão à quatro pontos, seguindo a norma BS EN 16351:2015 [6]. Nesse ensaio a placa foi posicionada sobre dois roletes recebendo uma carga de um atuador hidráulico distribuída entre duas linhas de carga distantes entre si em 960 mm e equidistantes do centro do corpo de prova (Figura 1). Para aferir os deslocamentos verticais, foram utilizados cinco transdutores localizados no centro do vão, com três posicionados abaixo do corpo de prova e dois na galga metálica, para se obter os deslocamentos na zona de cortante nula.



Figura 1. Configuração do ensaio de flexão a quatro pontos

Para obter a rigidez dos corpos de prova foi utilizado o método dos deslocamentos, chegando-se nas Equações (1) e (2), as quais representam os valores da rigidez efetiva à flexão e ao cisalhamento, respectivamente.

$$EI_{ef} = \frac{\Delta P a l_1^2}{16 \cdot \Delta \delta_1} \quad (1)$$

$$GA_{ef} = \frac{24 \Delta P EI_{ef} \kappa a}{48 EI_{ef} \Delta \delta + (4a^2 - 3l^2) \Delta P a} \quad (2)$$

onde: EI_{ef} = rigidez efetiva à flexão, GA_{ef} = rigidez efetiva ao cisalhamento, ΔP = variação das cargas em 10% e 40% da carga de ruptura estimada, l = distância entre as vinculações, l_1 = distância entre os pontos de fixação da galga, a = distância entre as linhas de apoio e da carga, κ = coeficiente de forma (adotado 1,2 para seções transversais retangulares), $\Delta \delta_1$ = variação dos deslocamentos medidos na galga em 10% e 40% da carga de ruptura estimada, $\Delta \delta$ = variação dos deslocamentos no centro do vão em 10% e 40% da carga de ruptura estimada.

2.2.2. Ensaio de flexão à três pontos

Foram realizados ensaios de flexão à três pontos para se produzir momento fletor negativo, como mostra a Figura 2. Nesse caso, foi aplicada uma força ascendente nos corpos de prova por um atuador hidráulico posicionado abaixo da placa. Nota-se a presença de perfis metálicos conectados a barras, impedindo a translação vertical nas linhas de vinculação.

Para aferir os deslocamentos verticais foram utilizados cinco transdutores posicionados no centro do vão, a um quarto do vão e na região das vinculações. Analogamente a situação de momento positivo, a obtenção das rigidezes efetivas dos corpos de prova se deu pela utilização do método dos deslocamentos, de acordo com as Equações (3) e (4).

$$EI_{ef} = \frac{\Delta PL^3}{128(2\Delta\delta_2 - \Delta\delta_1)} \quad (3)$$

$$GA_{ef} = \frac{3\kappa\Delta PL}{4(11\Delta\delta_1 - 16\Delta\delta_2)} \quad (4)$$

onde EI_{ef} = rigidez efetiva à flexão, GA_{ef} = rigidez efetiva ao cisalhamento, ΔP = variação das cargas em 10% e 40% da carga de ruptura estimada, L = distância entre as vinculações, κ = coeficiente de forma (adotado 1,2 para seções transversais retangulares), $\Delta\delta_1$ = variação dos deslocamentos no centro do vão em 10% e 40% da carga de ruptura estimada subtraindo-se a média dos deslocamentos nas vinculações e $\Delta\delta_2$ = variação de deslocamentos a um quarto do vão em 10% e 40% da carga de ruptura estimada subtraindo-se a média dos deslocamentos nas vinculações.



Figura 2. Configuração do ensaio de flexão a três pontos

3. Resultados

Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1. Rigidez à flexão e ao cisalhamento das placas de CLT

Corpo de prova	Momento fletor positivo		Momento fletor negativo	
	EI_{ef} (N.m ²)	GA_{ef} (N)	EI_{ef} (N.m ²)	GA_{ef} (N)
1	2,24E+06	2,03E+07	3,17E+06	1,72E+07
2	3,13E+06	1,20E+07	3,05E+06	2,43E+07
3	3,17E+06	1,98E+07	3,04E+06	2,28E+07
4	2,83E+06	1,51E+07	2,63E+06	3,75E+07
5	2,68E+06	2,38E+07	3,09E+06	2,20E+07
6	3,06E+06	1,20E+07	2,99E+06	2,71E+07
Média	2,85E+06	1,72E+07	3,00E+06	2,52E+07
Desvio Padrão	3,54E+05	4,87E+06	1,89E+05	6,87E+06
Coeficiente de Variação (%)	12,41	28,35	6,30	27,30

4. Conclusões

A variação dos resultados obtidos pode ser atribuída a diversos fatores, como a presença de chapas expandidas com o adesivo estrutural, que pode ter enrijecido os corpos de prova, especialmente nos ensaios de flexão à três pontos, onde as chapas se encontravam na face tracionada do elemento; a variação das propriedades naturais entre as lamelas; a diferente natureza das metodologias dos ensaios utilizados. Da mesma forma, constata-se que em ambos os ensaios, um resultado próximo na rigidez à flexão média, com o ensaio de flexão à três pontos sendo 5,0 % maior. Contudo, houve uma diferença maior entre os resultados médios da rigidez do cisalhamento, sendo 31,7% menor para o ensaio de flexão à quatro pontos.

Agradecimentos

Agradecimento à Crosslam pelo fornecimento dos corpos de prova, à FECFAU/Unicamp pela condução dos ensaios e à CAPES (Proc. 88887.667893/2022-00) e ao CNPq (Proc.307202/2019-4 e 305363/2022-0) pelo apoio financeiro.

Referências

- [1] Low, P.L; Gao, S.; Ng, S.K. (2021) The adoption of mass-engineered timber (MET) in the Singapore construction industry: Barriers and drivers. J. Clean. Prod. 327. doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129430
- [2] Destefano, J. (2020) Timber Structures: Tales of Engineering, Architecture, and Carpentry. DeStefano & Chamberlain. Fairfield. 38 p.
- [3] Harte, A. M. (2017) Mass timber – the emergence of a modern construction material. J. Struct. Integr. Maint. 2:121–132. 10.1080/24705314.2017.1354156
- [4] Jeska, S.; Pascha, K. (2015) Emergent Timber Technologies: materials structures engineering projects. Birkhäuser. Basel.
- [5] Comité Européen de Normalization (2015) BS EN 16351. Timber structures: Cross laminated timber. European Committee of Standardization (CEN), Brussels, Belgium.
- [6] Müller, K. (2020) Timber-concrete composite slabs with micro-notches. Tese de doutorado. ETH Zurich, Zurich, 29 p. <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000474874>

1029

CARACTERIZACIÓN DE MADERA ASERRADA PROVENIENTE DE ARBOLES SINIESTRADOS DE *PINUS RADIATA* D.DON

Gerson Rojas Espinoza¹; Francisco Vergara González¹; José Navarrete Araya¹; Mario Núñez-Decap¹

¹ Universidad del Bío-Bío

Palabras clave / Palavras-chave:

Cepillado, Densidad básica, Incendios, Módulo de elasticidad, Rugosidad

Resumen / Resumo:

El efecto de un incendio forestal sobre árboles de *Pinus radiata* D. Don, supone casi una pérdida total para las pymes, daño que no es comparable a aquel experimentado por las grandes empresas forestales. La escasa o nula información del impacto del incendio forestal sobre las características y propiedades de estos árboles, en general, ha limitado el potencial uso de este recurso como materia prima para la fabricación de productos de mayor valor destinados principalmente a la industria de la construcción. El presente resumen presenta los principales resultados obtenidos de la caracterización de la densidad, el módulo de elasticidad y la calidad superficial de madera aserrada, obtenida de árboles siniestrados de *Pinus radiata* D. Don talados después de 6 meses post-incendio. Los resultados mostraron que el nivel de daño de los arboles siniestrados, no tuvo, en general, un efecto estadísticamente significativo sobre la densidad y módulo de elasticidad, comparado con los resultados obtenidos en madera aserrada proveniente de árboles no siniestrados. Tampoco tuvo un efecto estadísticamente significativo sobre la calidad superficial de la madera siniestrada tanto cepillada, como lijada. Estos resultados son promisorios y permitirán a las empresas madereras, en particular, a las pymes forestales y madereras, disponer de información valiosa para tomar decisiones informadas de compra y venta que mejoren el valor de recuperación de este nuevo tipo de materia prima.

1. Introducción

La utilización principal de los árboles siniestrados (quemados) de *Pinus radiata* D. Don crecidos en Chile, en general, está asociada principalmente a la fabricación de astillas para combustible. Mas aun, el precio por m³ de trozos siniestrado puede disminuir hasta un 40 % dependiendo del diámetro y nivel de deterioro o daño, respecto al precio de trozos normales. En esta dirección, la escasa información reportada en la literatura con respecto a las características de la madera proveniente de bosques siniestrados, en general, hace referencia solo a algunas especies de coníferas, tales como *Pinus tadea* [1], *Pino Oregón* [2], *Pinus contorta* y *Pinus ponderosa* [3], *Pinus sylvestris* [4]. Dado lo anterior, la escasa o nula información sobre las propiedades y características de la madera aserrada obtenida a

partir de árboles siniestrados de *Pinus radiata* D. Don crecido en Chile, hace pensar que, si existiera esta información, se podría evaluar el uso de este tipo de árboles como materia prima para fabricar productos de mayor valor agregado destinados principalmente a la industria de la construcción y como consecuencia aumentar el valor de recuperación de los bosques siniestrados. Es por esta razón que el objetivo de esta investigación fue caracterizar la madera aserrada de *Pinus radiata* D. Don proveniente de árboles de bosques siniestrados de la región del Bío-Bío.

2. Materiales y metodología

2.1. Materiales

Treinta y seis árboles en pie de *Pinus radiata* D. Don de 22 años con seis meses de permanencia en el bosque post-incendio, fueron seleccionados y talados del fundo “El Gomero”, ubicado en las cercanías de la comuna de Yumbel, de propiedad de la empresa Forestal Mininco (Figura 1-a). De estos árboles, veinte y cuatro correspondieron a árboles siniestrados con nivel de daño II y III, de acuerdo con la clasificación establecida en [1]. Los doce árboles restante correspondieron a árboles de control que no fueron afectados por el siniestro. De cada árbol de altura H , se consideraron dos trozos por árbol; primer trozo correspondiente a H_1 y tercer trozo correspondiente a H_3 . Finalmente un total de 72 trozos de 4,4 m de longitud fueron utilizados para obtener el material de estudio. Estos trozos fueron transportados al Pabellón de Tecnología de la Madera (PTM) del Departamento de Ingeniería en Maderas de la Universidad del Bío-Bío (Figura 1-b), donde fueron procesados en una máquina de sierra huincha con carro (Figura 1-c) para obtener madera aserrada.



Figura 1. (a) Árboles siniestrados; (b) Trozos siniestrados; (c) Procesamiento de trozos.

2.2. Metodología

2.2.1. Fabricación de probetas para ensayos

La madera aserrada obtenida fue secada hasta alcanzar un contenido de humedad promedio de 12 %, en el Laboratorio de Secado y Tratamientos térmicos. La preparación de las probetas para la determinación de las propiedades físicas y mecánicas fue realizada siguiendo los protocolos de las normas en las normas NCh 968 of. 86, NCh 176 1/of. 84, NCh 987 of. 87. Los ensayos de flexión estática fueron realizados en una maquina Universal Instron del Laboratorio de Materiales compuestos, de la Universidad del Bío-Bío.

La norma ASTM 1666-87 (2004) fue utilizada como referencia para la preparación de las probetas para la evaluación de la calidad superficial de la madera cepillada y lijada. Las probetas obtenidas fueron acondicionadas en una sala de clima por un periodo aproximado de 2 meses.

2.2.2. Calidad superficial

La calidad superficial de la madera aserrada cepillada y lijada fue evaluada a través de la medición de la rugosidad (Ra), utilizando un instrumento denominado rugosímetro de contacto.

Se analizó los efectos principales del factor nivel de daño del árbol y el factor altura del trozo a través de un diseño factorial 3x2. Para evaluar la significancia estadística de estos efectos se realizó un análisis de varianza (ANDEVA). Para comparar las medias y determinar diferencias significativas entre ellas, se realizó una prueba LSD al 95% de confianza.

3. Análisis de resultados

3.1. Propiedades Físicas y Mecánicas

En la Tabla 1 se presentan los resultados obtenidos para la densidad básica y flexión estática (MOE y MOR) en función del nivel de daño, altura del trozo en árbol, para madera madura (MM) y madera juvenil (MJ). En esta tabla se observa que los valores de densidad básica variaron entre 0.34 y 0.46 g/cm³, valores normales para esta especie. De acuerdo con el análisis estadístico realizado para la densidad de la madera no se observó diferencias estadísticas significativas considerando el nivel de daño de los árboles, mientras que la altura del trozo si presentó un efecto estadísticamente significativo. Con respecto a la flexión estática, los resultados, en general, indicaron que el módulo de elasticidad (MOE) y módulo de ruptura (MOR) no es afectado significativamente por el tipo de daño y altura del trozo.

Tabla 1. Densidad básica y resistencia a la flexión estática de madera aserrada siniestrada y de control.

Daño	altura	Densidad (g/cm ³)		MOE (Mpa)		MOR (Mpa)	
		MM	MJ	MM	MJ	MM	MJ
Control	H1	0.44 a(0.03)	0.39 a(0.04)	7766 a(1357)	6213 a(1590)	79.2 a(10.5)	62.7 a(12.2)
	H3	0.42 a(0.05)	0.35 a(0.05)	7013 a(935)	5953 a(441)	69.5 a(11.7)	59.7 a(8.8)
Daño II	H1	0.46 a(0.02)	0.42 a(0.05)	7096 a(1014)	5376 a(1243)	71.6 a(7.2)	59.1 b(14.8)
	H3	0.42 a(0.05)	0.38 a(0.02)	6999 a(1051)	4837 b(647)	70.2 a(10.0)	58.5 b(15.6)
Daño III	H1	0.43 a(0.03)	0.36 a(0.02)	7189a (867)	5975 a(1191)	73.7 a(9.0)	65.1 a(12.4)
	H3	0.38 a(0.02)	0.34 a(0.03)	6560a (964)	5417 a(673)	64.9 a(14.0)	58.5 a(9.6)

Valores promedios correspondientes a 288 probetas evaluadas.

Los valores entre paréntesis corresponden a la desviación estándar

Letras iguales en filas y columnas indica que no existen diferencias estadísticas significativas al 95% de nivel de confianza.

3.2. Evaluación de la calidad superficial

Los resultados obtenidos de la medición de la rugosidad (Ra) para la madera cepillada y lijada en la dirección radial (MR) y tangencial (MT), para los diferentes niveles de daño y altura de los trozos se presentan en la Tabla 2. En esta tabla se observa que los valores de rugosidad variaron entre 2.42 μm y 4.04 μm . En general, los resultados del análisis estadístico indicaron que la rugosidad medida en la superficie de la madera cepillada y lijada no es afectada por el nivel de daño de los árboles y tampoco por la altura de los trozos, para las condiciones de corte utilizadas durante el cepillado y lijado de la madera.

Tabla 2. Resultados de rugosidad (μm) obtenidos para madera cepillada y lijada siniestrada y de control.

Daño	Altura	U	Cepillado		U	Lijado	
			MR	MT		MR	MT
Control	H1	6	2.57 a(0.31)	2.42 a(0.21)	4.5	3.22 a(0.32)	3.33 a(0.49)
	H3		2.62 a(0.18)	2.58 a(0.31)		3.75 a(0.63)	3.16 a(0.29)
	H1	12	3.20 b(0.29)	3.32 b(0.28)	9.0	4.03 b(0.57)	3.89 b(0.56)
	H3		3.41 b(0.26)	3.33 b(0.29)		3.54 a(0.61)	3.67 a(0.35)
Daño II	H1	6	2.76 a(0.25)	2.60 a(0.23)	4.5	2.82 a(0.35)	2.88 a(0.37)
	H3		3.09 a(0.42)	2.80 a(0.34)		2.92 a(0.39)	2.92 a(0.38)
	H1	12	3.10 b(0.28)	3.11 b(0.29)	9.0	3.54 b(0.66)	3.63 b(0.32)
	H3		3.09 b(0.42)	2.80 a(0.34)		3.22 b(0.39)	3.40 b(0.35)
Daño III	H1	6	2.88 a(0.36)	2.73 a(0.21)	4.5	2.99 a(0.39)	2.98 a(0.34)
	H3		3.01 a(0.30)	2.98 a(0.35)		2.79 a(0.38)	2.93 a(0.37)
	H1	12	3.16 a(0.32)	3.25 b(0.32)	9.0	3.40 b(0.41)	3.29 b(0.41)
	H3		3.66 b(0.37)	3.18 b(0.35)		3.38 b(0.44)	3.27 b(0.33)

U corresponde a la velocidad de avance de la madera (m/min).

Valores promedios correspondientes a 288 probetas evaluadas.

Los valores entre paréntesis corresponden a la desviación estándar.

Letras iguales en filas y columnas indica que no existen diferencias estadísticas significativas al 95% de nivel de confianza.

4. Conclusiones

Los resultados obtenidos de este estudio para la madera siniestrada de *Pinus radiata* son promisorios, dada la escasa información disponible de las características asociadas a esta especie y que, además, en el sector maderero existe la hipótesis que la madera siniestrada pierde sus propiedades dada la exposición a fuentes de calor durante el incendio. Esto no fue observado en los resultados obtenidos bajo las condiciones de los árboles evaluados en este estudio.

En este sentido sería interesante caracterizar árboles siniestrados con mayor tiempo de permanencia en el bosque post-incendio y evaluar el potencial de este nuevo tipo de materia prima en la fabricación de productos de mayor valor destinados a la industria de la construcción.

Agradecimientos

Los autores agradecen al personal del Pabellón de Tecnología de la Madera del Departamento de Ingeniería en Maderas de la Universidad del Bío-Bío por su asistencia durante el aserrío de las trozas siniestradas y de control de *Pinus radiata* y a la empresa Forestal Mininco S.A., una empresa CMPC, por proveer las trozas siniestradas y de control para este estudio. Esta investigación fue financiada por el Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico de Chile, a través del proyecto Fondef IDeA N° ID16I10475.

Referencias

- [1] Bortoletto J.; Moreschi J. (2003) Physical-Mechanical Properties and chemical composition of Pinus tadea mature wood following a forest fire. Bioresource Technology 87(3) Pp 231-238.
- [2] Moya L.; Winandy J.; William T.; Ramaswamy S. (2007) Use of fire-impacted tres for orientend strandboards. Forest Products Journal 58(6) Pp.
- [3] Linton J.; Barnes H.; Seale R.; Jones P.; Lowell E.; Hummel S. (2010) Suitability of live and fire-killed small-diameter ponderosa and lodgepole pine trees for manufacturing a new structural wood composite. Bioresource Technology 101 (2010) Pp 6242-6247.
- [4] Akgul, M. ; Ayrimis N. ; Camlibel O. ; Korkut S. (2013) Potential utilization of burned wood in manufacture of medium density fiberboard. J. Mater Cycles Waste Manag (15) Pp 195-201.

1030

CARACTERIZACIÓN DEL CLON MC DE CHOPO Y VIABILIDAD PARA SU USO ESTRUCTURAL COMO VIGA LAMINADA. INFLUENCIA DEL TURNO DE CORTA

Yaiza Fuentes García¹; Francisco J. Rescalvo¹; Mônica Ruy²; María Portela Barral²; Jose Antonio Lorenzana Fernández²; Carlos Cruz Rodríguez¹; M^a Belén Feijóo Lombao²; Ánxel Vidal Sánchez²; Manuel Guaita Fernández²; Antolino Gallego Molina¹

¹ Universidad de Granada

² Universidad de Santiago de Compostela;

Palabras clave / Palavras-chave:

Ensayos mecánicos, Industria, Madera técnica, Populicultura

Resumen / Resumo:

Este trabajo presenta un análisis prolijo de las propiedades mecánicas de la madera de chopo del clon MC procedente de dos ubicaciones y turnos de corta diferentes: cuenca del Guadalquivir-9 años y la cuenca del Ebro-15 años. El proceso de caracterización de madera aserrada incluyó: i) clasificación visual; ii) evaluación mediante métodos acústicos no destructivos; iii) ensayos en máquina de compresión, flexión y tracción. Con el fin de evaluar el uso de esta madera como producto de madera técnica, se elaboraron vigas laminadas con uniones dentadas. Este trabajo presenta una comparativa exhaustiva a nivel de caracterización mecánica y de producto final de viga laminada. Como principal resultado, se observa que la solución estructural de vigas laminadas permite homogeneizar las propiedades mecánicas independientemente de la procedencia y edad.

1. Introducción

En la actualidad, el sector de la construcción representa el 38% del dióxido de carbono (CO₂) emitido a la atmósfera [1] debido al uso excesivo de cemento. Si se equipara la industria del cemento con un país, sería el tercer emisor de dióxido de carbono del mundo con aproximadamente 2.800 Mt, el tercero del mundo después de China y Estados Unidos [2]. Todo esto hace del sector de la construcción uno de los puntos clave para reducir dichas emisiones.

La madera es un material capaz de absorber una importante cantidad de CO₂ en comparación con los materiales convencionales, posee la capacidad de producir oxígeno, consume poca energía en su fabricación y, es renovable y biodegradable. La madera de chopo es un recurso natural con un bajo turno de corta (plantación) en comparación con otras especies como el pino o el abeto (forestal). Esta madera es ampliamente utilizada en una gran variedad de aplicaciones, incluyendo principalmente la construcción y la industria del mueble. La calidad y las propiedades mecánicas de esta madera pueden variar significativamente según diversos factores.

Tradicionalmente, la madera de chopo se empleó en el sector de la construcción como madera de rollizo o para andamiaje. Su diámetro limitado relegaba a esta madera a su uso en forjados de pequeñas luces. Sin embargo, su bajo módulo de elasticidad frente a otras especies relegó a esta madera a otros sectores como el del contrachapado o el embalaje, sectores de muy bajo valor añadido. Actualmente, los productos de madera técnica como las vigas laminadas [3] han permitido dar un salto tecnológico en la eficacia del uso del recurso, pudiéndose elaborar vigas sin limitación de canto o luz. Gracias a la tecnología de las uniones dentadas, es posible unir tablas en sentido longitudinal, además de sanear defectos presentes en la madera como nudos, fendas, gemas, etc.

El presente estudio se enfoca en la caracterización mecánica de la madera de chopo (*Populus x euramericana* (Dode) Guinier) del clon MC procedente de dos procedencias geográficas representativas a nivel nacional. Se propone analizar en detalle las características mecánicas de la madera aserrada, así como su viabilidad para elaboración de vigas laminadas para uso estructural. La investigación permitirá comparar y evaluar el efecto de la diferencia geográfica y del manejo forestal en las propiedades mecánicas tanto de madera aserrada como de viga laminada.

2. Materiales y métodos

2.1.Descripción de parcelas

Se examinaron las propiedades mecánicas de la madera de chopo procedente de 2 regiones geográficas diferentes: Granada, que representa a la cuenca del Guadalquivir, y Navarra, que representa a la cuenca del Ebro. Estas áreas se identificaron como MC9 y MC15, respectivamente. En la Tabla 1 se exponen las características principales de las plantaciones. En ambos casos se obtuvieron trozas de 2500 mm de longitud.

Tabla 1. Propiedades de las plantaciones de chopo

Código	Ubicación	Coordenadas UTM	Año de plantación	Turno corta (años)	Marco de plantación (m)	(cm)	(m³)
MC9	Pedro Ruiz (Granada)	37°13'10.8" N 3°44'36.0"W	2012	9	4x5	26,6	0,7
MC15	Marcilla (Navarra)	42°18'30.2"N 1°44'29.3"W	2008	15	6x6	47	2,53

2.2.Aserrado

En ambos casos, se obtuvieron diferentes secciones de aserrado atendiendo al destino final, siendo: 1) caracterización de madera aserrada – ensayos a flexión y compresión; 2) caracterización de madera aserrada – ensayos a tracción; 3) elaboración de vigas laminadas.

En el caso de 1), se aserraron piezas de sección 85 x 145 mm con una longitud de 2500 mm. En el caso 2), se obtuvieron secciones de 50 x 140 mm y 40 x 120 mm con una longitud en ambos casos de 2500 mm. Este caso se enmarca dentro de un estudio más amplio para la introducción del clon MC en la norma UNE-EN 1912:2012 [4] para madera de uso estructural. Por último, para el caso 3) se extrajeron tablas de sección 50 x 100 mm y longitud 2500 mm. Tras la corta de cada procedencia se

realizó el secado de la madera por oreo hasta alcanzar un contenido de humedad de $10 \pm 2\%$. Para todos los casos, se llevaron a cabo ensayos acústicos de resonancia, obteniendo el módulo elástico dinámico longitudinal (MoE_{din}). Se obtuvo la distribución normal para ambos clones, con un valor medio de MoE_{din} de 9134 N/mm^2 y una desviación estándar de $\pm 637 \text{ N/mm}^2$ para MC9, y de 9365 N/mm^2 y una desviación estándar de $\pm 859 \text{ N/mm}^2$ para MC15. En cualquiera de los casos, las piezas fuera del rango de la desviación estándar fueron desechadas para el presente trabajo.

2.3. Elaboración de vigas laminadas

Para cada procedencia (MC9 y MC15), se elaboraron 10 vigas laminadas con una sección final de $75 \times 150 \text{ mm}$ y una longitud de 3000 mm , compuestas por 6 láminas de 25 mm de espesor cada una. El proceso de elaboración, de uniones dentadas y la orientación de la médula se establecieron siguiendo la norma UNE-EN 14080:2022 [5].

2.4. Ensayos no destructivos

En primer lugar, se clasificó la madera visualmente mediante la norma UNE 56544:2022 [6], al no existir a día de hoy unos requisitos normalizados para la caracterización visual de chopo. Seguidamente, tanto para caracterización de madera aserrada como para vigas laminadas se empleó el método acústico de resonancia para obtener los módulos elásticos dinámicos longitudinal y a cortante, MoE_{din} y G_{din} , respectivamente. En cualquier caso, los valores obtenidos se corrigieron para una humedad del 12% siguiendo la norma UNE-EN 384:2016 [7].

2.5. Ensayos destructivos

2.5.1. Caracterización de madera aserrada

Seguendo la norma UNE-EN 408:2011 [8], se realizaron ensayos a flexión a 4 puntos, compresión paralela a la fibra, compresión perpendicular a la fibra y tracción. Los ensayos de tracción se realizaron en las instalaciones de la Plataforma de Ingeniería de Madera Estructural (PEMADE) en Lugo. El resto de los ensayos se realizaron en el laboratorio de la Unidad de Ingeniería de la Madera de Andalucía (UIMA) en Granada. La Figura 1 muestra una imagen de cada tipo de ensayo. Para cada propiedad mecánica se ensayaron al menos 25 especímenes.

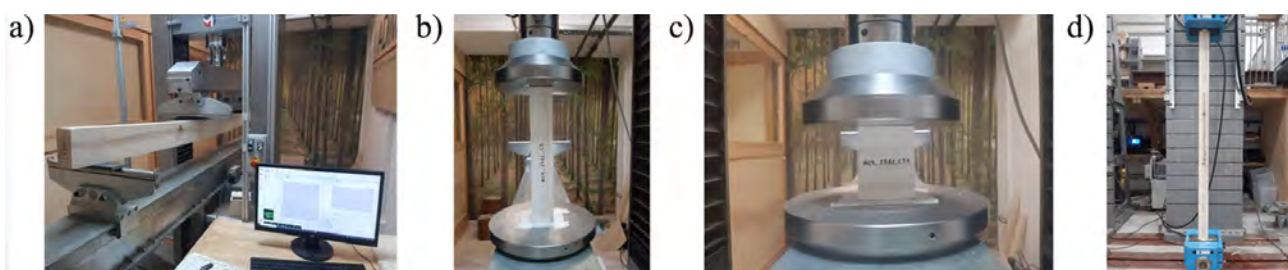


Figura 1. Ensayos realizados para la caracterización de madera aserrada. a) Flexión. b) Compresión paralela a la fibra. c) Compresión perpendicular a la fibra. d) Tracción.

2.5.2. Ensayos de viga laminada

Se realizaron ensayos a flexión a 4 puntos siguiendo la norma UNE-EN 408:2011 [8], colocando un LVDT en el centro de la viga para el cálculo de la flecha máxima y el módulo de elasticidad estático global (MoE_{global}). Estos ensayos se llevaron a cabo en el laboratorio de la Unidad de Ingeniería de la Madera de Andalucía (UIMA) en Granada. Tras los ensayos a flexión y siguiendo las indicaciones de la norma UNE-EN 14080, se extrajeron probetas de las zonas cercanas a la rotura para su ensayo a cortante en línea de cola. La Figura 2 muestra una imagen de cada tipo de ensayo. Todas las propiedades mecánicas se corrigieron según la norma UNE-EN 384:2016 [7].



Figura 2. Ensayos realizados a las vigas laminadas. a) Flexión. b) Cortante por línea de cola.

3. Resultados

Respecto de la clasificación visual, se han obtenido resultados similares entre procedencias, resultando para ambos casos el 60% de las muestras clasificadas como ME-1 (alta calidad) y el 40% restante para ME-2 (baja calidad).

Respecto de la caracterización de madera aserrada, la resistencia a flexión ha sido muy parecida para ambos casos con una resistencia característica a flexión ($f_{m,k}$) de 51 y 52 N/mm² para MC9 y MC15, respectivamente. En cuanto a la rigidez a flexión (MoE_{global}) las vigas de MC15 aportan un 6% más de rigidez con respecto al MC9. Un aspecto relevante es el de la densidad, ya que a pesar de aparentar comportamientos muy similares el MC15 posee un 6% más de densidad con respecto a MC9, lo que influye directamente en los valores obtenidos a compresión paralela ($E_{c,0}$) y perpendicular a la fibra ($E_{c,90}$). Siendo para MC15 superior en un 28% y 49% respectivamente. Finalmente, los valores de resistencia a tracción ($f_{t,0}$) son muy elevados. Sin embargo, es la rigidez la que limita a esta especie con una clase resistente final T10.

Respecto de los resultados de vigas laminadas, el módulo de rotura (MOR) de MC15 es un 18% mayor al MC9. Los resultados obtenidos del MoE_{din} fueron bastante próximos con la rigidez de MC15 superando por un 3% al MC9. Mientras que el módulo de elasticidad a flexión (MoE_{global}), se observó que las vigas MC15 aportaron una rigidez un 4% mayor que las MC9.

Tabla 2. Propiedades mecánicas de las vigas laminadas MC9 y MC15

Código	MOR (N/mm ²)	MoE_{din} (N/mm ²)	G_{din}	MoE_{global} (N/mm ²)
MC9	32	9255	847	8880
MC15	39	9498	777	9245

4. Conclusiones

Ha quedado demostrada la importancia tanto de la edad como de una apropiada silvicultura en la clasificación visual y en las propiedades mecánicas de madera aserrada, siendo notable la diferencia en módulo elástico del 6% más del MC15 respecto del MC9. Sin embargo, la fabricación de vigas laminadas y el saneado de las uniones dentadas introducen una homogeneización del producto final. Esto se traduce en que en el caso de las vigas laminadas MC9, a pesar de poseer unas condiciones de silvicultura algo inferiores y ser madera de menor edad, a nivel de producto de madera técnica ambas procedencias ofrecen prestaciones mecánicas muy similares. Es importante remarcar que una correcta silvicultura no solo afecta a las propiedades mecánicas, sino también a los rendimientos de aserrado y al aprovechamiento óptimo del recurso.

Por otro lado, queda patente que el chopo puede volver a ser introducido en norma, traduciéndose en una clase resistente T10. Esto ha quedado claramente demostrado con las vigas laminadas presentadas en este trabajo, siendo clasificadas como GL20h y correspondiéndose a lo que dicta la norma UNE-EN 14080:2022-Tabla 3 [5].

Agradecimientos

Los autores agradecen el soporte del proyecto europeo LIFE Wood for Future (<https://life-woodforfuture.eu/>) (LIFE20-CCM/ES/001656), SmartTimber (PID2020.114386RB.I00) y al laboratorio acreditado ENAC de PEMADE (Lugo).

Referencias

- [1] United Nations Environment Programme (2020). 2020 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector. Nairobi.
- [2] Watts, J. (2019, 4 marzo). Cemento: el material más destructivo de la Tierra. elDiario.es. https://www.eldiario.es/internacional/theguardian/cemento-material-destructivo-tierra_1_1675968.html
- [3] Gong, M. (2021). Wood and engineered wood products: stress and deformation. Engineered Wood Products for Construction. <https://doi.org/10.5772/intechopen.101199>
- [4] UNE-EN 1912:2012. Madera estructural. Clases resistentes. Asignación de calidades visuales y especies. Asociación Española de Normalización (UNE), Madrid, España.
- [5] UNE-EN 14080:2022. Estructuras de madera. Madera laminada encolada y madera maciza encolada. Requisitos. Asociación Española de Normalización (UNE), Madrid, España.
- [6] UNE 56544:2022. Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas. AEN/CTN 56 Madera y Corcho, Madrid, España.
- [7] UNE-EN 384:2016+A2:2023. Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad. Asociación Española de Normalización (UNE), Madrid, España.
- [8] UNE-EN 408:2011+A1:2012. Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas. Asociación Española de Normalización (UNE), Madrid, España.

1031

CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO A FLEXIÓN DE LOSAS MIXTAS DE HORMIGÓN LIGERO Y MADERAS LAMINADAS LOCALES

Felipe Pedro Álvarez Rabanal¹; Alfonso Lozano Martínez-Luengas¹; Juan Enrique Martínez Martínez¹; Mar Alonso Martínez¹; Juan José Del Coz Díaz¹

¹ Universidad de Oviedo

Palabras clave / Palavras-chave:

Construcción Sostenible, Ensayo de Flexión, Forjado Colaborante, Madera Laminada Encolada, Rigidez a flexión

Resumen / Resumo:

Las losas mixtas de hormigón y madera (TCC) unidas mediante conectores son elementos constructivos sostenibles y estructuralmente eficientes, ya que combinan la resistencia a la compresión del hormigón con la resistencia a la flexión la madera laminada. Sin embargo, los estudios actuales se centran en el uso de maderas laminadas encoladas (MLE) de coníferas importadas del norte de Europa, con el consiguiente incremento al efecto de los gases de efecto invernadero (GEI) generados por su transporte, y en la determinación de su comportamiento mecánico en función del tipo de conector utilizado. El objetivo de este trabajo es el de avanzar científica y tecnológicamente en el conocimiento de TCCs fabricados con MLE locales para impulsar su uso en el sector de la construcción y poder reducir así su contribución de CO₂ al efecto de los GEI. Se realizó un estudio experimental para comparar el comportamiento a flexión de TCCs conectadas mediante conectores metálicos inclinados en disposición cruzada y fabricadas con hormigón ligero estructural (HLE) y maderas locales (castaño y pino) y del norte de Europa (abeto). Durante las pruebas, se identificaron mecanismos de fallo en la losa de HLE debidos a esfuerzos cortantes en las zonas de conexión con la MLE, y en las vigas de MLE por una combinación de esfuerzos de flexión y tracción. Se pudo observar en los resultados un mejor comportamiento a flexión de los TCCs fabricados con maderas locales, mostrando una mayor capacidad portante antes de rotura del 29.85% (castaño) y del 16.40% (pino).

1. Introducción

El sector de la construcción en Europa representa en la actualidad el 36% de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) [1], por lo que gobiernos e instituciones promueven el uso de materiales alternativos a los tradicionales, hormigón y acero, que reduzcan las emisiones de CO₂ al ambiente. Como alternativa, los productos derivados de la madera surgen como materiales naturales con la capacidad de almacenar CO₂ durante su ciclo de vida. Sin embargo, para optimizar esta ventaja, la madera debe ser utilizada tan cerca de su fuente como sea posible para evitar emisiones de carbono

excesivas de los medios de transporte [2]. En la actualidad, un 90% de la madera utilizada en la construcción en España proviene del norte de Europa, por lo que se debe tener en consideración la contribución al efecto de los GEI el CO₂ generado en su transporte.

Las estructuras mixtas de madera y hormigón (TCC) son estructuralmente muy eficientes al combinar los beneficios de la madera en tracción y del hormigón en compresión, al tiempo que reduce el peso de la estructura manteniendo su capacidad portante [3]. Además, el uso de hormigón ligero estructural (HLE) en estructuras mixtas mejora su rendimiento estructural, la eficiencia energética y su aislamiento acústico, térmico y contra incendios [4]. En este tipo de estructuras, el conector es el que transfiere el esfuerzo cortante longitudinal en la interfaz para garantizar su funcionamiento como forjado colaborante. Los conectores con disposición cruzada e inclinada es la conexión más utilizada debido a su excelente rendimiento a cortante y a su rápido proceso de instalación [3]. Diferentes autores han realizado estudios del comportamiento a flexión de los TCCs, identificando los mecanismos de fallo tanto a tracción en la viga laminada, fundamentalmente fabricada con madera de conífera, como a cortante en la losa de hormigón [5,6]. De igual forma, en la normativa actual, tanto a nivel nacional como europeo, el comportamiento de los TCCs está contemplado en alguno de los supuestos de cálculo solamente para maderas de conífera.

El principal objetivo de este trabajo es avanzar científica y tecnológicamente en el conocimiento de los TCCs para impulsar su aplicación en construcción industrializada y su implementación en los códigos y normativas de referencia. Se propone estudiar la resistencia a flexión de TCCs elaborados con losas de HLE y 3 tipos diferentes de vigas de madera laminada encolada (MLE), dos locales y una importada, unidas con conectores metálicos inclinados en disposición cruzada. Con los resultados obtenidos, se realizará una comparativa del comportamiento mecánico a flexión de los diferentes tipos de losa ensayados, y se identificarán sus modos de fallo.

2. Materiales y métodos

Cada una de las muestras utilizadas para realizar los ensayos de flexión están compuestas por dos viguetas de MLE, una losa de HLE y conectores metálicos en disposición cruzada. Las dimensiones y las conexiones del conjunto son las que se muestran en la Figura 1. Para las viguetas de MLE (clase resistente GL24h [7]) se utilizaron tres tipos de madera con un contenido en humedad promedio del 11.5%: Abeto importado del norte de Europa (*Picea Abies*), Pino (*Pinus Insignis*) y Castaño (*Castanea Sativa*), cuyas propiedades se indican en la Tabla 1. La losa de HLE fue fabricada utilizando cemento CEM II/A-V 42.5 R, arena sílice de 0-2 mm de diámetro y arcilla expandida de 1-10 mm de diámetro. Las propiedades mecánicas del hormigón se determinaron según UNE-EN 12390-3 y UNE-EN 12390-13, obteniéndose una densidad aparente de 1790 kg/m³, un módulo elástico de 19803 MPa y una resistencia característica a compresión de 23.61 MPa. La conexión entre ambos elementos se realizó mediante conectores de acero al carbono zincado galvanizado de 9 mm de diámetro y 240 mm de longitud (CTC9240 de Rothoblaas®), colocados a 45° respecto a la horizontal, con un Momento Plástico Característico ($M_{y,k}$) de 38 Nm. Los pares de conectores colocados en los extremos, donde se produce un mayor efecto cortante, se situaron a 150 mm, mientras que los pares de conectores colocados en la zona central se separaron 300 mm. Se ensayaron a flexión 4 muestras para cada tipo de MLE utilizada.

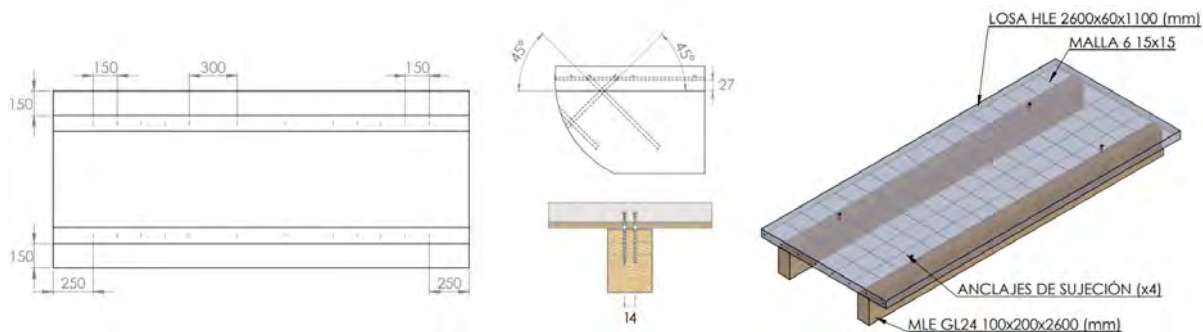


Figura 1. Dimensiones y montaje de las losas mixtas ensayadas (en mm)

Tabla 1. Propiedades de las MLEs (Fuente: Fabricante/Distribuidor)

Madera	Fabricante / Distribuidor	Densidad (kg/m ³)	Módulo Elástico (MPa)		Resistencia a Flexión (MPa)	Resistencia a Tracción (MPa)		Resistencia a Compresión (MPa)	
			E _{0,g,mean}	E _{90,g,mean}		f _{t,0,g,k}	f _{t,90,g,k}	f _{c,0,g,k}	f _{c,90,g,k}
Abeto	SIEROLAM	380	11600	320	24	16.5	0.4	24	2.7
Pino	EGOIN	420	11500	300	24	19.2	0.5	24	2.5
Castaño	SIEROLAM	540	13000	1400	30	20	0.7	45	5.5

Las muestras se ensayaron a flexión en cuatro puntos con un actuador hidráulico de 750 kN, utilizando una velocidad de carga de 0.15 kN/s hasta rotura de las losas. En la Figura 2 se indica la disposición de los puntos de medición en las muestras ensayadas. Se utilizaron 5 medidores de desplazamiento (LVDT), 2 de los cuales se colocaron en la zona central de la losa para determinar el desplazamiento vertical producido, y el resto se colocaron en el extremo final de las vigas, para medir el deslizamiento relativo producido entre la losa de HLE y las vigas de MLE. Para medir las tensiones producidas en las zonas de tracción y compresión, se utilizaron 4 galgas extensométricas, dos de ellas situadas en el centro del vano de la losa de HLE y las otras dos en la parte inferior del vano central de cada una de las vigas de MLE.

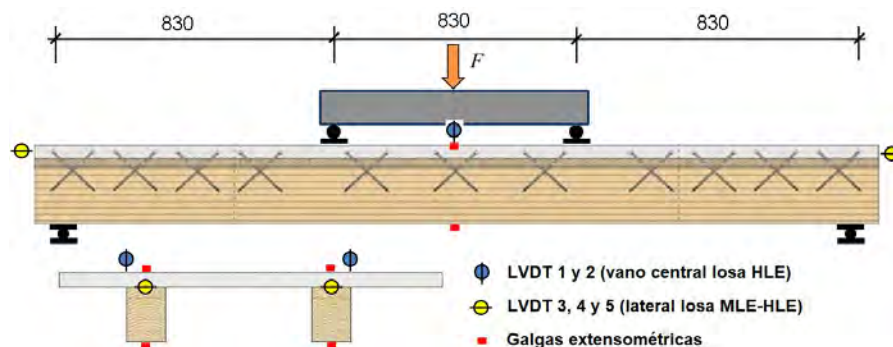


Figura 2. Configuración del ensayo y disposición de los elementos de medida (en mm)

3. Resultados

El comportamiento mecánico de las 12 losas ensayadas es similar hasta alcanzar los 90-100 kN, mostrando un comportamiento lineal en el gráfico carga-desplazamiento (ver Figura 3(a)). Una vez superado este valor, aparecen fisuras longitudinales en la zona de compresión (1^{er} y 2^o fallo), asociadas al incremento de deslizamiento lateral medido por los LVDT 3, 4 y 5. Estas fisuras se localizan en la zona de la conexión, tal y como se muestra en la imagen de la Figura 3(b). Como se puede observar en la Tabla 2, las cargas últimas de rotura alcanzadas por las losas fabricadas con MLE de castaño y pino son superiores en un 29.85% y un 16.40%, respectivamente, a las de abeto, presentando menores tensiones últimas de rotura en la MLE de abeto (20.16 MPa) y máximas en la de castaño (29.60 MPa). La relación entre la carga a la que se produce el 1^{er} fallo por esfuerzo cortante en la zona de compresión y la carga última de rotura debida a los esfuerzos combinados de flexión y tracción en la MLE es mayor en las losas mixtas fabricadas con MLEs locales (1.90 en el caso del castaño, 1.85 en el pino y 1.75 en el abeto).

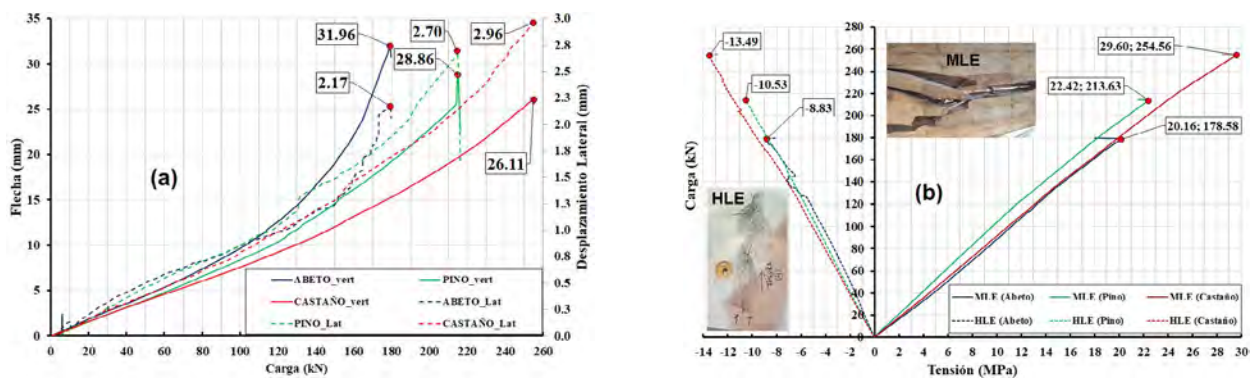


Figura 3. Valores promedio de (a) desplazamientos y (b) tensiones para cada tipo de losa mixta

Tabla 2. Valores promedio de carga y desplazamiento vertical para cada tipo de losa mixta

Losa de MLE	Velocidad de carga (kN/s)	1 ^{er} fallo		2 ^o fallo		Rotura	
		Carga (kN)	Flecha (mm)	Carga (kN)	Flecha (mm)	Carga (kN)	Flecha (mm)
Abeto	0.15	102.33	9.54	144.71	17.73	178.58	31.26
Pino	0.15	115.68	9.85	171.02	17.82	213.63	28.86
Castaña	0.15	133.98	10.47	203.65	18.17	254.56	26.11

4. Conclusiones

En este estudio, se ha demostrado la importancia que tiene en el comportamiento mecánico de los TCCs el tipo de MLE escogido para estos sistemas constructivos, en contraposición al estado del arte actual, en el que priman los trabajos sobre los tipos de conectores utilizados. Para ello, se realizaron ensayos de flexión a cuatro puntos con los que se determinó el comportamiento mecánico de TCCs fabricados con 3 tipos de MLEs unidas a losa de HLE con conectores cruzados inclinados. En el período inicial de carga, no se observó ningún deslizamiento relativo visible debido al efecto de conexión total en la interfaz. A medida que la carga iba aumentando, sobre el 55% de la carga de rotura se observó la aparición de fisuras en la dirección longitudinal de la losa de hormigón combinadas con un pequeño deslizamiento relativo lateral entre la losa de HLE y las vigas de MLE (1^{er} fallo), lo que es indicativo de una conexión parcial y de una reducción de la rigidez a flexión del conjunto. Cuando la carga aumentó a casi el 80% de la de

rotura, se produjo el fallo por efecto cortante en la parte superior de la losa de HLE (2º fallo), a lo largo de la posición de los conectores cruzados, momento en el que el sistema dejó de comportarse de forma colaborante. En último lugar, el mecanismo final de rotura de los TCCs se produjo por una combinación de esfuerzos de flexión y tracción sobre la viga laminada.

En los resultados obtenidos se puede observar que el comportamiento a flexión de los TCCs fabricados con maderas locales es superior a las fabricadas con abeto, tanto preservando las conexiones total y parcial del conjunto, como en la capacidad de carga final antes de rotura. Los valores de flecha finales y las relaciones entre cargas de rotura y de primer fallo, indican también un mayor agarre del tirafondo en las maderas de mayor densidad.

El mejor comportamiento mecánico de forjados mixtos fabricados con maderas locales, permitirá fomentar el aprovechamiento de recursos autóctonos y estimular su demanda, reduciendo así el coste energético y ambiental del transporte mediante la utilización de productos locales, lo que disminuirá su impacto en el ciclo de vida del producto. Finalmente, los resultados obtenidos de ensayos con TCCs fabricados con MLEs de maderas locales pueden servir para la mejora de la normativa con su inclusión en los códigos actuales, ya que actualmente no se contemplan.

Agradecimientos

Los autores agradecen la financiación mediante fondos FEDER del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades del gobierno de España y la FICYT a través de los proyectos de referencia PGC2018-098459-B-I00 y AYUD/2021/51328, respectivamente.

Referencias

- [1] CEI-Bois. (2014) Tackle Climate Change: build with wood,. Brussel: The European Confederation of woodworking industries Brussel. 48p.
- [2] Burnett J. (2006) Forestry Commission Scotland-Greenhouse Gas Emissions Comparison-Carbon Benefits of Timber in Construction. The Edinburgh Centre for Carbon Management Ltd ECCM Report 196. 44p.
- [3] Yeoh, D.; Fragiaco, M.; De Franceschi, M.; Koh, H.B. (2011) State of the Art on Timber-Concrete Composite Structures: Literature Review. J. Struct. Eng. 173(10): 1085-1095. doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000353.
- [4] Appavuravther, E.; Vandoren, B.; Henriques, J. (2021) Behaviour of screw connections in timber-concrete composites using low strength lightweight concrete. Constr. Build. Mater. 286: 122973. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122973.
- [5] Hao, D.; Xiamin, H.; Guohui H.; Danrong S. (2021) Experimental and analytical investigation on flexural behaviour of glulam-concrete composite beams with interlayer. J. Build. Eng. 38: 1-9. doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102193
- [6] Haotian, T.; Huifeng, Y.; Gaoyan, J.; Jiawei X.; Benkai S. (2022) Effective width of timber-concrete composite beams with crossed inclined coach screw connections at the serviceability state. Eng. Struct. 267: 1-16. doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114716.
- [7] UNE-EN 14080 (2022). Estructuras de madera. Madera laminada encolada y madera maciza encolada. Requisitos. Asociación Española de Normalización (AENOR), Madrid, España.

1032

CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL EN LABORATORIO DE ESTRUCTURAS DE MADERA LAMINADA MEDIANTE TÉCNICAS RESISTOGRÁFICAS Y ULTRASÓNICAS

Ignacio Lombillo¹; Ramón Sancibrián¹; Rebeca Sánchez¹; Omar Gómez¹; Alfonso Lozano Martínez-Luengas²

¹ Universidad de Cantabria

² Universidad de Oviedo

Palabras clave / Palavras-chave:

Ensayos no destructivos, Madera laminada encolada, Resistografía, Ultrasonidos, Xilohigrometría

Resumen / Resumo:

La madera laminada encolada (Glulam) es un producto derivado de la madera que se basa en la unión, mediante adhesivos estructurales, de elementos de madera aserrada seleccionados; por tanto, mantiene las propiedades estéticas de la madera aserrada, pero mejorando sus propiedades mecánicas y resistentes, permitiendo una mayor adaptabilidad formal. Dichas circunstancias han favorecido su empleo creciente en la construcción de estructuras. No obstante, uno de los principales problemas que tiene la madera reside en ser un material orgánico y, por ende, ser susceptible al deterioro, pudiendo desembocar en daños severos en las estructuras. Por tanto, se hace indispensable la aplicación de técnicas de inspección in-situ mediante Ensayos No Destructivos (END). Esta investigación pretende aportar nuevos resultados experimentales sobre el empleo de END (xilohigrometría, propagación de ondas ultrasónicas y resistografía) en elementos de Glulam, cuyo estudio en literatura actualmente es muy reducido, limitándose fundamentalmente al estudio de elementos de madera aserrada. Así, se ha desarrollado una campaña experimental en laboratorio, en la que diferentes probetas de Glulam (50) se han ensayado empleando las técnicas mencionadas, para, después, evaluar los resultados, proponiendo correlaciones cruzadas entre los mismos.

1. Introducción

Actualmente, la construcción es un sector que consume numerosos recursos ambientales a nivel global. Por tanto, alcanzar los objetivos planteados en la Acción de la UE por el clima y Pacto Verde Europeo (reducción del 55% de gases de efecto invernadero hasta 2030 y una producción neutra de carbono en 2050) necesita un fuerte crecimiento en el uso de materiales ambientalmente responsables y sostenibles. El empleo de estructuras de madera en la construcción es una de las mejores formas de lograr una actividad respetuosa con el medio ambiente, ya que (1) requiere menos energía para su producción, (2) participa en el secuestro de gases de efecto invernadero, (3) elimina contaminantes del aire, en vez de producirlos, (4) produce menos residuos en el proceso de fabricación, (5) favorece la reforestación, y (6) genera riqueza local en medios rurales contribuyendo a evitar su despoblación.

La madera laminada encolada (Glulam) es un producto derivado de la madera que se basa en la unión,

mediante adhesivos estructurales, de elementos de madera aserrada seleccionados [1]; por tanto, mantiene las propiedades estéticas de la madera aserrada, mejorando sus propiedades mecánicas y resistentes, permitiendo una mayor adaptabilidad formal. Dichas circunstancias han favorecido su empleo creciente en la construcción de estructuras. No obstante, uno de los principales problemas que tiene la madera reside en ser un material orgánico y, por ende, ser susceptible al deterioro biótico (además del asociado con factores abióticos). Dicho deterioro de la madera laminada puede ser responsable de daños severos en las estructuras, produciendo una reducción de la vida en servicio o fallos estructurales con riesgo para la vida humana. Por tanto, se hace indispensable la aplicación de técnicas precisas y fiables de inspección in-situ mediante Ensayos No Destructivos (END). Sin embargo, el análisis de la situación actual revela que no existen técnicas generales y suficientemente contrastadas y estandarizadas para inspeccionar estructuralmente la madera laminada [2], siendo su desarrollo menor que en el caso de la madera aserrada [3], en la que existe mayor número de investigaciones relativas al empleo de END, entre otros: acústicos [4], resistografía [5], extracción de tornillos [6], vibraciones [7], etc. Además, por las particularidades de este material, las técnicas END empleadas en otros materiales no pueden emplearse directamente en la madera laminada, ya que los posibles defectos debidos al deterioro del material tienen características y propiedades particulares [8].

El objetivo general de la presente investigación está dedicada al estudio en laboratorio de los ensayos resistográficos y ultrasónicos aplicados en estructuras Glulam, estableciendo correlaciones cruzadas con la información obtenida.

2. Campaña de ensayos en laboratorio

En la inspección en laboratorio, además de la determinación de la humedad, se estudiaron mediante xilohigrometría, ultrasonidos (US) y resistografía (**Figura 1**) un total de 50 probetas, obtenidas de 10 vigas Glulam de diferentes especies leñosas (pino y abeto), con y sin tratamiento contra daño biológico (tanalizado), y dos clases resistentes (GL18 y GL24).

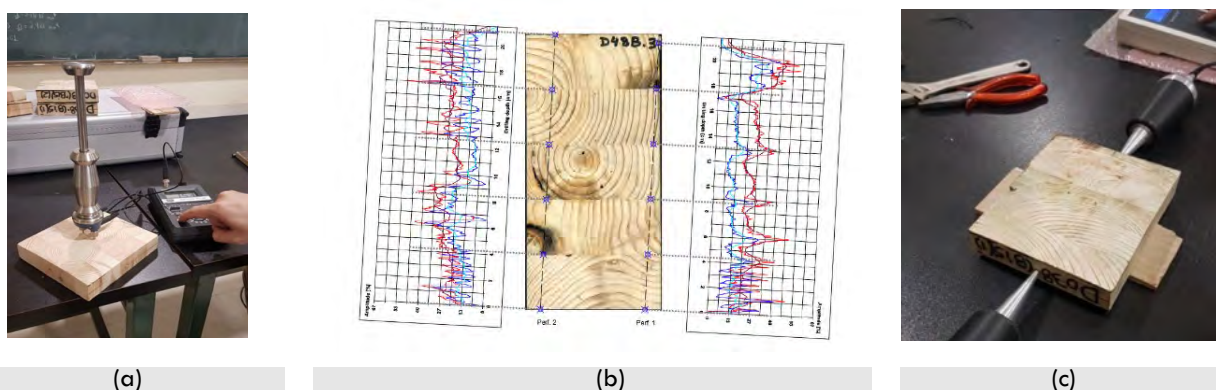


Figura 1. Ejecución de END sobre rebanadas: (a) Xilohigrometría; (b) Perfiles resistográficos; (c) Ensayo US.

En primer lugar, se compararon las humedades registradas con el xilohigrómetro y las obtenidas mediante secado en estufa (según la UNE EN 13183-1). Para lograr cierta uniformidad en las probetas, previamente se procedió a su acondicionamiento a 20°C y 65% de humedad. En la **Figura 2(a)** se aprecia que la humedad xilohigrométrica fue mayor que la medida en estufa, creciendo el error cometido cuanto mayor era el valor registrado por el aparato.

Seguidamente, se correlacionó la densidad (estimada a partir de la masa y el volumen de las rebanadas), normalizada al 12% de humedad, con la media de amplitud de la curva “drill force” obtenida en los ensayos resistográficos, **Figura 2(b)**. Puede afirmarse que existe cierta linealidad entra la resistencia a la perforación y la densidad de la madera, mejorando la correlación cuando se trata la información separadamente para las diferentes especies leñosas.



Figura 2. (a) Humedad en estufa vs. Humedad medida con xilohigrómetro; (b) Densidad corregida al 12% de humedad vs. Amplitud resistográfica.

Con el fin de correlacionar la propagación de ondas ultrasónicas y la densidad, se han realizado ensayos en sentido paralelo (lama central), **Figura 3(a)**, y perpendicular a las fibras de la madera (y a los planos de encolado), **Figura 3(b)**. Puede referirse que, sistemáticamente, se han obtenido correlaciones más sólidas en propagación perpendicular que en dirección paralela a los planos de encolado. Igualmente, las correlaciones mejoran al separar por especies.

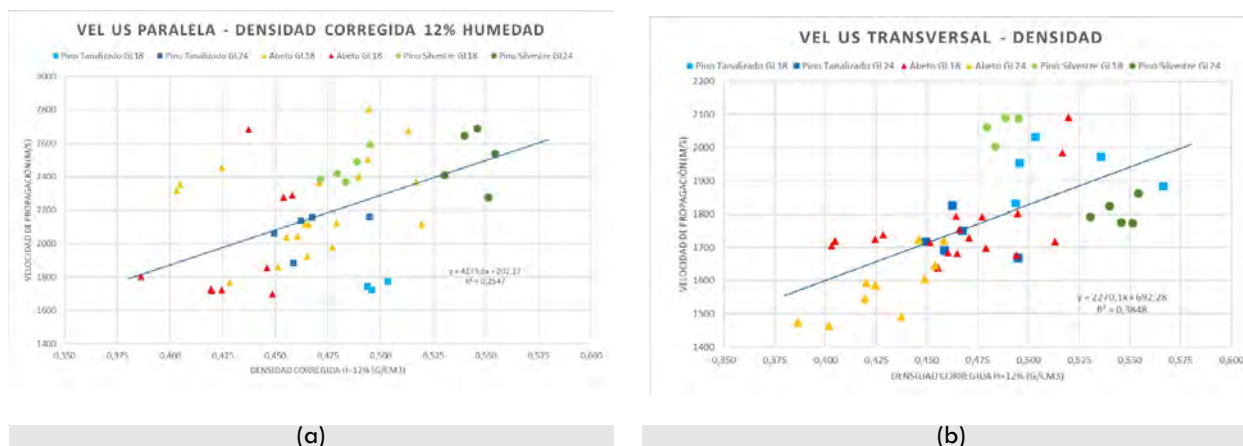


Figura 3. (a) Densidad corregida al 12% de humedad vs. Velocidad de propagación paralelo a planos de encolado; (b) Densidad corregida al 12% de humedad vs. Velocidad de propagación perpendicular a planos de encolado

Finalmente, en la **Figura 4** se ilustra la relación entre la velocidad ultrasónica en sentido transversal a los planos de encolado y la amplitud resistográfica media de la curva “drill resistance”. El cruce de datos muestra una sensible correlación entre los ultrasonidos y el resistógrafo.

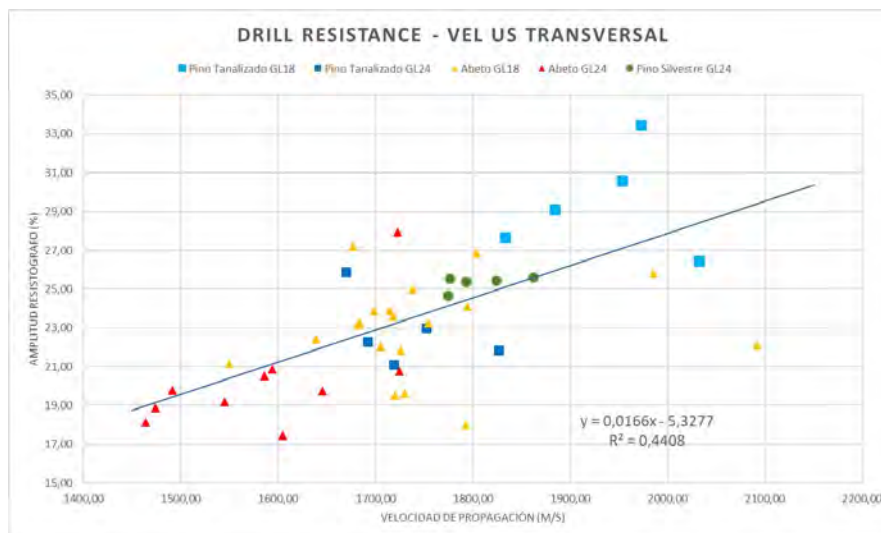


Figura 4. Velocidad propagación perpendicular a planos de encolado vs. Amplitud resistográfica.

3. Conclusiones

El xilohigrómetro introduce un error cada vez más elevado cuanto mayor es la humedad que registra. Además, en Glulam hay que ser cauto con extrapolar el valor obtenido de una lámina a todo el elemento, ya que el comportamiento higroscópico de cada lama podría ser distinto.

Con la muestra de 50 probetas ensayadas se ha percibido una mejor correlación entre la densidad y la amplitud resistográfica al realizar el análisis separando por especies leñosas. Sin embargo, se considera necesario hacer un estudio con una muestra todavía más amplia de probetas. De forma global, se ha obtenido un $R^2 = 0,3009$, mientras que separando en las diferentes especies se obtienen valores de $R^2 = 0,5443$; $0,2529$; $0,9165$ para el pino tanalizado, abeto y pino silvestre, respectivamente.

En la correlación de datos de velocidad de ultrasonidos en dirección transversal a los planos de encolado con la densidad, globalmente se ha obtenido un valor de $R^2 = 0,3848$, que, en general, se mejora al realizar el análisis por especies obteniendo $R^2 = 0,3335$; $0,5133$; $0,8299$ para el pino tanalizado, abeto y pino silvestre, respectivamente.

Al respecto de la relación Resistografía - Velocidad ultrasónica transversal, cabe concluir que, considerando la heterogeneidad del material, se obtiene una correlación razonable entre los dos métodos alcanzando un $R^2 = 0,4408$. Debido a la interesante relación existente entre ambos ensayos y a la correlación que tienen ambos con la densidad de la madera, se propone el uso de campañas conjuntas de ultrasonidos y resistografía para aproximar el valor de la densidad de la madera laminada en inspecciones in situ.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada por el Ministerio de Ciencia e Innovación del Gobierno de España a través del proyecto TED2021-131522B-I00.

Referencias

- [1] Brekke, G.N.; Hanisch, M.; Schule, K.B.; Alem, G.; Hannisch, C.; Stubenrauch, E.A. (1980) Madera laminada encolada, pp. 322–332.
- [2] Llana, D.F.; Íñiguez-González, G.; Díez, M.R.; Arriaga, F. (2020) Nondestructive testing used on timber in Spain: A literature review. *Maderas Cienc. y Tecnol.*, vol. 22, no. 2, pp. 133–156.
- [3] Chen, Y.; Guo, W. (2017) Nondestructive evaluation and reliability analysis for determining the mechanical properties of old wood of ancient timber structure. *BioResources*, vol. 12, no. 2, pp. 2310–2325.
- [4] Sancibrian, R.; Lombillo, I.; Sanchez, R.; Gaute-Alonso, A. (2023) Estimation of the static bending modulus of elasticity in glulam elements by ultrasound and modal-updating NDT techniques. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*. <https://doi.org/10.1080/15397734.2023.2234466>
- [5] Ceraldi, C.; Mormone, V.; Russo Ermolli E. (2001) Resistographic inspection of ancient timber structures for the evaluation of mechanical characteristics. *Mater. Struct. Constr.*, vol. 34, no. 1, pp. 59–64.
- [6] Llana, D.F.; Íñiguez-González, G.; Montón, J.; Arriaga, F. (2018) In-situ density estimation by four nondestructive techniques on Norway spruce from built-in wood structures. *Holzforschung*, vol. 72, no. 10, pp. 871–879.
- [7] Peña-Lasso, J.; Sanchez-Ruiz, R.; Gaute, A.; Lombillo, I.; Sancibrian, R.; Ramos, O.R. (2020) Vibration testing based on evolutionary optimization to identify structural failures and damage in glulam components. *Proceedings of the International Conference on Structural Dynamic EUROLYN 2020*, pp. 912-921.
- [8] Palma, P.; Steiger, R. (2020) Structural health monitoring of timber structures – Review of available methods and case studies. *Constr. Build. Mater.*, vol. 248, 118528.

1033

CARACTERIZACIÓN MECÁNICA POR ONDAS DE ESFUERZO DE MATERIALES COMPUESTOS DE ASERRÍN DE MADERA, ADHESIVO NATURAL Y CEMENTOS

Sonia Correa Jurado¹; Javier Ramón Sotomayor Castellanos¹; José Guadalupe Rutiaga Quiñones¹

¹ Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Palabras clave / Palavras-chave:

Biocompuestos, Densidad de la madera, Madera de pino, Módulo dinámico, Velocidad de onda

Resumen / Resumo:

Al reconvertir los residuos de aserrío en compuestos de madera, se recupera masa forestal. Estos materiales reciclados tienen un bajo impacto medioambiental. El objetivo de la investigación fue determinar la densidad, la velocidad de onda y el módulo dinámico del material compuesto de aserrín de madera de pino y adhesivo natural y comparar estos parámetros de ingeniería con los correspondientes a tableros de densidad media de uso comercial. Se prepararon probetas de pequeñas dimensiones, se realizaron pruebas de ondas de esfuerzo. La densidad del material compuesto (MC) es menor 40% con relación a la del tablero de densidad media (TDM). La velocidad de onda del MC es menor 100% en comparación a la del TDM. El módulo dinámico del MC es menor 459% en comparación al correspondiente al TDM. Estos resultados se explican, por una parte, por los diferentes tamaños de partícula, especies y tipos de adhesivo empleados en la composición de los dos materiales. Comparativamente con el tablero de densidad media, el material compuesto se prospecta como una mejora tecnológica para la fabricación de productos que aprovechen el aserrín de madera para usos no estructurales.

1. Introducción

Durante las operaciones de producción de madera en el bosque se genera biomasa forestal, que es el residuo que se deja en las zonas de extracción. Sin embargo, la mayor proporción de residuos de madera se produce durante su transformación para generar productos de valor agregado [1]. La literatura informa que en los aserraderos se genera entre el 45 % y el 65 % de desperdicios por tonelada de madera procesada [2], lo que resulta relevante si se considera que los recursos forestales son cada vez más escasos. Por ello, una alternativa responsable es utilizar aserrín de madera como componente principal en materiales compuestos [3] ya que estos materiales reciclados tienen un bajo impacto medioambiental [4]. Además, al reconvertir los residuos de aserrío en compuestos de madera, se recupera masa forestal con su transformación en productos que tienen un ámbito de uso muy amplio.

El término compuesto de madera se refiere a cualquier material sólido que combina componentes, elementos y/o partículas de madera aglutinado con un adhesivo [5]. Estos compuestos incluyen tableros, bloques y/o ladrillos empleados en la industria de la edificación [6]. Para la fabricación de compuestos a base de residuos de la industria forestal, se han empleado adhesivos sintéticos, lo que disminuye las ventajas de sustentabilidad de los compuestos [7]. En este contexto, los adhesivos de origen natural se han incorporado en la elaboración de compuestos de madera [8]. Particularmente, los adhesivos a base de proteína natural muestran potencial para elaborar este tipo de materiales y se prospectan como una opción viable para sustituir adhesivos sintéticos en la elaboración de compuestos de madera [9].

El aserrín de madera puede utilizarse para fabricar materiales de ingeniería con un módulo de elasticidad y características de resistencia que satisfacen especificaciones internacionales. Entre las características mecánicas de la madera necesarias para el diseño de productos de madera, se toma como parámetro de referencia el módulo de elasticidad, determinado en condiciones dinámicas. [11]. Por ello, el objetivo de la investigación fue determinar la densidad, la velocidad de ondas de esfuerzo y el módulo dinámico de tanto de un material compuesto de aserrín de madera y adhesivo natural, como de tableros de densidad media de uso comercial. Además, las principales ventajas de la utilización de métodos no destructivos, como lo son las ondas de esfuerzo, son la rapidez para obtener resultados precisos y la adaptabilidad para su empleo en condiciones de laboratorio, *in situ* y en contexto industrial [10].

2. Materiales y métodos

2.1. Materiales

Se prepararon un grupo de referencia de 36 probetas de tablero de densidad media (MDF por sus siglas en inglés), recortadas al azar de tres tableros comerciales. Sus dimensiones fueron 1,72 cm × 1,95 cm × 15 cm. Para el segundo grupo se prepararon 36 probetas del material compuesto, para el cual se usó aserrín de *Pinus pseudostrobus*, cribado a más de 650 μm (calibre >20, en proporción de 50%), 650 μm (calibre 20, en proporción de 25%), 425 μm (calibre 40, en proporción de 12,5%) y 250 μm (calibre 60, en proporción de 12,5%). Las proporciones son respecto al peso total del aserrín. Se preparó el adhesivo natural con harina de trigo (25% respecto al peso del aserrín) y agua (200% respecto al peso del aserrín). Esta mezcla se llevó a ebullición para formar una pasta viscosa. El adhesivo se combinó con el aserrín hasta formar una masa homogénea de 700 g la cual se compactó en un molde con dimensiones de 2 cm × 17 cm × 17 cm. Estas placas húmedas se secaron de la siguiente forma: 24 horas a una temperatura de 40 °C, 24 horas a 60 °C, 24 horas a 80 °C y 24 horas a 103°C hasta alcanzar un estado de humedad anhidro. A partir de las placas secas se elaboraron probetas para cada uno de los dos compuestos con dimensiones de 1,93 cm × 1,92 cm × 15 cm.

2.2. Métodos

El contenido de humedad de las probetas se determinó, adaptando la norma ISO 13061-1:2014 [12]. La densidad de la madera se calculó adaptando la norma ISO 13061-2:2014 [13]. Las pruebas de ondas de esfuerzo adaptaron el protocolo de [10] (Figura 1). El módulo dinámico se calculó con la Ecuación (1):

$$E_{oe} = \rho \times v_{oe}^2 \quad (1)$$

Donde E_{oe} = Módulo dinámico (N m⁻²), ρ = Densidad (kg m⁻³), v_{oe} = Velocidad de onda (m s⁻¹).



Figura 1. Pruebas de ondas de esfuerzo en el material compuesto

3. Resultados y discusión

La densidad del material compuesto (MC) es menor 40% con relación a la del tablero de densidad media (TDM). En cambio, su coeficiente de variación es mayor 76% (Tabla 1). La velocidad de onda del MC es menor 100% en comparación a la del TDM. En contraste, el coeficiente de variación del MC es mayor 22% en contraposición al del TDM. El módulo dinámico del MC es menor 459% en comparación al correspondiente al TDM. Empero, su coeficiente de variación es mayor 35% comparativamente con el del TDM. Estos resultados se explican, por una parte, por los diferentes tamaños de partícula, especies y tipos de adhesivo empleados en la composición de los dos materiales. Además, en el caso del TDM, su proceso de fabricación industrial emplea altas presiones y temperatura para el fraguado madera-adhesivo. Como consecuencia, el TDM es más compacto y rígido que el material compuesto.

Tabla 1. Densidades, velocidades de onda y módulos dinámicos

Material	ρ (kg m ⁻³)			v_{oe} (m s ⁻¹)			E_{oe} (MN m ⁻²)		
	μ	σ	CV	μ	σ	CV	μ	σ	CV
Material compuesto	454	13,5	3,0	898	38	4,2	367	37	10,0
Tablero de densidad media	637	4,6	0,7	1793	59	3,3	2051	134	6,6

ρ = Densidad; v_{oe} = Velocidad de ondas de esfuerzo; E_{oe} = Módulo dinámico; μ = Media; σ = Desviación estándar; CV = Coeficiente de variación.

El intervalo de los valores de la densidad del MC es mayor que el del TDM (Figura 2). Este resultado implica que, con relación al TDM, el material compuesto es menos homogéneo. En cambio, el intervalo de su módulo dinámico es más estrecho. En el mismo contexto, la correlación del módulo dinámico en función de la densidad del material compuesto es media. En cambio, la del tablero de densidad media es nula.

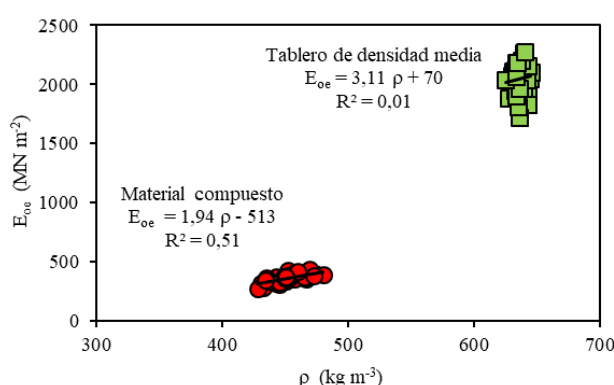


Figura 2. Dispersión del módulo dinámico (E_{oe}) en relación a la densidad (ρ) del tablero de densidad media y del material compuesto

4. Conclusiones

La determinación de los módulos dinámicos del material compuesto y de los tableros de densidad media fue rápido y sencillo. El material compuesto es menos denso y resistente que el tablero de densidad media. No obstante, el material compuesto propone transformar las propiedades naturales del aserrín de madera en un producto manufacturado con un adhesivo natural caracterizado por su módulo dinámico. Comparativamente con el tablero de densidad media, el material compuesto se prospecta como una mejora tecnológica para la fabricación de productos que aprovechen el aserrín de madera para usos no estructurales.

Agradecimientos

La investigación estuvo patrocinada por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México y por el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías, México.

Referencias

- [1] Adelusi, E.; Ajala, O.; Afolabi, R.; Olaoye, K. (2021) Strength and dimensional stability of cement-bonded wood waste-sand bricks. *J. For. Sci.* 67:545–552. doi.org/10.17221/98/2021-JFS
- [2] López-Chalarca, L. T.; Vega Rodríguez, L. Y.; Rendón Colorado, C. D.; Tobón-Rojas, S. (2020) Caracterización de los residuos de la industria maderera para su aprovechamiento en diferentes aplicaciones. *Ing. desarro.* 38:104–124. doi.org/10.14482/inde.38.1.691.1
- [3] Alemu, D.; Tafesse, M.; Mondal, A. K. (2022) Mycelium-Based Composite: The Future Sustainable Biomaterial. *Int. J. Biomater.* 8401528. doi.org/10.1155/2022/8401528
- [4] Ramesh, M.; Rajeshkumar, L.; Sasikala, G.; Balaji, D.; Saravanakumar, A.; Bhuvaneswari, V.; Bhoopathi, R. (2022) A Critical Review on Wood-Based Polymer Composites: Processing, Properties, and Prospects. *Polymers.* 14:589. doi.org/10.3390/polym14030589
- [5] Tawasil, D. N. B.; Aminudin, E.; Abdul Shukor Lim, N. H.; Nik Soh, N. M. Z.; Leng, P. C.; Ling, G. H. T.; Ahmad, M. H. (2021) Coconut Fibre and Sawdust as Green Building Materials: A Laboratory Assessment on Physical and Mechanical Properties of Particleboards. *Buildings.* 11:256. doi.org/10.3390/buildings11060256
- [6] Mwango, A.; Kambole, C. (2019) Engineering Characteristics and Potential Increased Utilisation of Sawdust Composites in Construction. A Review. *Journal of Building Construction and Planning Research.* 7:59–88. doi.org/10.4236/jbcpr.2019.73005
- [7] Chang, B. P.; Mohanty, A. K.; Misra, M. (2020) Studies on durability of sustainable biobased composites: a review. *Royal Society of Chemistry.* 10:17955–17999. doi.org/10.1039/c9ra09554c
- [8] Islam, M. N.; Rahman, F.; Das, A. K.; Hiziroglu, S. (2022) An overview of different types and potential of bio-based adhesives used for wood products. *Int. J. Adhes.* 112:102992. doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2021.102992
- [9] Raydan, N. D. V.; Leroyer, L.; Charrier, B.; Robles, E. (2021) Recent Advances on the Development of Protein-Based Adhesives for Wood Composite Materials. A Review. *Molecules.* 26:7617. doi.

org/10.3390/molecules26247617

- [10] Ávila Calderón, L. E. A.; Sotomayor Castellanos, J. R. (2022) Efecto de la impregnación con boro sobre la densidad y módulo dinámico de tres maderas angiospermas. INGE CUC. 18:1–12. <https://revistascientificas.cuc.edu.co/ingecuc/article/view/3554>
- [11] Íñiguez, G.; Arriaga, F.; Barrett, J.D.; Esteban, M. (2007) Visual grading of large structural coniferous sawn timber according to Spanish Standard UNE 56544. For. Prod. J. 57:45–50.
- [12] International Organization for Standardization (2014) ISO 13061-1:2014. Physical and mechanical properties of wood. Test methods for small clear wood specimens. Part 1: Determination of moisture content for physical. International Organization for Standardization (ISO), Geneva, Switzerland.
- [13] International Organization for Standardization (2014) ISO 13061-2:2014. Physical and mechanical properties of wood. Test methods for small clear wood specimens. Part 2: Determination of density for physical and mechanical tests. International Organization for Standardization (ISO), Geneva, Switzerland.

1034

CARPENTRY CONNECTIONS – A REVIEW ON STEP-JOINTS

João Negrão¹; Maurizio Piazza²

¹ University of Coimbra

² University of Trento

Palabras clave / Palavras-chave:

Carpentry joints, Step-joints, Methods, Timber structures, Survey

Resumen / Resumo:

Carpentry joints rely on direct contact between the connected elements, the force transmission being ensured through compression and shear stresses in the contact areas. They were traditionally handcrafted, to an accuracy not complying with the demanding requirements of modern timber structures. The modern computer controlled sawing systems (CNC) overcame this problem and the use of these connections in modern structures is now within feasible, provided that adequate design methods are available and generally accepted. This geared the inclusion, for the first time, of one section dedicated to carpentry joints in the forthcoming new generation of Eurocode 5, to be published by 2027, the latest. As, due to this, it is expected that these connections recover much of their long lost role, one considers that a survey paper on the topic is actual and of interest. Most of the attention is paid to step-joints, as this is the most heavy-duty configuration when structural use is concerned. Dovetail connections are also briefly discussed.

1. Introduction

Carpentry joints, in a number of forms, were used for centuries as the most frequent connecting system between timber elements. As a common feature, they all rely on direct contact between the connected elements, the force transmission being ensured through compression and shear stresses in the contact areas. For this reason, and in order to prevent disconnection due to load reversal or lateral misalignment caused by accidental out-of-plane forces, in the case of plane structures (e.g. roof trusses), these connections were usually complemented with transversal metallic parts whose role was to keep the timber elements together and improve the contact at the interface surfaces. These fasteners could be either driven through or outside the cross sections of the joined elements and, although neutral under normal service condition (gravity load), were of utmost importance in case of strong wind or seismic action. The main obstacle to the use of these connections in contemporary timber structures is the difficulty in producing accurate cutting of the required notches, which were traditionally handcrafted with resource to a limited set of carving and sawing tools, leading to unacceptable gaps from the point of view of both interface stresses and quality control. The modern computer controlled sawing systems (CNC) overcame this problem, and the use of these connections in modern structures is now within feasible, provided that adequate design methods are available and generally accepted. This

geared the inclusion, for the first time, of one section dedicated to carpentry joints in the forthcoming new generation of Eurocode 5, to be published by 2027, the latest. Due to this, one considers that a survey paper on the topic is actual and of interest. Given the diversity of connection types and regional practices, the focus will be on step- and dovetail joints, also because these are the most heavy-duty configurations when structural use is concerned.

Although there is not a unique systematic classification of carpentry joints, (Harte *et al*, 2015) and (Branco and Decamps 2015) divide the most relevant configurations in Timber Engineering into the four following typologies:

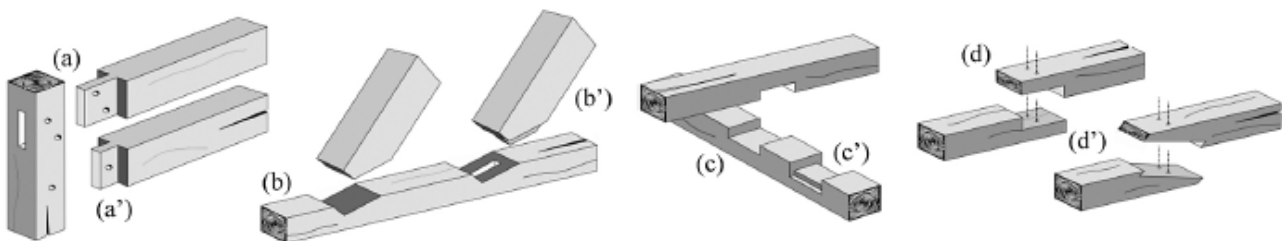


Figure 1. Carpentry joints: (a) mortise and tenon, (b) step-joints, (c) lap joint, (d) scarf-joint (Harte *et al* 2015)

a) Mortise and tenon joints: the tenon is crafted in the end of one element, to be inserted in the slot or mortise carved in the other element (Figure 1 a-a'). The connection is usually pinned or pegged to prevent separation;

b) Notched- step-, birdsmouth- or cogging joints: these joints consist of a V-shaped notch drafted in the side of one element (e.g. tie-beam of roof trusses) where the end of the other element (e.g. rafter) fits (Figure 1 b);

c) Lap joints: the elements are overlapped, with no notching or notching either one or both the overlapped elements (Figure 1 c). The notches may be coggged to improve the connection between the elements (Figure 1 c');

d) Scarf and splice joints: these connections are used to join members end-to-end, as when elements with longer length than available are needed (Figures 1 d-d').

Given its increasing use, allowed by the CNC technique, dovetail connections are also worth of mention.

2. Step-joints

Step-joints are mostly used in connecting rafter to tie beam (Figure 2a) or king post (Figure 2b) in timber roof trusses.

Single-step, with either a front or a rear notch, is the most frequent configuration, but double-step joints (Figure 2c) are also used, namely with large-span trusses or when the rafter is composed of two overlapped elements.

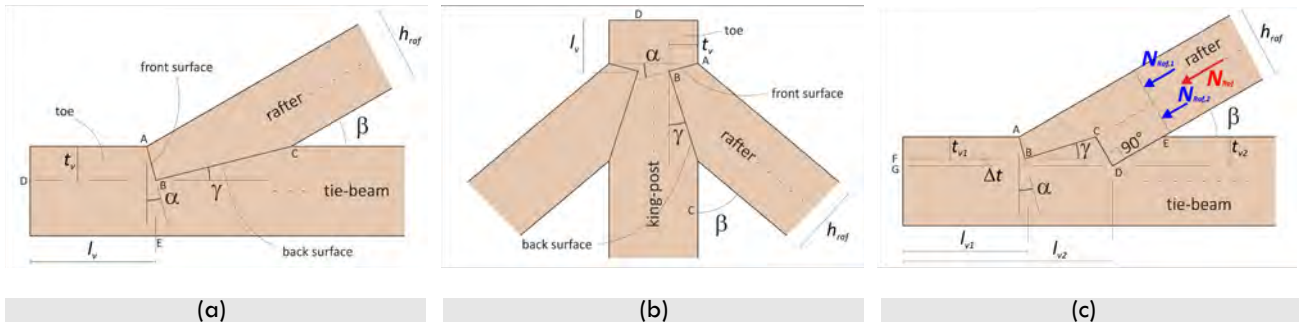


Figura 2. Single-step joints (a) Rafter to tie-beam (b) Rafter to king-post (c) Double-step joint

Failure of these connections may be caused by (i) compressive crushing of the timber in the notch surface (ii) shear of the toe, starting at the root of the notch up to the tie beam end; (iii) tension-bending failure of the tie-beam neck beneath the notch root and (iv) shear of a bottom surface starting at the root of the rear notch (only double-step joints). The geometry of the notch determines the prevailing mechanism, namely the roof angle (β), the front surface slope (α), the notch depth(s) (t_v) and the end distance(s) (l_v).

The design approaches all rely in the force triangle defined by the compression force in the rafter and the equilibrating forces acting in the upper and bottom surfaces of the notch, and they essentially differ on the assumption of friction on these surfaces. These issues are dealt with by a number of authors (Bouquet, 2015), (Branco and Verbist, 2016), (Ehlbeck and Kromer, 1995), since as early as the late XIX century (Oslet, 1890). Sharing that basic model, design rules are prescribed in several guidance and normative documents, in Europe (NEN, 2005, 2013), (DIN 1999, 2008, 2013), (Ministerio de la Vivienda de España, 2006), (AFNOR 2017), (CNR 2006), (Norsk standard 1957), (SIA 2003) and elsewhere. A different approach, based on the force distribution provided by elastic springs representing the stiffness of the surfaces under contact and known as “component method”, was proposed by (Wald et al 2000) and (Descamps and Guerlement, 2009), (Descamps et al, 2006). The behaviour of step-joints under cyclic or seismic loading was extensively investigated by (Parisi and Piazza 2000, 2002a, 2002b, 2013, 2015).

3. Dovetail joints

The dovetail is a regular returning connection method in timber-to-timber structures without the need for steel fasteners. The production of such connection has become possible by the modern CNC machines with a high degree of accuracy.

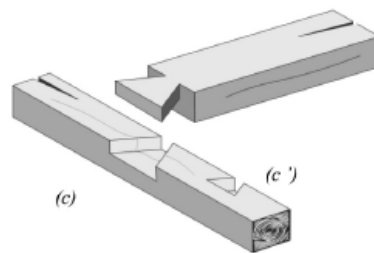


Figura 3. (c) Through dovetailed lap joint (c') wedged dovetailed lap joint (Branco and Descamps 2015)

The tests reported by (Tannert 2008) formed the starting point for the evaluation of dovetail connections, because all types of loading such as shear, tensile force and weak- and strong axis bending moments, were accounted for. Tannert used beams of Western Hemlock while the other authors that published investigations like (Bobacz 2001), (Blaß and Enders-Comberg 2012) as well as (Castelijns 2012) and also in European Technical Approval Z-9.1-649 (2018), used beams of Norway Spruce. Given the complex geometry of dovetail connections, most of the research is focused on the effect of the several influencing parameters, such as the notch depth and its ratio regarding the primary and secondary beam depths, the side slope of the notch, the radius of the curved bottom line, and others. While dovetails are not primarily suited for resisting bending, they can cope for small moments. In this case, failure is caused by splitting at the upper side of the primary beam, and a safety check formula has been proposed by (Leijten 2018).

4. Other types of joints

Other types of joints, such as mortise and tenon, lap- and scarf joints are also of common use but, in the context of structural applications, they are not as relevant as the two previous types. As a consequence, the concerning literature is more limited and frequently centered in the field of general joinery or rehabilitation, where they are more frequently used.

References

- [1] AFNOR (2017). "French contribution for traditional carpentry joints", Document CEN-TC250-SC5_N0672.
- [2] Bocquet J-F. "Les assemblages de charpentes traditionnelles dans le futur contexte réglementaire (2015). Eurocode 5: Conception et calcul des structures en bois-Sous-partie: Assemblage". Formation ENSTIB, Université de Lorraine, France.
- [3] Blaß, H.J., Enders-Comberg (2012). Fachwerkträ für den Industriellen Holzbau. Band 22 der Reihe Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau, KIT Scientific Publishing.
- [4] Bobacz, D. (2001), In CNC-Technik gefertigte zimmermannsmäßige Verbindungsmittel-Untersuchung des Schwalbenschwanzzapfens, Diplomarbeit, Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Universität für Bodenkultur, Wien.
- [5] Branco J. and Descamps T., "Analysis and strengthening of carpentry joints" (2015). *Construction and Building Materials*, Vol. 97, pp. 34-47.
- [6] Branco J. and Verbist M., "Single and Double Step Joint Design. Review of European standardized approaches" (draft) (2016). COST FP1402.
- [7] Castelijns L, (2012). The strength of Dovetail connections, Master Thesis, Fac. of Build Environment, Eindhoven University of Technology.
- [8] CNR - Consiglio Nazionale Delle Ricerche de Italia (2006). DT 206: Istruzioni per il progetto, l'esecuzione ed il controllo delle strutture di legno [Italian].
- [9] Descamps T. and Guerlement G. (2009) "Component method for the assessment of the axial, shear and rotational stiffness of connections in old timber frames". 9ème Congrès National de Mécanique, Marrakech, Maroc

- [10] Descamps T., Lambion J. and Laplume D. (2006). "Timber Structures: Rotational stiffness of carpentry joints", Proc. WCTE2006 - 9th World Congress on Timber Engineering, Portland, OR, USA.
- [11] DIN-German Standardization Organization (1999). DIN 1052. Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerk
- [12] DIN-German Standardization Organization (2008). DIN 1052:2008-12 - Design of timber structures - General rules and rules for buildings - Chapter 15 [in German]
- [13] DIN-German Standardization Organization (2013). DIN EN 1995-1-1/National Annex:2013, DIN, Berlin, Germany
- [14] Ehlbeck J., Kromer M. "Carpentry joints" (1995). *Timber Engineering - STEP1*, Blass H., Aune B.S., Choo R., Görlacher D.R., Griffiths B.O., Hilson et al. (Eds.), STEP/Eurofortech, Centrum Hout, The Netherlands.
- [15] Harte A., Jockwer R., Stepinac M., Descamps T., Rajcic V. and Dietsch P., "Reinforcement of timber structures (2015). The route to standardisation", Proc. SHATIS 2015, paper 036, pp. 78-88, Wroclaw, Poland.
- [16] Leijten A.J.M, (2018). Splitting of timber beams caused by perpendicular to grain forces of multiple connections, *Engineering Structures* Vol. 171, p.10-14, ISSN 0141-0296.
- [17] Ministerio de la Vivienda de España (2006). Código Técnico de la Edificación (CTE) - Documento Básico - Seguridad Estructural - Maderas [in Spanish]
- [18] NEN (2005). NEN 6760. Dutch Standardisation Institute, Delft, The Netherlands (withdrawn)
- [19] NEN (2013). "NEN-EN 1995-1-1 Dutch NA 8.11 Ambachtelijke verbindingen." Nederlands Normalisatie-Instituut, Delft, The Netherlands
- [20] Norsk standard 446 (1957). Trekonstruksjoner – Regler for beregning og utførelse, Oslo, Norway (in Norwegian)
- [21] Oslet G., *Traité de charpente en bois*, Encyclopédie théorique & pratique des connaissances civiles et militaires. Partie Civile, Cours de construction, 4^{ème} partie (1890). Edited by Chairgrasse H. Fils, Paris, France. Dig. repr.: <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k872975z.r=Oslet,+Gustave.langFR>
- [22] Parisi M., Piazza M. (2000). "Mechanics of plain and retrofitted traditional timber connections", *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 126, No. 12, pp. 1395-1403.
- [23] Parisi M., Piazza M. (2002a). "Traditional timber joints in seismic areas: cyclic behaviour, numerical modelling, normative requirements", *European Earthquake Engineering*, Vol. 1, pp. 40-49.
- [24] Parisi M., Piazza M. (2002b). "Seismic Behaviour and Retrofitting of Joints in Traditional Timber Roof Structures", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 22, 9-12: pp. 1183-1191.
- [25] Parisi M-A. and Piazza M. (2013). "Carpentry joints in earthquake conditions", *Ingegneria Sismica*, Anno XXX - No. 4.
- [26] Parisi M-A. and Piazza M. (2015). "Seismic strengthening and seismic improvement of timber structures", *Construction and Building Materials*, Vol. 97, pp. 55-66.

- [27] SIA Association Suisse de Normalization (2003). SIA 265 – Construction en bois, Switzerland.
- [28] Tannert, Th. (2008). Structural performance of rounded dovetail connections, PhD-thesis, University of British Columbia, Vancouver.
- [29] Wald F., Mares Z., Sokol M. and Drdácý' F. (2000). "Component method for historical timber joints. The paramount role of joints into the reliable response of structures", *NATO science series*, vol. 4, pp.417-424.

1035

LA MADERA CONSTRUCTIVA EN EL DISEÑO DE NUEVOS FORMATOS DE COHOUSING: LA CASA SIMBIONTE COMO PROTOTIPO

Susana Velasco Sánchez¹

¹ UPM - ETSAM

Palabras clave / Palavras-chave:

Madera CLT, Prefabricación, Cohousing, Organicidad, Sin plástico

Resumen / Resumo:

La Casa Simbionte es una esponja abierta al entorno y al mismo tiempo sensible y reactiva a él. En ella se explora una adaptación bioclimática y abordaje ecológico completo diseñando un pequeño hábitat en madera integral, completamente amoldado a su medio. Ha sido realizada en madera contra-laminada y cuenta con un diseño previo en modelos 3d que ha permitido calcular al milímetro un volumen completamente adaptado al espacio libre que dejaban los árboles, así como un montaje rápido y eficiente en pocos meses. La vivienda funciona como un artefacto bioclimático que interacciona en cada porción de su piel con el entorno como lo hacen los seres vivos. El diseño de la vivienda ha llevado hasta el final la idea no introducir plásticos en la construcción y de hacer un trabajo integral en madera, desde la estructura, el aislamiento, las ventanas y el acabado exterior. A su vez esta vivienda explora la noción de cohousing flexible de dos modos distintos funcionando como un prototipo que permite pensar formas de vida que compartan zonas comunes de un modo orgánico al tiempo que se preservan zonas íntimas a modo de cabañas insertas en dicho espacio común.

1. Un diseño que propicie la simbiosis



Figuras 1, 2 y 3. Exteriores de la Casa Simbionte, íntegramente envuelta en madera de castaño.

Matalpino (Madrid), 2023

Susana Velasco y Jesús Ágreda (arquitectos)

Máquina-Liquen (constructora)

Madera estructural certificada de Xilonor (Galicia) Fachada de Castaño de Siero (Asturias)

La Casa Simbionte es una esponja abierta al entorno y al mismo tiempo sensible y reactiva a él. En esta vivienda hemos explorado las posibilidades de diseñar un pequeño hábitat en madera integral, completamente amoldado a su medio. En una pequeña parcela cuajada de árboles y con una pendiente moderada, la forma de la vivienda se va ciñendo al espacio libre entre los troncos para desplegar su forma de estrella y captar al máximo la trayectoria solar. A su vez el volumen se eleva respecto del terreno que sigue su pendiente natural, de este modo la casa no deja huella sobre el terreno; la sensación es la de no haber perdido superficie de parcela. Un muro de piedra que actúa como contención de tierras y a su vez facilita el entronque con el suelo de todas las instalaciones de agua y electricidad. La tierra contenida permite dar forma a una terraza en la parte más elevada que funciona como espacio de expansión de la cocina, un comedor al aire libre en torno a un precioso nogal que forma parte fundamental de la composición arquitectónica.

2. Diseño según el ciclo del sol



Figuras 4, 5 y 6. Interiores de la Casa Simbionte. a y b: Estufa-invernadero solar; c: zona de aseo como espacio de circulación

La vivienda funciona como un artefacto bioclimático que interacciona en cada porción de su piel con el entorno como lo hacen los seres vivos. Se aprovecha las fachadas orientadas a sur para ubicar una pequeña estufa de aclimatación que capta el sol en invierno desde su salida hasta la tarde para volcarlo al interior. Esta estufa se usa como un pequeño jardín-invernadero en torno a los que se organiza el espacio común. El volumen se va desplegando entre los árboles y ubicando aperturas adaptadas a distintos usos en cada punto de la fachada: un ojo de buey y un ventanal para ver las estrellas en la habitación de las niñas, o una ventana que es una cápsula de vidrio volada sobre el jardín en el otro dormitorio para sentarse a ver caer la lluvia. La casa es a su vez un recorrido por la parcela que asciende a la segunda planta de modo fluido. La situación estratégica de un ventanal

a modo de gran ojo permite coronar todo el recorrido ascendente con una apertura al macizo de la Maliciosa. Las inclinaciones de la cubierta favorecen la sensación de continuidad de todo este espacio común y a su vez facilita que, al exterior, tome forma una última zona común: un salón al aire libre, un solárium de madera pensado para reposar el cuerpo y observar el bosque sobre las copas. Dicha cubierta funciona como una quinta fachada envolviendo toda la casa en un mismo material noble, la madera de castaño forma una cubierta transitable, un material amable para el cuerpo en donde no hace falta más mobiliario que la arquitectura misma, ya que la suave inclinación permite el acomodo de los cuerpos

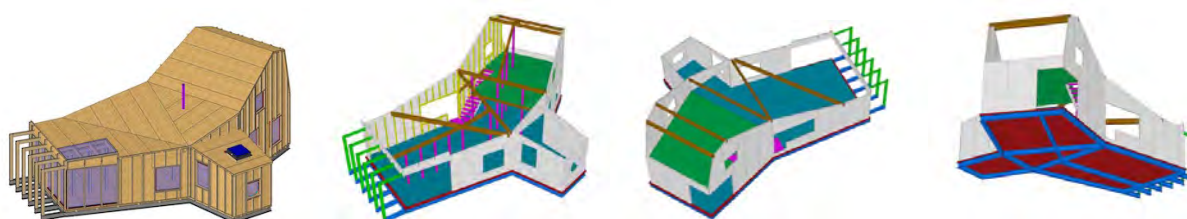
3. Hacia un modelo flexible de cohousing



Figura 7. Diagramas bioclimáticos Figura 8. Madera estructural vista al interior y cocina-comedor como núcleo central.

En esta vivienda se ha explorado la noción de cohousing de dos modos distintos. En primer lugar son cuatro las viviendas que comparten parcela, organizadas de modo que se complementen entre sí favoreciendo una buena convivencia al crear accesos más públicos a las mismas al mismo tiempo que se preservan zonas de intimidad en cada vivienda. La conformación de varias terrazas en la parcela favorece que haya una división natural sin necesidad de levantar vallados de separación. En un segundo nivel se ha explorado la noción de cohousing dentro de la vivienda misma, creando un espacio común matriz al que vuelcan el resto de estancias a modo de cabañas. Cada una de estas cabañas se abre al exterior con ventanas singulares que les otorgan un carácter único. Uniendo estas habitaciones-cabaña, el espacio común se organiza en recorridos circulares entre las distintas partes de la casa de modo que o bien se pasa por un hall que contiene el almacenaje, o se atraviesa por el área húmeda de los baños, que están pensados como un paisaje de color amarillo: un espacio flexible que es también un recorrido por la parte más privada de la vivienda. La zona común se configura como una gran nave que articula entre sí una secuencia de piezas técnicas necesarias para la vida: almacenaje, cocina, zona húmeda, escalera y librerías. A su vez, bajo la vivienda se genera un espacio a cubierto que facilita zonas de trabajo compartido, como un taller de carpintería o un espacio de reparación de bicicletas, así como el espacio donde se recogen las aguas de la cubierta en un depósito abierto a modo de pequeña piscina.

4. Montaje optimizado, integral en madera y sin plástico



La construcción se levanta sobre pilotes de acero hasta armar una plataforma metálica elevada; sobre ella se posará el volumen de madera que conforma la vivienda. Esta primera estructura metálica, de forma estrellada, se concibe como una plataforma de montaje estable que facilita todo el proceso posterior de construcción en madera. El volumen habitable se construye en su totalidad con paneles de madera contralaminada-CLT, con un espesor de 6 cm en los paramentos verticales y de 10 cm en los horizontales o forjados. Estos paneles pertenecen a la primera producción que realizó la empresa española Finsa, instalada en Galicia, de este tipo de mecanizado industrial en madera laminada. Dicha madera estructural se ha dejado vista al interior tanto en paredes como en techos, y se ha complementado con unas nervaduras verticales a lo largo de toda la zona común para conformar una biblioteca que recorre la casa. La caja estructural en CLT, vista al interior de la vivienda, se envuelve de varias capas de protección a la intemperie. En su cara externa se ha colocado un aislamiento de 14 cm de lana de fibra de madera y una lámina semipermeable. Posteriormente se ha envuelto completamente toda la casa con una fachada ventilada en madera de castaño de la empresa asturiana Siero Lam. El diseño hace una fuerte apuesta por utilizar la madera como materia de trabajo global, llevando también a la cubierta esta fachada ventilada de lamas machihembradas de castaño sobre rastreles de madera de pino cuperizado. La cubierta se concibe como una loma entarimada que ofrece a la familia un lugar cálido, confortable y conectado con la materia del bosque. Este entarimado se posa sobre un sistema de impermeabilización realizado con una lámina de EPDM de una sola pieza, y que se ha adaptado como un guante al relieve y la forma irregular de la vivienda. Otro de los detalles singulares de la construcción es la formación del forjado de planta baja. Las planchas de CLT, posadas sobre la plataforma metálica, quedan vistas en su cara inferior, disponiendo un aislamiento rígido sobre ellas mediante un sistema Gutex-Thermosafe de fibra de madera con rastreles incorporados, sobre el que se fija un acabado final de tarima maciza de roble de 2 cm de espesor. Este doble sistema machihembrado permite conjugar un aislamiento ecológico con un fácil y rápido montaje.

El diseño de esta vivienda ofrece un ejemplo de adaptación bioclimática y abordaje ecológico completo. La casa está construida y aislada con productos ecológicos derivados de la madera, incluye sistemas pasivos de control de clima como es la estufa-invernadero, y aplica sistemas de producción de energía eléctrica que se alimentan de los paneles solares dispuestos en la cubierta. Durante la construcción buscamos ir un paso más allá para buscar alternativas a los productos tóxicos o derivados del plástico que son de uso corriente en el mundo de la construcción. Entre las acciones que se implementan está el uso de tuberías de acero inoxidable para el abastecimiento del agua fría y agua caliente sanitaria. De este modo se han minimizado los derivados del plástico a lo imprescindible: la impermeabilización de EPDM. Para finalizar, hay que destacar las enormes ventajas que ofrece la madera contra-laminada a la hora de fabricar y montar un diseño arquitectónico. Este sistema ofrece una exactitud en el diseño previo, a través de modelos 3D tipo cadwork, que después pueden ser ejecutados al milímetro en obra, acercando enormemente el momento del diseño al del resultado construido.

Referencias

- [1] Velasco, S.; Ágreda, J. (2023) Casa Simbionte. *En madera, otra forma de construir*, (pág. 238-245) Ed. FSC España y Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Madrid.

1036

CENTRO DE VISITANTES DEL NUEVO PARQUE NACIONAL SIERRA DE LAS NIEVES: UNA APUESTA POR LA MADERA ESTRUCTURAL. ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE MATERIALES

Santiago Matute Díez¹; María Romero Cuberos¹

¹ Agencia de Medio Ambiente y Agua

Palabras clave / Palavras-chave:

Andalucía, Descarbonización, Madera, Ciclo de vida, Huella de carbono

Resumen / Resumo:

La construcción del centro de visitantes del nuevo Parque Nacional de Sierra de las Nieves cuenta en su diseño con una reducida huella ambiental. Esta reducción se apoya en dos pilares: la construcción y su funcionamiento. Por una parte en su construcción se usan materiales naturales y renovables de origen vegetal, fundamentalmente madera. Y por otra, se consigue una alta calificación energética, lo que minimiza su huella durante su vida útil. Con una estructura eminentemente de madera, esta construcción consagra la apuesta firme de la administración andaluza por el uso de la madera. Se estudia la reducción de la huella ambiental de este modelo de edificación frente a dos modelos convencionales basados en el hormigón y el acero.

1. Introducción

1.1. Declaración del nuevo parque nacional

En 2021 se declara, en el corazón de la provincia de Málaga, el decimosexto Parque Nacional español y tercero de Andalucía: el Parque Nacional Sierra de las Nieves, con una superficie de casi 23.000 ha. Dentro de los valores que le hacen merecer esta distinción se encuentra su peculiar geología y su excepcional riqueza botánica.

Este parque viene a formar parte de la Red de Espacios Naturales Protegidos de Andalucía (RENPA) y a partir de aquí se le debe dotar de los equipamientos fundamentales con los que cuentan todos los espacios naturales de esta red.

1.2. Programa andaluz de impulso a la madera

En el marco de la Estrategia Forestal Española Horizonte 2050 y en el del Plan Forestal Andaluz horizonte 2030 surge dentro de la Consejería en material de Medio Ambiente el Programa de Impulso

de los Aprovechamientos de Madera en Andalucía. Este programa persigue el fomento de la gestión forestal sostenible de los montes andaluces, como fuente productora de madera, principalmente, pero también de corcho y otros recursos naturales renovables. Todo ello como punto de partida de una cadena de valor añadido que promueve un nuevo paradigma industrial que, desde la base ya existente en el territorio andaluz, consolide el ciclo de aprovechamiento de la madera.

1.3. Centro de visitantes de madera

El equipamiento de recepción más importante con el que deben contar los espacios naturales es su Centro de Visitantes. Se trata de un lugar en el que se acoge, se informa y se orienta al visitante; y es un espacio desde el que se promueven actividades, productos y servicios propios del territorio. En definitiva, es el punto de referencia del uso público del espacio protegido. Ineludiblemente, una vez declarado Parque Nacional, este espacio debe ser dotado de un centro de visitantes.

En este escenario, la Junta de Andalucía y en concreto su Consejería en materia de Medio Ambiente, como administración encargada de la dotación de este equipamiento, se alinea con todas estas políticas ambientales y constructivas y apuesta firmemente por la madera como elemento estructural principal de su nuevo centro de visitantes.

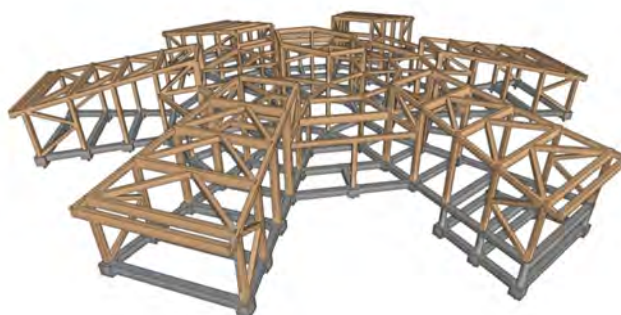


Figura 1: Croquis de la estructura de madera del centro de visitantes

1. Carácter ambiental del nuevo centro de visitantes

La selección de materiales con un impacto ambiental mínimo, unido a aspectos bioclimáticos que persiguen un reducido consumo energético a lo largo de su vida útil, subrayan el carácter ambiental de este edificio. Para su desarrollo edificatorio se han ideado nuevas formas sostenibles de componer los elementos estructurales y constructivos, aprovechando las características de materiales naturales como la madera, el corcho o las fibras de cáñamo, así como la cal tradicional. La huella ambiental del edificio se reduce, por tanto, en una doble vertiente. Por una parte se sustituye el uso de materiales como el hormigón, acero, cerámica e aislamientos industriales, de alto impacto energético por otros renovables de origen vegetal. Y por otra, se minimiza su huella ambiental durante su funcionamiento, puesto que se consigue una alta calificación energética.



Figura 2: Alzados del centro de visitantes

2. Análisis comparativo entre materiales

La huella ambiental es el criterio objetivo principal que respalda la apuesta de la administración andaluza por la madera y es la palanca que impulsa a las políticas públicas a promover de forma creciente el uso de la madera en edificación.

Para el caso concreto del centro de visitantes de Sierra de las Nieves, se calcula su huella ambiental mediante el cálculo de la huella de carbono de todos los materiales usados en su construcción.

Se establece una comparativa entre el modelo basado en la madera estructural y dos modelos convencionales para el mismo edificio: estructura metálica y estructura de hormigón armado. Ambos complementados con materiales cerámicos en cerramientos y particiones, así como soluciones industriales en aislamientos. Todo ello con el mismo nivel de eficiencia energética y prestaciones. Se analizan los resultados y se comunican las conclusiones.

Se establecen tres fases en el presente estudio.

2.1.Fase descriptiva

Se plantean y describen los tres modelos constructivos para el mismo centro de visitantes.

En primer lugar se describe el modelo basado en **madera estructural** así como las demás soluciones constructivas complementarias, que combinan distintos sistemas de paneles de madera, aislamientos de corcho y fibras vegetales.

En segundo lugar se describe el mismo edificio construido con una estructura de **hormigón armado** y soluciones constructivas normalizadas basadas en materiales cerámicos y aislamientos industriales, todos de uso común en la actualidad.

Se describe también un tercer modelo basado en estructura de **acero** y soluciones constructivas a base de bloques de hormigón, con el mismo aislamiento industrial. Todo ello contando con las mismas condiciones de servicio.

En todos los casos se considera que las instalaciones son idénticas, alcanzando las mismas prestaciones, eficiencia energética y confort. Se considera igualmente que los tres modelos son viables a nivel estructural y constructivo y cumplen con la normativa vigente en materia de construcción.

2.2.Fase de valoración

Una vez calculados y descritos los tres modelos constructivamente viables, se obtiene el despiece volumétrico de cada tipo de material. Se aplica para cada modelo el coste ambiental de la extracción o fabricación de todos sus materiales. Este coste ambiental se fundamentará en el cálculo de la huella de carbono de todos los elementos y sistemas constructivos de cada uno de los tres modelos comparados.

Los datos relativos a la huella de carbono de los materiales se obtienen de fuentes contrastadas como la guía para el cálculo de la huella de carbono publicada por el Ministerio de Transición Ecológica. Todos los materiales se transforman a unidades de carbono equivalente, de manera que se podrán sumar los costes ambientales de los diferentes capítulos de cada uno de los tres modelos, para finalmente obtener un valor de unidades de carbono equivalente (CO₂eq) para cada uno de los tres modelos.

Se evitará evaluar la huella producida por el transporte de los materiales, considerando que todos ellos son de proximidad.

2.3.Fase comparativa

Además de hacer una comparativa global del coste ambiental de cada modelo, se realiza la comparativa a nivel de cada capítulo de la edificación: cimentación, estructura, cerramientos, revestimientos, aislamientos, etc.

3. Conclusiones

El análisis comparativo de materiales confirman los resultados previstos, posicionando el modelo basado en la madera estructural como el de menor consumo de energía.

Cada vez son más las administraciones públicas que se suman a la promoción del uso y consumo de la madera, a través, por ejemplo, de la inclusión de este material como requisito dentro de los pliegos de sus licitaciones públicas.

Es importante que estas experiencias pioneras se analicen y sus resultados se den a conocer, para que puedan servir como ejemplo y modelo para otras administraciones públicas. Todo ello a fin de sumar experiencias que permitan consolidar el conocimiento colectivo en torno al excelente funcionamiento constructivo y ambiental de este material.

A la administración pública le toca avanzar en este camino, funcionando como elemento tractor del cambio que la sociedad, los tiempos y las circunstancias nos exigen. Le toca seguir apostando y continuar desarrollando políticas que persigan la progresiva descarbonización del sector la construcción.



Figura 3: Volumetría del centro de visitantes

1037

CLASSIFICAÇÃO DA MADEIRA PARA APLICAÇÃO ESTRUTURAL UTILIZANDO AS VERTENTES PROPOSTAS EM RECENTE ATUALIZAÇÃO DE NORMA BRASILEIRA

Leonardo Maciel Moretti¹; Raquel Gonçalves¹

¹ Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP / FEAGRI/

Palabras clave / Palavras-chave:

Propriedades da madeira para uso estrutural, Ensaio de flexão estática, Ensaio de propagação de ondas, Ensaios de ultrassom

Resumen / Resumo:

Em 2022 a norma brasileira para projeto de Estruturas de Madeira (ABNT NBR 7190) passou por uma completa revisão, sendo atualmente composta por sete partes, englobando os critérios de dimensionamento (Parte 1), a classificação visual e mecânica de peças estruturais (Parte 2), os métodos de ensaio em corpos de prova para madeiras de espécies tropicais (Parte 3), os métodos de ensaio para caracterização de peças estruturais (Parte 4), ligações com conectores mecânicos (Parte 5), caracterização da madeira lamelada colada (Parte 6) e caracterização da madeira lamelada colada cruzada (parte 7). Como se trata de conjunto de normas que passou por recente revisão, tornam-se importantes pesquisas que visem aplicar e discutir o processo metodológico e seus respectivos resultados. O objetivo deste trabalho foi aplicar os critérios de classificação visual e mecânica de peças estruturais de eucalipto sp. utilizando ensaios de flexão e de ultrassom para a classificação mecânica (Parte 2 da norma) e associar os resultados à caracterização do mesmo lote de madeira utilizando os procedimentos propostos na Parte 4 da mesma norma. A aplicação dos critérios normativos propostos permitiram discutir, de forma preliminar, a metodologia, as dificuldades e o alcance dos resultados.

1. Introdução

A madeira é um material amplamente utilizado na construção civil devido às suas propriedades mecânicas e ao seu caráter renovável. No entanto, a variabilidade natural deste material pode influenciar seu desempenho estrutural, tornando essencial a classificação adequada das peças de madeira que compõem lotes destinados a construções. Essa classificação, já prevista há muito tempo em normas de vários países, finalmente também foi adotada na revisão da ABNT NBR 7190, realizada no Brasil em 2022. A norma revisada em 2022, em sua parte 2 [1] indica que a madeira para uso estrutural deve ser classificada de forma visual e mecânica. Para a classificação visual a norma apresenta os aspectos a considerar e os limites admitidos em cada classe. A classificação mecânica pode ser feita com ensaio de flexão estática no trecho elástico, ou com métodos de propagação

de ondas ou vibracionais. A classe a ser adotada é a menor entre a obtida na avaliação visual e mecânica. O uso de métodos de propagação de ondas na classificação mecânica é realizado considerando a correlação entre o coeficiente de rigidez ($C_{LL} = \text{densidade} \times \text{velocidade}^2$) e E_0 obtido em flexão estática durante a classificação ($E_{0 \text{ class}}$). Para a norma brasileira [1] o uso de método de propagação de ondas é admitido na classificação desde que o coeficiente de determinação da regressão entre C_{LL} e E_0 seja igual ou superior a 80%.

Para o dimensionamento de estruturas de madeira, a norma brasileira [2] propõe a utilização de classes de resistência para a obtenção das propriedades a serem utilizadas no projeto. As classes de resistência indicam as propriedades de resistência da madeira para diferentes tipos de esforços (flexão, tração paralela e perpendicular, compressão paralela e perpendicular e cisalhamento), além de propriedades de rigidez (módulos de elasticidade longitudinal e transversal) e densidade. Esses valores (médios e característicos) são obtidos por meio de caracterização da madeira utilizando ensaios em peças estruturais provenientes de lotes de referência para espécies plantadas [3]. Assim, as tabelas de classes de resistência [2] indicam valores a serem utilizados no dimensionamento da estrutura, enquanto as tabelas de classes [1] permitem classificar a madeira em lotes homogêneos. Pela norma Brasileira [2] a caracterização da madeira deve ser feita em lotes homogêneos, considerado como sendo lotes nos quais o coeficiente de variação da resistência à flexão de suas peças seja inferior a 20%.

Dessa forma, este trabalho teve como objetivo aplicar, conforme descrito nas normas [1, 2 e 3], os processos de classificação, visual e mecânica, e de caracterização em um lote de madeira de Eucalipto, utilizando para a classificação mecânica o ensaio de flexão estática no limite elástico e o ensaio de ultrassom; e discutir os resultados.

2. Material e métodos

2.1. Materiais

Para os ensaios a amostragem foi constituída de 42 vigas de eucalipto de seção nominal 0,05 m x 0,10 m e comprimento de 3,0 m adquiridas em serrarias da cidade de Campinas, SP, Brasil.

2.2. Métodos

A umidade das vigas foram calculadas com uso de equipamento e com secagem até a estabilização da massa.

A partir das dimensões médias de cada viga e da massa calculou-se a densidade no momento do ensaio (p_{test}). Como a umidade das vigas não estavam no valor de referência (12%), as densidades foram corrigidas segundo a equação proposta na norma [2].

A classificação visual foi feita utilizando os critérios da norma [1] analisando presença de medula, nós, inclinação das fibras, fissuras passantes e não passantes, distorções dimensionais (encurvamento, arqueamento, encanoamento, torcimento, esmoado), ataques biológicos, danos mecânicos e bolsas de resina. Os defeitos relacionados com os nós e com a inclinação das fibras foram utilizados para se atribuir as classes visuais 1, 2 e 3 enquanto os demais defeitos (fissuras, encurvamentos etc.) apresentam valores limites que não devem ser ultrapassados em nenhuma das classes.

Após a análise visual as vigas foram ensaiadas por ultrassom seguindo a norma brasileira [4]. Os ensaios foram feitos com equipamento de ultrassom (USLab, AGRICEF, Brasil), e transdutores de onda longitudinal e faces planas, com 45 kHz de frequência. Com o tempo de propagação da onda mensurado pelo equipamento (t) e com o comprimento da viga (L), foram calculadas as velocidades de propagação da onda na direção longitudinal (VLL). Como a umidade das vigas não estavam no valor de referência (12%), as velocidades para o eucalipto foram corrigidas utilizando coeficiente de correção obtido por [16] para três espécies de Eucalipto. De posse da velocidade de propagação com 12% de umidade (VLL12) e da densidade também com 12% de umidade (ρ_{12}) calculou-se o coeficiente de rigidez (CLL).

Para a classificação mecânica com ensaio estático [1], as vigas foram ensaiadas em flexão estática com a peça posicionada na menor inércia, ensaiada a 3 pontos, com mensuração da flecha no meio do vão. O módulo de elasticidade à flexão nesse ensaio de classificação ($E_{0 \text{ class}}$ em MPa) foi determinado no trecho elástico-linear, utilizando o diagrama força $\times$ deslocamento (normalmente localizado no intervalo de 10% a 40% da força máxima). O módulo de elasticidade também foi corrigido para 12%, sendo nesse caso aplicado 2% de variação a cada 1% de variação da umidade em relação ao valor referencial (12%).

Na caracterização [3] as peças estruturais foram ensaiadas a 4 pontos e não 3 pontos como no ensaio visando classificação. Além disso, as peças são ensaiadas na direção de maior inércia e até a ruptura. O módulo de elasticidade à flexão (E_0) é determinado no trecho elástico-linear do diagrama força $\times$ deslocamento (normalmente localizado no intervalo de 10 % a 40 % da força máxima). Da mesma forma que no caso da classificação os valores do módulo de elasticidade devem ser corrigidos para a umidade de referência.

2.3. Forma e análise dos resultados

Vários passos foram seguidos para atingir o objetivo da pesquisa.

Umidade: Foram avaliados e discutidos os dados das umidades obtidas com equipamento e com o ensaio em estufa, bem como a umidade das vigas comercializadas.

Correlação entre os ensaios de ultrassom e de flexão estática: Foi avaliada a correlação entre os resultados de C_{LL} e de $E_{0 \text{ class}}$ discutindo a validade de uso deste parâmetro não destrutivo na classificação do lote, segundo a norma [1].

Enquadramento da madeira nas classes da norma [1] considerando os diferentes parâmetros: Neste item discutiu-se a classificação segundo os diferentes parâmetros: visual, mecânico com método de propagação de ondas (utilizando a correlação) e mecânico com ensaio de flexão estática.

Relação dos resultados da classificação com a caracterização do lote: Neste item discutiu-se a questão do lote homogêneo bem como o resultado da caracterização. No entanto, como o lote apresentou diferentes classes a amostragem para a caracterização foi pequena, não permitindo resultados conclusivos.

3. Resultados e discussões

3.1.Umidade

As vigas comercializadas estavam com grande variação de umidade (de 13% a 55%), com 67% delas com umidades superiores a 30%. Esse resultado indica que pode haver uma questão grave a ser resolvida na comercialização da madeira para estruturas, uma vez que as normas brasileiras indicam que as correções das propriedades para a umidade de referência (12%) devem ocorrer considerando o intervalo entre 10% e 25%.

Além disso, Verificou-se, também, que as umidades determinadas com o medidor elétrico se diferenciaram muito das umidades obtidas em estufa (estabilização da massa). As maiores diferenças chegaram a mais de 200% e corresponderam às vigas com umidades mais elevadas (acima de 30%), enquanto as menores diferenças (em torno de 15%) para vigas com umidades mais baixas. Esse fator também é preocupante para o uso da madeira estrutural, já que a classificação da madeira é feita considerando propriedades que foram corrigidas para a umidade de referência com base no valor de umidade aferido para a peça.

3.2.Classificação segundo os diferentes parâmetros

O modelo de inferência do módulo de elasticidade obtido na flexão estática à partir do coeficiente de rigidez (C_{LL}) obtido no ensaio de ultrassom foi estatisticamente significativo (P-valor = 0,000) com $R^2 = 80\%$. Na classificação do lote segundo a norma [1], considerando-se apenas os ensaios mecânicos e tomando -se como referência o ensaio de flexão no trecho elástico, verifica-se que os ensaios de ultrassom classificaram da mesma forma 52% das vigas; em 29% das vigas a classe indicada pelo ultrassom é acima da indicada pelo ensaio de flexão e em 19% é abaixo.

A classificação visual foi a que mais penalizou as vigas, desclassificando para uso estrutural 54% do lote. Como a norma de classificação [1] exige que seja adotada a pior classe (visual ou mecânica), o lote teria 67% das vigas desclassificadas para uso estrutural, 19% na classe 1, 5% na classe 2 e 9% na classe 3 caso fosse adotado o ultrassom na classificação mecânica e 60% desclassificadas para uso estrutural, 14% na classe 1, 7% na classe 2 e 19% na classe 3 caso a classificação mecânica fosse com o módulo de elasticidade.

3.3.Associação da classificação com as classes de resistência da norma de dimensionamento

Utilizando os lotes classificados pela norma [1] e que tinham mais de 6 peças, verifica-se que as vigas que haviam sido desclassificadas (norma [1]) se enquadraram na classe D18 pela norma [2] e as que foram classificadas como Classe 1 pela norma [1] se enquadraram na D35 pela norma [2]. No entanto, os lotes classificados não eram homogêneos segundo a norma [12], pois nenhum apresentou resistência a flexão com coeficiente de variação menor que 20%. Também se verifica que a resistência característica na flexão, atribuída ao lote classificado na norma [1] (50 MPa) foi superior ao obtido na caracterização do lote (37 MPa), sendo o mesmo resultado obtido pela classificação mecânica feita por ultrassom ou flexão estática.

A maioria das vigas foram desclassificadas na avaliação visual, e principalmente pelos parâmetros como fissuras e encurvamentos e não pelos nós e desvios de fibras. A classificação visual considerando

apenas nós e desvios de fibras teria como resultado uma classificação bem mais próxima da classificação mecânica.

4. Conclusões

Os resultados evidenciaram a importância de realizar novos estudos, com amostragem de lotes homogêneos maior e mais abrangente (diferentes classes), que permitam confirmar algumas evidência apontadas pelo lote estudado neste trabalho quanto a umidade elevada de comercialização das madeira; a desclassificação elevada das peças na análise visual e a discrepância entre a resistência característica atribuída ao lote durante a classificação e atribuída conforme o enquadramento nas classes de resistência (caracterização).

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPESP (Processo 2023/03111-0) pelo recurso que poderá permitir a participação no evento.

Referencias

- [1] ABNT NBR 7190-2:2022. Projeto de estruturas de madeira - Parte 2: Métodos de ensaio para classificação visual e mecânica de peças estruturais de madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.
- [2] ABNT NBR 7190-1:2022. Projeto de estruturas de madeira - Parte 1: Critérios de dimensionamento. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.
- [3] ABNT NBR 7190-4:2022. Projeto de estruturas de madeira - Parte 4: Métodos de ensaio para caracterização de peças estruturais. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.15. ABNT NBR 15521 (2007)
- [4] ABNT NBR 15521:2007. Ensaio não destrutivo - Ultrassom - Classificação mecânica de madeira serrada de dicotiledôneas. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.
- [5] GONÇALVES, Raquel; LORENSANI, Rafael Gustavo Mansini; NEGREIROS, Tarik Ottoboni; BERTOLDO, Cinthya. Moisture-related adjustment factor to obtain a reference ultrasonic velocity in structural lumber of plantation hardwood. Wood Material Science & Engineering, 13(5):254-261, 2018.

1038

COMBINACIÓN DE MADERA DE PINO Y CHOPO PARA LA ELABORACIÓN DE VIGAS LAMINADAS MIXTAS

Francisco J. Rescalvo¹; Jose Antonio Lorenzana Fernández²; Yaiza Fuentes García¹; Carlos Cruz Rodríguez¹; María Portela Barral²; María Belén Feijóo Lombao²; Ánxel Vidal Sánchez²; Rafael Bravo Pareja¹; Manuel Guaita Fernández²; Antolino Gallego Molina¹

¹ Universidad de Granada

² Universidad de Santiago de Compostela

Palabras clave / Palavras-chave:

Madera laminada, Chopo, Pino, Mezcla de especies, Industria

Resumen / Resumo:

En este trabajo se recogen los resultados del comportamiento mecánico de vigas laminadas mixtas combinando pino y chopo de forma eficiente, empleando el pino en las capas externas (mayor requerimiento mecánico) y el chopo en las internas. Como probetas de control se han elaborado vigas monoespecie de pino y de chopo. El producto mixto, que alcanza propiedades mecánicas próximas a las vigas monoespecie de pino permite obtener dos beneficios importantes: 1) Reducción de la densidad del producto, aligerando el peso de la estructura; 2) Uso eficiente del recurso forestal, valorizando recursos forestales de los valles (chopo) y los montes (pino).

1. Introducción

Los elementos de madera técnica estructural (EWP) se están convirtiendo en productos muy demandados en los sectores de la construcción y la ingeniería civil, ya que ofrecen soluciones estructurales excepcionales y un entorno saludable para edificios residenciales, pabellones deportivos, edificios industriales e incluso puentes [1].

La madera laminada es uno de los primeros productos de ingeniería de la madera [2]. Actualmente, la industria únicamente suministra vigas de madera laminada monoespecie (pino, abeto, alerce, eucalipto, castaño y roble, fundamentalmente. En el mercado también se pueden encontrar vigas laminadas de roble o castaño. La norma para la elaboración de vigas laminadas UNE-EN 14080 [3] recoge dos tipos de vigas: 1) homogéneas en las que todas las láminas son de al menos una clase resistente definida mínima; 2) combinadas, colocando en la parte externa en sección láminas de mayor clase resistente que en las internas. En ambos casos, la norma únicamente incluye vigas monoespecie, pero deja clara la viabilidad de emplear láminas con diferentes clases resistentes ubicadas en sección de forma eficiente.

Dentro de esta lógica se enmarca la combinación de especies empleando el pino como madera de medias-altas prestaciones mecánicas y el chopo como madera de bajas prestaciones mecánicas. La combinación de diferentes especies de madera presenta una amplia gama de ventajas estructurales que fueron introducidas por Biblis y Moody [4, 5]. En concreto, estos trabajos evaluaron 20 vigas de gran luz elaboradas con abeto Douglas (altas prestaciones) y pino contorta (bajas prestaciones) clasificadas visualmente. Los resultados demostraron que al utilizar el pino contorta (similar al chopo) en la parte interna de las vigas laminadas, las propiedades generales apenas se vieron afectadas con respecto a una viga monoespecie de abeto Douglas. El potencial de la combinación de especies reside en el hecho de que las láminas internas se encuentran cerca de la fibra neutra (tensión a flexión igual a 0), por lo que su exigencia mecánica respecto de la sección global es baja.

Este estudio evalúa las propiedades mecánicas de vigas laminadas mixtas elaboradas con madera de Andalucía, en concreto pino laricio y chopo del clon MC. El trabajo parte de unos resultados previos empleando pino silvestre y chopo del clon I-214. Además, el trabajo pretende poner en valor el uso de madera local, optimizando su aprovechamiento. Esto es posible empleando recursos forestales muy diferentes, con un bajo turno de corta y ubicados en los valles (chopo) para las caras internas y, recursos de montes con un alto turno de corta para las caras externas como es el pino laricio. Es importante remarcar que este pino es el de mejores prestaciones mecánicas de las especies disponibles en España y Europa.

2. Materiales y métodos

2.1. Estudio previo

Como estudio previo, se elaboraron vigas monoespecie y mixtas de pino silvestre y chopo de sección 50 x 102 mm y 2100 mm de longitud. Estas vigas estaban formadas por 6 láminas de grosor 17 mm. En el caso de las vigas mixtas, el pino se colocó en las 2 láminas externas, representando un 34% de la sección total.

2.2. Madera

La madera de pino laricio para la elaboración de vigas laminadas se ha extraído del Monte de Navahondona del Parque Natural de Cazorla, Segura y las Villas.

El chopo del clon MC, la madera se extrajo de una plantación de la Vega de Granada con un turno de corta de 9 años, un marco de plantación de 4 x 5 m y un diámetro a altura de pecho (DBH) medio de 26,6 cm. En ambos casos, la madera se aserró y secó mediante oreo durante 6 meses, con una sección final de tabla aserrada de 45 x 95 mm y una longitud de 2500 mm. El contenido de humedad tras el secado de las tablas fue del $11\% \pm 2\%$.

Tras ello, se llevaron a cabo ensayos acústicos de resonancia de ambas especies, obteniendo el módulo elástico dinámico longitudinal (MoE_{din}). En ambos casos, se obtuvo la distribución normal con un valor medio de MoE_{din} de 10961 N/mm^2 y una desviación estándar de $\pm 1992 \text{ N/mm}^2$ y de 913 N/mm^2 y $\pm 637 \text{ N/mm}^2$ para el pino laricio y el chopo, respectivamente. La Figura 1 representa ambas distribuciones normales.

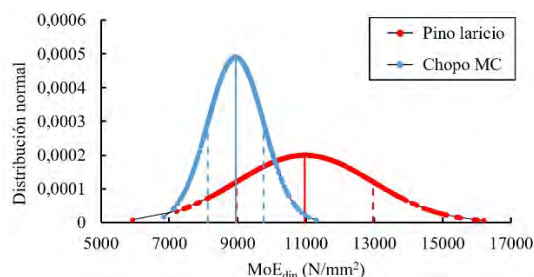


Figura 1. Distribución normal del módulo elástico dinámico longitudinal MoE_{din} . Rojo: Pino laricio. Azul: Chopo

2.3. Elaboración de vigas laminadas

Como elementos de control se elaboraron 10 vigas laminadas monoespecie de pino laricio y 10 vigas de chopo MC. El proceso de elaboración, de geometría y presión para las uniones dentadas, y de orientación de la médula siguió las indicaciones de la norma UNE-EN 14080:2022 [3]. La sección de las vigas se estableció en 75 x 150 mm, con una longitud total de 3000 mm y un grosor de tabla de 25 mm (Figura 2). En el caso de las vigas mixtas pino-chopo se han elaborado 5 vigas, colocando el pino en las dos láminas externas, lo que representa un 33% de la sección total. Este aspecto es importante tanto para la comparación con el estudio previo como para el desarrollo de modelos numéricos parametrizados para la optimización y cálculo de elementos mixtos.

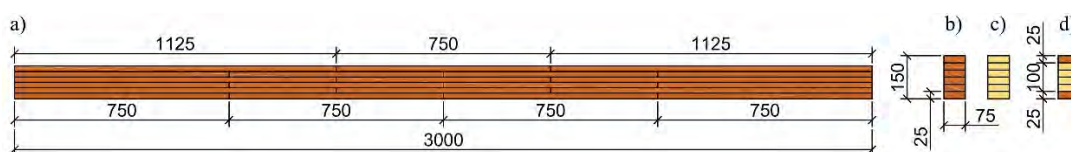


Figura 2. Configuración de las vigas laminadas. a) Vista lateral y distribución de uniones dentadas. b) viga de pino. c) viga de chopo. d) viga mixta pino-chopo

2.4. Ensayos no destructivos

Mediante el método acústico de resonancia, se han obtenido los módulos elásticos dinámicos longitudinal y transversal o cortante, MoE_{din} y G_{din} , respectivamente para todas las vigas, monoespecie y mixtas. En cualquier caso, los valores obtenidos se corrigieron para una humedad del 12% siguiendo la norma UNE-EN 384:2016 [6].

2.5. Ensayos mecánicos

Se han realizado ensayos a flexión a 4 puntos siguiendo las indicaciones de la norma UNE-EN 408 [7]. En el ensayo se ha colocado un extensómetro o LVDT con el fin de obtener el módulo de elasticidad global o MoE_{global} . Este módulo ha sido corregido teniendo en cuenta el módulo de cortante (G_{din}) obtenido en el Apartado 2.4. La distancia entre apoyos se estableció en 2700 mm, con una distancia entre apoyos de 900 mm. El ensayo se llevó a cabo por control de posición con una velocidad de 9 mm/min. Con el fin de evaluar la calidad de encolado en los productos mixtos, se han realizado ensayos a cortante en línea de cola en todas las tipologías de vigas siguiendo la norma UNE-EN 14080 [3].

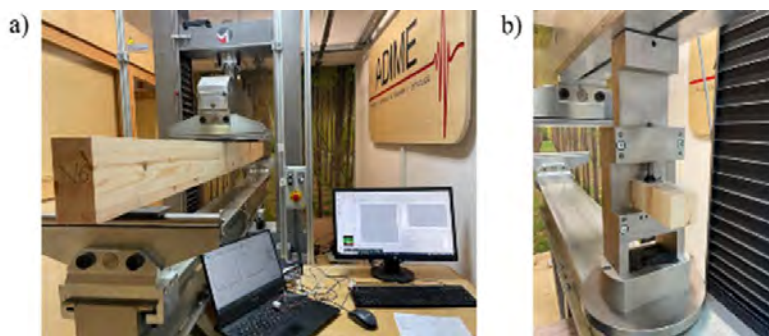


Figura 3. Ensayos realizados a las vigas laminadas. a) Flexión. b) Cortante por línea de cola.

3. Resultados

Respecto de la fase previa, la Figura 4 muestra las curvas de tensión a flexión frente a la flecha para cada tipología de viga, monoespecie de pino silvestre, monoespecie de chopo I-124 y mixtas pino-chopo. Claramente se observa como las vigas mixtas, compuestas por un 34% de pino, alcanzan valores mecánicos similares a las monoespecie de pino. En concreto, las vigas monoespecie obtuvieron un MoE_{global} medio de 15206 y 8478 MPa para el pino y chopo, respectivamente. En el caso de las mixtas, el valor fue de 13057 MPa, suponiendo un incremento del 54% con respecto a las monoespecie de chopo y solamente una reducción del 14% con respecto de las monoespecie de pino.

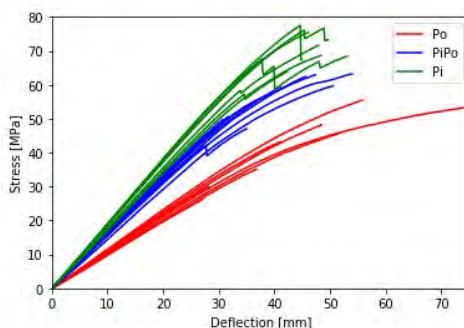


Figura 4. Comparación de vigas monoespecie y mixtas en fase previa. Stress: Tensión a flexión. Deflection: Flecha. Po: Chopo. Pi: Pino. PiPo: Mixtas Pino-Chopo.

Respecto de las vigas de control monoespecie de 3000 mm de longitud, las vigas de chopo MC obtuvieron un MoE_{global} de 8880 N/mm², clasificándose como GL20h [3]. La resistencia a flexión fue de 32 N/mm² con una densidad media de 360 kg/m³. Los ensayos de calidad de encolado arrojaron un valor medio de 9.10 N/mm² teniendo todos los planos de encolado al menos un 99% de rotura por madera. Respecto de las vigas de pino, se ha obtenido un MoE_{global} de 11545 N/mm², (GL24h [3]), con una resistencia a flexión de 51 N/mm². Se obtuvo una densidad media de 557 kg/m³, y una resistencia a cortante en línea de cola de 13,5 N/mm². Junto con la fase previa, estos datos han permitido desarrollar un modelo paramétrico que tiene en cuenta el porcentaje de madera de altas prestaciones en sección, así como el tamaño y longitud del elemento de ensayo. Este modelo permitirá optimizar el uso del recurso para alcanzar las prestaciones necesarias en un porcentaje de madera de altas-bajas prestaciones ideal.

4. Conclusiones

Se ha comprobado que la combinación de especies pino y chopo es viable y necesaria con el fin de optimizar el uso del recurso forestal. Además, el uso de pino y chopo produce una valorización de dos zonas diferentes como son los valles y montes. Esto supone que con un único producto se hace a la vez un aprovechamiento de todo el territorio, generando bioeconomía para la lucha contra la despoblación (reto demográfico), numerosos beneficios ecosistémicos y absorbiendo gases de efecto invernadero en amplias extensiones del mismo.

Agradecimientos

Los autores agradecen el soporte del proyecto europeo LIFE Wood for Future (<https://life-woodforfuture.eu/>) (LIFE20-CCM/ES/001656) y al proyecto SmartTimber (PID2020.114386RB.I00)

Referencias

- [1] Ramage, MH, BurrIDGE, H., Busse-Wicher, M., Fereday, G., Reynolds, T., Shah, D.U., et al. (2017) The wood from the trees: The use of timber in construction. *Renew Sustain Energy Rev.* 68:333–59. doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.107.
- [2] Gong, M. (2021). Wood and engineered wood products: stress and deformation. *Engineered Wood Products for Construction*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.101199>
- [3] UNE-EN 14080:2022. Estructuras de madera. Madera laminada encolada y madera maciza encolada. Requisitos. Asociación Española de Normalización (UNE), Madrid, España.
- [4] Moody, R.C. (1974) Design criteria for large structural glued-laminated timber beams using mixed species of visually graded lumber. *Res. Pap. FPL*. 236, 42.
- [5] UNE-EN 384:2016+A2:2023. Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad. Asociación Española de Normalización (UNE), Madrid, España.
- [6] UNE-EN 408:2011+A1:2012. Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas. Asociación Española de Normalización (UNE), Madrid, España.

1040

COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE UNIONES MADERA-MADERA DE PINO DE RÁPIDO CRECIMIENTO Y CLAVIJAS DE MADERAS

Laura Moya¹; Daniel Godoy Machado²; Diego Passarella³; Gastón Bruzzone González⁴; Jorge Casaravilla⁵; Sebastián Quagliotti Estradé⁶

¹ Universidad ORT Uruguay;

² Instituto de Ensayos de Materiales, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República

³ Centro Universitario Regional Noreste, Universidad de la República

⁴ Facultad de Agronomía, Universidad de la República

⁵ Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo, Universidad de la República;

⁶ Departamento de Productos Forestales

Palabras clave / Palavras-chave:

Capacidad de carga, Madera masiva, Módulo de deslizamiento, Pino uruguayo, Tarugos de madera

Resumen / Resumo:

Los productos de ingeniería de madera del tipo madera masiva tales como la madera laminada clavada (DLT), fabricados sin adhesivos y sin conexiones metálicas están siendo investigados como productos alternativos que contribuyan a reducir las emisiones de CO₂. El conocimiento del comportamiento mecánico de las uniones de madera-madera es crucial para diseñar y predecir el comportamiento general del DLT. En este trabajo se evaluó la capacidad de flexión y de corte de clavijas de 20 mm de diámetro de dos especies de frondosas, se estimó la capacidad de corte y el módulo de deslizamiento de uniones de pino uruguayo construidas con clavijas de madera, y el comportamiento estructural de uniones de pino y clavijas de madera de frondosas. Los resultados indican que las uniones de madera de pino realizadas con clavijas de madera de frondosas son una alternativa viable para la producción de madera masiva, en particular DLT.

1. Introducción

En las últimas dos décadas, la preocupación por el cuidado del medio ambiente ha llevado a científicos a investigar y desarrollar productos innovadores de madera masiva con el fin de contribuir a la reducción de las emisiones de gases de CO₂ [1]. Sin embargo, el uso de adhesivos sintéticos derivados de petroquímicos, y de conexiones metálicas empleados en estos productos está siendo cuestionado a nivel internacional ya que compromete las credenciales de sostenibilidad de los EWP y de la construcción en madera. Los adhesivos sintéticos y las conexiones metálicas requieren gran cantidad de energía para su producción. Adicionalmente, los adhesivos y las conexiones metálicas son los componentes vulnerables de los EWP en situación de incendio y su degradación puede llevar al colapso de la estructura de madera [2,3]. La madera laminada construida con clavijas de madera, de aquí en adelante denominada “madera laminada tarugada”, donde la unión entre las láminas se logra mediante clavijas tipo pasadores de madera, de aquí en adelante denominados “tarugos”. Además, las clavijas metálicas están siendo reemplazadas por tarugos en uniones de elementos estructurales de

madera, i.e., unión viga-pilar, viga-viga, etc. Este trabajo focalizó en el estudio del comportamiento estructural de las uniones madera-madera construidas con madera de pino de rápido crecimiento de Uruguay y tarugos de especies de frondosas.

2. Materiales y métodos

La campaña experimental, dividida en tres etapas, evaluó el comportamiento de i) tarugos en ensayos de flexión, ii) uniones madera-madera en ensayos de corte con la fibra perpendicular a la dirección de la carga, y iii) uniones madera-madera en ensayos de flexión.

Los tarugos utilizados en este estudio provinieron de madera eucalyptus (*Eucalyptus grandis*) y guatambú (*Balfourodendron riedelianum*). Para cada especie, tarugos de 20 mm de diámetro y 200 mm de longitud se acondicionaron en cámara climatizada (65% de humedad relativa y 20°C) hasta alcanzar 12% de contenido de humedad (CH). Las uniones madera-madera se prepararon con pino de rápido crecimiento (*Pinus elliottii*). Para los ensayos de corte se utilizó una configuración simétrica de tres piezas con las tablas externas dispuestas perpendicularmente a la dirección de carga y se prepararon dos series de probetas, una con tarugos de guatambú (PG) y otra con tarugos de eucalyptus (PE). Las tres piezas de 50 x 150 x 450/260 mm³, con 16% de CH, se conectaron con un tarugo previamente equilibrado a 8% de CH. Para los ensayos de flexión, se prepararon dos series de probetas PG-f y PE-f, cada probeta compuesta por tres piezas de madera con la dirección paralela a la fibra, de 50 x 150 x 1500 mm³ unidas con dos tarugos situados en el centro de la altura bajo los dos puntos de carga. Previo a los ensayos mecánicos todos los cuerpos de prueba se almacenaron en cámara climatizada (65% de humedad relativa y 20°C) hasta alcanzar 12% de CH. La descripción de los ensayos se indica en la Tabla 1 y su configuración se muestra en la Figura 1.

Tabla 1. Descripción de ensayos de uniones.

Tipo de ensayo	Referencia	Elemento	Especie	Identificación	Número de muestras
Flexión 3 ptos	[4]	Tarugo D=20mm	Guatambú	G	22
			eucalyptus	E	22
Corte	[5]	Unión madera-madera	pino+tarugo guatambú	PG	8
			pino+tarugo eucalyptus	PE	10
Flexión 4 ptos	[6]	Unión madera-madera	pino+tarugo guatambú	PG-f	3
			pino+tarugo eucalyptus	PE-f	3

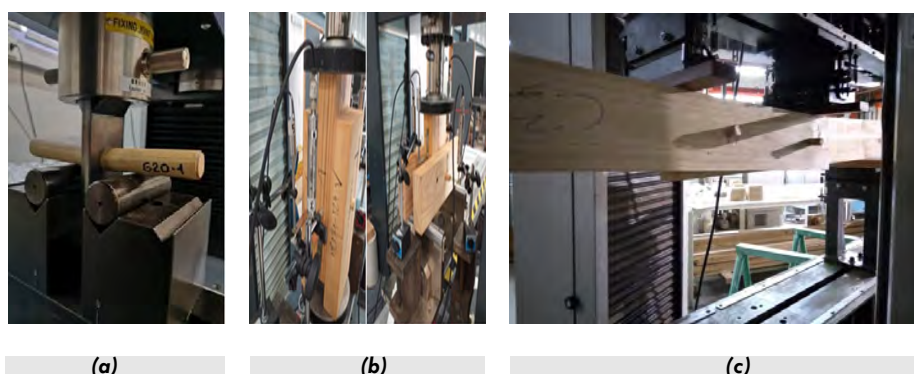


Figura 1. Configuración de ensayos de: (a) flexión de tarugos, (b) corte unión madera-madera, (c) flexión unión-madera-madera.

3. Resultados

Los resultados de los ensayos de los tarugos se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados de ensayos de tarugos de madera. Valores medios y desviación estándar

Especie de tarugo	guatambu	eucalyptus
Carga máxima [kN]	7.56 (1.09)	4.65 (0.57)
Resistencia de flexión [N/mm ²]	168 (24)	104 (13)
Resistencia de corte [N/mm ²]	16.0 (2.3)	9.9 (1.2)
Densidad [g/cm ³]	0.83 (0.4)	0.58 (0.5)
Contenido de humedad [%]	11.9 (0.8)	11.3 (0.8)

Los valores de las resistencias de flexión y de corte de los tarugos de guatambú fueron significativamente superiores ($p < 0.05$) a las respectivas resistencias de los tarugos de eucalyptus. La alta correlación ($r = 0.92$) encontrada entre la densidad y las propiedades mecánicas justifica estos resultados.

En todos los casos, el modo de fallo de los tarugos fue por desgarro en la fibra traccionada más alejada con respecto al plano neutro. La capacidad de corte F_s , definida como la máxima carga observada durante los ensayos de corte madera-madera, indicó valores medios de 14.09 kN (COV=14%) y 7.06 kN (COV=29%) para PG y PE respectivamente. El módulo de deslizamiento K_s determinado de acuerdo a la Ecuación (1):

$$K_s = \frac{0.4F_{s,est}}{v_i} \quad (1)$$

donde $v_i = 4(v_{04} - v_{01})/3$, v_{01} es el deslizamiento correspondiente a la carga $0.1F_{s,est}$ y v_{04} es el deslizamiento correspondiente a la carga $0.4F_{s,est}$

mostró valores medios de $K_s = 3.03$ (COV=24%) y $K_s = 1.79$ (COV=32%) kN/mm para las uniones PG y PE respectivamente. Análisis estadísticos Student t-tests indicaron que los cuerpos de prueba unidos con tarugos de guatambú mostraron valores de capacidad de carga y rigidez superiores a los ensamblados con tarugos de eucalyptus.

La Figura 3 muestra curvas típicas de carga-desplazamiento de ensayos de corte.

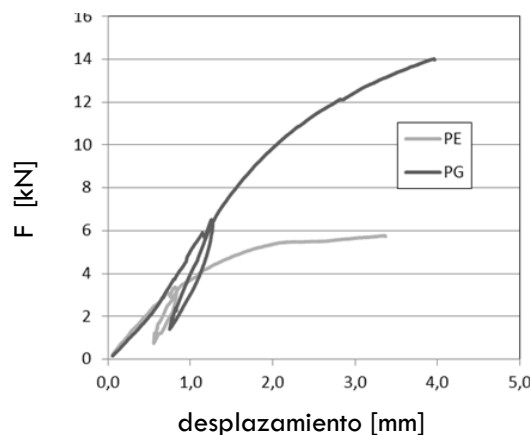


Figura 2. Curvas típicas de carga-desplazamiento de uniones con tarugos de eucalyptus (PE) y de guatambú (PG).

En todos los cuerpos de prueba en el ensayo de corte, el patrón de fallo observado fue el mismo. La carga se transfirió a través del tarugo a la pieza de madera aledaña mediante un esfuerzo combinado de flexión y corte en el tarugo y vía aplastamiento en la pieza de madera. Al final del ensayo, el tarugo a través de la pieza de madera ubicada en el exterior de la probeta permaneció horizontal luego del fallo, correspondiendo con el modo de fallo IV de acuerdo a EN 1995-1-1 [7] según el cual se forman dos rótulas plásticas. En la mayoría de los casos, el fallo ocurrió en los tarugos y no en las piezas de madera. Esta observación es consistente con los resultados reportados por Frontini et al [8] para uniones de madera de coníferas.

La figura 4 muestra una falla típica de uniones en el ensayo de flexión.



Figura 4. Configuración de ensayo y modo de fallo en ensayos de flexión de uniones.

4. Conclusiones

La capacidad de carga de las uniones de pino realizadas con guatambú y eucalyptus son consistentes con los resultados obtenidos en los ensayos de los tarugos de las respectivas especies.

El comportamiento de la carga-deformación para las uniones realizadas con tarugos de guatambú fue superior al correspondiente a las uniones realizadas con eucalyptus. El patrón de fallo más comúnmente observado en los ensayos de corte en las uniones madera-madera fue el correspondiente al modo IV del EYM.

Ensayos de aplastamiento en uniones que están en proceso de ejecución contribuirán a comprender el comportamiento integral de las uniones de madera con clavijas de madera.

Referencias

- [1] Sotayo, A.; Bradley, D.; Bather, M.; Sareh, P.; Oudjene, M.; El-Houjeiry, I.; Harte, A.; Mehra S.; O'Ceallaigh, C.; Haller, P.; et al. (2020). Review of state of the art of dowel laminated timber members and densified wood materials as sustainable engineered wood products for construction and building applications. *Dev. Built Environ*, (1): 1–11.
- [2] Peng, L.; Hadjisophocleous, G.; Mehaffey, J.; Mohammad, M. (2010). Fire resistance Performance of unprotected wood-wood and wood-steel/wood connections: A literature review and new data correlations. *Fire Saf. J.* 45, 392-399.

- [3] Zelinka, S.L.; Sullivan, K.; Pei, S.; Ottum, N.; Bechie, N.J.; Rammer, D.R.; Hasburgh, L.E. (2019). Small scale tests on the performance of adhesives used in cross laminated timber (CLT) at elevated temperature. *Int. J. Adhes.* 95, 102436.
- [4] Thomson, A.; Harris, R.; Ansell, M.; Walter, P. (2010). Experimental performance of non-metallic mechanically fastener timber connections. *The Structural Engineer*, 88, 77, 25-32.
- [5] Bell, T. (2018). A detailed investigation into the engineering properties and challenges affecting the potential introduction of a UK grown dowel-laminated timber floor panel into the domestic construction market. PhD diss., University of Strathclyde.
- [6] Ruan, G.; Filz, G. H.; Fink, G. (2022). Shear capacity of timber-to-timber connections using wooden nails. *Wood Mater. Sci. Eng.* 17, 20–29.
- [7] EN 1995-1-1 (2016); Eurocode 5: Design of Timber Structures—Part 1-1: General-Common Rules and Rules for Buildings. European Union: Brussels, Belgium.
- [8] Frontini, F.; Siem, J.; Renmælmo, R. (2018). Load-Carrying Capacity and Stiffness of Softwood Wooden Dowel Connections. *Int. J. Archit. Herit.* 14, 376–397.

1041

CONEXIÓN AXIAL DE TORNILLOS EN PIES DERECHOS DE BORDE PARA CONTROLAR EL VOLCAMIENTO EN MUROS DE ENTRAMADO LIGERO DE MADERA EN EL SISTEMA MARCO PLATAFORMA

Raúl Araya¹; Nicol López¹; Jairo Montaña¹; Pablo Guindos Bretones¹

¹ CENAMAD

Palabras clave / Palavras-chave:

Anclaje, Campaña experimental, Capacidad axial, Longitud de penetración, Rigidez axial

Resumen / Resumo:

La capacidad y rigidez de las conexiones suele calcularse a partir de la capacidad y rigidez lateral de los medios de unión utilizados en su configuración. No obstante, diversos estudios han demostrado que las propiedades axiales de los conectores pueden llegar a ser superiores respecto a su variante perpendicular (lateral). El presente artículo resume los resultados y caracterización mecánica de la campaña experimental de la influencia de la longitud de penetración de tornillos dispuestos paralelos a la fibra en pies derechos de borde para muros de entramado ligero de madera. Se registran los resultados para longitudes de penetración de 70 mm, 100 mm, 150 mm y 200 mm. Para una configuración de 2 pies derechos de borde, se obtienen capacidades de diseño admisibles en tracción de hasta 1,6 veces las capacidades de anclajes hold down HTT5 de Simpson Strong Tie. De la misma forma, se obtienen rigideces de hasta 6,7 respecto a las del anclaje anterior, esto debido a que se aprovecha la componente de rigidez axial de los tornillos en vez de la lateral.

1. Introducción

El levantamiento en los muros de corte de madera suele suponer una de las principales componentes de deformación lateral, controlada principalmente por anclajes anti-volcamiento tipo hold down o ATS (Anchor Tie System). En particular, para muros de madera en entramado ligero en edificaciones de mediana altura, los anclajes más recurrentes suelen ser los de tipo hold down debido a los esfuerzos solicitantes producto de la cantidad de pisos. En este tipo de anclajes, la conexión se lleva a cabo mediante el uso de tornillos o pernos conectados a los pies derechos de borde, donde la capacidad y rigidez del sistema es diseñada a partir de las capacidades laterales de los conectores de acuerdo con la teoría de falla de Johansen [1]. En este trabajo se estudia el comportamiento de un nuevo tipo de anclaje anti-volcamiento compuesto por tornillos dispuestos en dirección paralela a la fibra de los pies derechos de borde del muro, con el fin de aprovechar las elevadas rigideces axiales de estos conectores [2-3], y por una placa base apernada que permite la unión entre muros de un piso y otro. Se presentan los resultados de la campaña experimental realizada para caracterizar el comportamiento axial de tornillos instalados de forma paralela a la dirección de la fibra en piezas de madera a distintas longitudes de penetración, con el fin de homologar capacidades de diseño respecto a anclajes tipo hold down tradicionales utilizados en Chile.

2. Metodología

2.1. Implementación del concepto

La implementación del sistema propuesto se compone en la incorporación de 2 tornillos de forma paralela a la fibra por pie derecho de borde, una placa base de 16 mm de espesor y dos pernos de anclaje, cuya distribución es esquematizada en la Figura 1. La solicitud de tracción en los pies derechos se transmite desde los tornillos a la placa base, y a su vez a los pernos de anclaje. Por temas constructivos, se requiere de la implementación de un pie derecho adicional en los bordes del muro, el cual no forma parte del sistema resistente lateral del muro. Esto último se controla a partir de un detallamiento constructivo del patrón de clavado en estos pies derechos, con el objetivo de desacoplarlo del tablero resistente a los esfuerzos laterales. La capacidad y rigidez axial del tornillo, y por tanto de la conexión, dependerán entre otros parámetros, de la longitud de penetración que este tenga en la madera y del diámetro del tornillo [2-3].

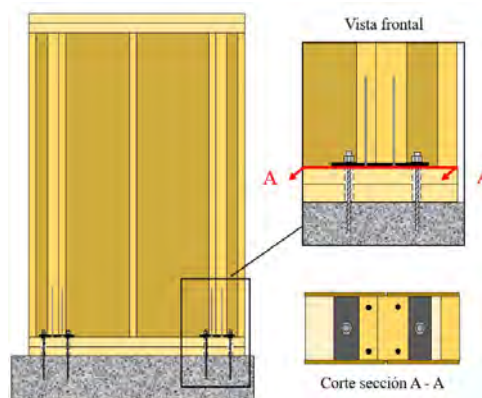


Figura 1. Esquema de la conexión propuesta para muro de entramado

2.2. Diseño experimental

Utilizando como referencia disposiciones de diseño y otras caracterizaciones llevadas a cabo en la literatura [2-6], se definen las especificaciones para la confección de las probetas en términos de dimensiones y espaciamientos. Se realiza una matriz de ensayos en la cual se estudia el efecto de la penetración de los tornillos en piezas de madera de dimensiones 2 x 6 pulgadas nominales (41 x 138 mm), comúnmente utilizadas en la fabricación de pies derechos de borde para entramados de madera en Chile. Se utilizaron tornillos de rosca completa ESCRFTZ8X240 de Simpson Strong Tie, cuyo diámetro roscado es de 8 mm y longitud de rosca hasta 240 mm. En la Tabla 1 se muestran las configuraciones de los sets de ensayos a distintas longitudes de penetración: 70 mm, 100 mm, 150 mm y 200 mm.

Tabla 1. Matriz de ensayos

Descripción de las probetas	Set 1	Set 2	Set 3	Set 4
Longitud de penetración tornillo, p [mm]	70	100	150	200
Longitud madero, L [mm]	300	350	400	550
Relación L/p	4,3	3,5	2,7	2,8
Diámetro vástago, d [mm]	5,2	5,2	5,2	5,2
Diámetro roscado, D [mm]	8	8	8	8
Relación s/D	2,6	2,6	2,6	2,6
Cantidad de probetas	4	4	5	5

Los ensayos de carga axial sobre las probetas se llevan a cabo utilizando el protocolo de carga monotónico descrito en EN 12512 [7], para la caracterización de uniones de madera, mientras que la homologación de los resultados a valores admisibles se lleva a cabo mediante el análisis estadístico de los datos y la aplicación de factores de ajuste calibrados según la filosofía de diseño de tensiones admisibles de la normativa chilena NCh1198 [5].

3. Análisis y resultados

3.1. Rigidez y capacidad axial

En la Tabla 2 se resumen los resultados de la campaña experimental, mientras que en la Figura 2 se muestran las curvas monotónicas obtenidas. Se puede observar que para el tornillo ensayado, el rango de 70 mm a 200 mm de longitud de penetración da como resultado capacidades axiales de 9,39 kN a 23,47 kN; y rigideces axiales de 4,81 kN/mm a 9,51 kN/mm. En la Figura 3 se resumen los modos de falla obtenidos, donde se observó que para penetraciones de 70 mm y 100 mm prevalecía el modo de falla de extracción del tornillo, para 150 mm 2 probetas registraron fractura en la madera, y para 200 mm una probeta registró la rotura del tornillo.

Tabla 2. Capacidad y rigidez axial de tornillos acorde EN 12512

Longitud penetración [mm]	Capacidad axial [kN]		Rigidez axial [kN/mm]	
	Valor medio	Desviación estándar	Valor medio	Desviación estándar
70	9,39	1,68	4,81	0,57
100	13,78	1,69	5,68	0,93
150	18,82	1,72	7,77	0,74
200	23,47	2,03	9,51	0,82

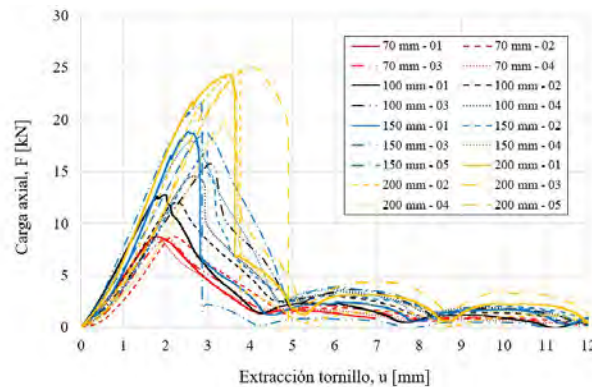


Figura 2. Resultados campaña experimental

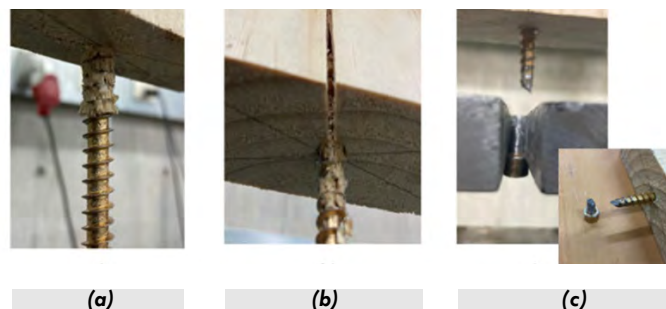


Figura 3. Modos de falla: a) Extracción axial, b) Rotura al borde en madera, c) Rotura en sección transversal del tornillo

3.2. Homologación de valores de diseño

Se comparan los valores obtenidos con un anclaje tipo hold down HTT5 de Simpson Strong Tie [8], cuyos valores de diseño admisibles de capacidad y rigidez son 19,5 kN y 5,69 kN/mm, respectivamente. Para el rango de 70 mm a 200 mm, las capacidades axiales obtenidas por tornillo, en términos admisibles son de 2,40 kN a 7,75 kN. Considerando 4 tornillos axiales en la unión se puede observar que se alcanzan capacidades y rigideces de hasta 1,6 y 6,7; respectivamente, en comparación a un HTT5 y en función de la longitud de penetración.

4. Conclusiones

Los valores de capacidad y rigidez axial obtenidos a partir de penetraciones de tornillos ESCRFTZ8X240 de 70 mm a 200 mm permiten homologar los valores admisibles de diseño de anclajes HTT5, alcanzando capacidades de hasta 1,6 veces al implementar el concepto en una configuración de 2 pies derechos de borde, con un total de 4 tornillos. Los valores de rigidez son de hasta 6,7 veces los valores del anclaje HTT5, por lo que la principal fuente de flexibilidad de la conexión propuesta estará concentrada en la fluencia de los pernos de anclajes y el comportamiento de la placa base.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo y financiamiento otorgado por el proyecto ANID BASAL FB210015 (CENAMAD), junto con el apoyo del Centro UC de Innovación en Madera (CIM UC), y el personal del Laboratorio de Materiales de Construcción de la PUC.

Referencias

- [1] Johansen, K.W. (1949). Theory of timber connections. International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE). Vol.9: 249-262.
- [2] Gutknecht, M.P.; MacDougall, C. (2019) Withdrawal resistance of structural self-tapping screws parallel-to-grain in common Canadian timber species. Canadian Journal of Civil Engineering. 46(10): 952-962. DOI: 10.1139/cjce-2018-0374
- [3] Percin, O.; Yasar, S.; Altunok, M.; Uzun, O. (2017) Determination of Screw Withdrawal Resistance of Some Heat-Treated Wood Species. Drvna Industrija. 68(1): 61-68. DOI: 10.5552/drind.2017.1630
- [4] Uysal, M.; Haviarova, E. (2019) Lower tolerance limits for screw withdrawal in wood. Wood and Fiber Science. 51(4): 375-386. DOI: 10.22382/wfs-2019-036
- [5] Chilean standard (2014) NCh1198:2014 Madera – Construcciones en madera – Cálculo. Instituto Nacional de Normalización (INN), Santiago de Chile, Chile.
- [6] European standard (2010) EN 1995-1-1: Design of timber structures-Part 1-1: General-Common rules and rules for buildings. European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium.
- [7] European standard (2006) EN 12512:2006: Timber structures-test methods-cyclic testing of joints made with mechanical fasteners. European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium.
- [8] Simpson Strong Tie (2021). Wood Construction Connectors. C-C-2021: 54-55.

1042

CONSTRUCCIÓN, MODELADO NUMÉRICO E IDENTIFICACIÓN MODAL EXPERIMENTAL DE UN PROTOTIPO DE ESTRUCTURA DE MADERA A ESCALA 1/2

Patricia Vallelado Cordobés¹; Roberto D. Martínez López¹; José Antonio Balmori¹; Álvaro Iglesias Pordomingo²; Álvaro Magdaleno González²; Antolín Lorenzana Iban²; Lara Del Val Puente³; Juan José Villacorta Calvo³; Alberto Izquierdo Fuente Fuente³; Luis-Alfonso Basterra¹

¹ Universidad de Valladolid; GIR Estructuras y Tecnología de la Madera

² Universidad de Valladolid; Grupo de Dinámica Estructural

³ Universidad de Valladolid; GIR de Procesado en Array

Palabras clave / Palavras-chave:

Pruebas de carga, Análisis modal, Madera industrializada, Método de Elementos Finitos, Prototipo experimental

Resumen / Resumo:

La hipótesis fundamental de la que parte este trabajo consiste en la relación existente entre el comportamiento de un mismo sistema estructural complejo ante una carga estática y una excitación dinámica, con el objetivo de encontrar un algoritmo que los relacione y así ganar sencillez a la hora de realizar pruebas de carga.

Dada la influencia de los diferentes condicionantes que pueden afectar al comportamiento real de una estructura, se ha construido un prototipo experimental de CLT+MLE a escala 1/2, y se ha instrumentalizado para medir deformaciones y tensiones de la estructura, sometida a las pruebas de carga estática convencionales. A la vez, se han implementado equipos microelectrónicos de bajo coste, basados en tecnología MEMS, para obtener su comportamiento dinámico y modal ante excitaciones de tipo dinámico. Por último, se ha desarrollado un gemelo digital paramétrico, procesable con programas de análisis de estructuras basados en el Método de Elementos Finitos, calibrable a partir de los resultados obtenidos. La campaña experimental incluye tres fases: modelo teórico MEF (1), pruebas de carga (2) y pruebas dinámicas (3), correlacionando sus resultados.

1. Introducción

Las estructuras de madera son especialmente susceptibles a variaciones en su comportamiento debido a factores como las uniones mecánicas, las propiedades intrínsecas del material y las condiciones ambientales, que pueden influir notablemente en sus características mecánicas y elásticas.

Este trabajo persigue la estimación de las propiedades estáticas por medio de técnicas dinámicas de bajo coste. Las pruebas de carga estática son una técnica sencilla y altamente probada, pero con una logística compleja, largos tiempos de ejecución y un cierto riesgo asociado a las grandes cargas a la que se somete la estructura. Por otra parte, las pruebas dinámicas son consideradas menos intrusivas y potencialmente pueden también ser representativas de las condiciones en servicio. Podrían ofrecer una alternativa viable y eficiente para evaluar la capacidad estructural a través de la correlación de datos derivados de pruebas dinámicas, como el análisis modal, con los parámetros estáticos

tradicionales. La ausencia de una normativa específica para tales ensayos resalta la importancia e innovación de esta propuesta metodológica.

La prueba de carga estática permite medir la flecha bajo una determinada carga. Midiendo flecha y carga y asumiendo linealidad, se puede conocer la rigidez de la estructura asociada a su deformada estática. Con ensayos dinámicos también es posible conocer la rigidez asociada a formas modales. En el supuesto de que la deformada estática se asemeje a la deformada de alguno de los modos de vibración, se tendrá un procedimiento alternativo para obtener la rigidez.

Este trabajo se inscribe dentro de una tesis doctoral en curso y como continuación de la línea de investigación abierta por el GIR de Estructuras y Tecnología de la Madera, asociado con el GIR de procesado en array y el Grupo de Dinámica Estructural, todos de la Universidad de Valladolid.

2. Material y métodos

2.1. Modelo a escala 1/2

Se ha construido un prototipo concebido como una reproducción a escala 1:2 de una estructura de madera real de dos plantas, de dimensiones 5,42 x 3,28 m en planta y 3,20 m de altura (Figura 1). La estructura se compone de seis pilares, 10 vigas de madera laminada (MLE), y cuatro paneles de madera contralaminada (CLT) formando los dos forjados. La madera empleada en los pilares y vigas es GL24h, según norma UNE EN 14080:2022 [1] y los paneles CLT se componen de tablas clasificadas como C18 según norma UNE EN 338 [2], de procedencia nacional.

2.2. Modelo digital

Se ha desarrollado un modelo de cálculo analítico mediante el programa de análisis de estructuras 3D DLUBAL, adecuado para el análisis estructural y dinámico de estructuras de barras y planos y el dimensionamiento de estructuras basándose en el Método de los Elementos Finitos (MEF). Este modelo pretende convertirse en un gemelo digital de la estructura construida. Para ello será calibrado a partir de los resultados de deformaciones obtenidos en de las pruebas de carga y con el comportamiento modal obtenido de las pruebas dinámicas.

Se modeliza la estructura con las siguientes consideraciones de partida: todas las uniones que no tienen vigas o pilares continuos son articulaciones puras, los paneles CLT están simplemente apoyados en las vigas (se deprecian los tirafondos), y las características del material están consideradas según la clase resistente.



Figura 1. Estructura de madera (MLE+CLT) experimental desarrollada y sensorizada.

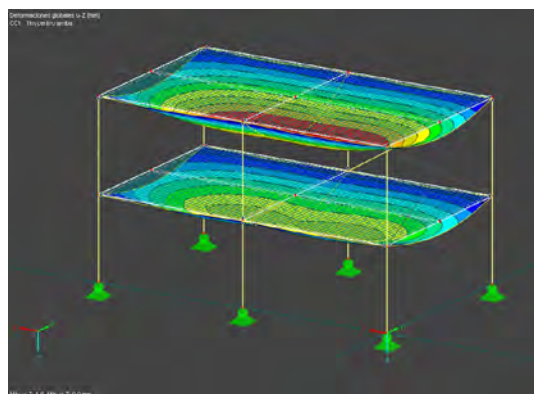


Figura 2. Modelo 3D DLUBAL de la estructura (deformaciones z).

2.3.Campaña experimental

2.3.1. Pruebas de carga estática

La Norma UNE 7457:1986 “Realización de ensayos estáticos de puesta en carga sobre estructuras en piso de edificación” define el ensayo de carga como el proceso de investigación sobre una estructura ya construida, o parte de ella, mediante la reproducción de un estado de carga determinado, con el fin de obtener datos experimentales sobre su seguridad y/o comportamiento estructural [3]. La prueba de carga se realiza aplicando fuerzas constantes y crecientes que se incrementan de forma escalonada, midiéndose los desplazamientos que se producen en la sección central, donde se da la mayor flecha. En este trabajo se emplean piscinas de agua como elementos de carga y extensómetros inductivos para obtener las flechas en los centros de los vanos. A mayores, se distribuyen galgas extensiométricas en algunos elementos lineales para obtener las tensiones. Mediante el sistema de adquisición de datos Quantum, se realiza una monitorización en tiempo real de la estructura a lo largo de la prueba de carga. Una vez se han obtenido los resultados de la prueba, se verifican los cálculos realizados en fase de diseño para redefinir los parámetros e hipótesis y calibrar el modelo digital.

Uno de los problemas que presenta este tipo de pruebas es su proceso de ejecución. Debido a su ardua preparación, los largos tiempos de desarrollo de la prueba y la cantidad de equipos que se necesitan, se generan unos costes elevados.

En cuanto a la normativa existente, cabe destacar su antigüedad y falta de actualización. No existe un acuerdo internacional en cuanto a la metodología de realización. Las normas originales, sin revisar desde hace décadas, proponen procesos que ocupan largos periodos. Sin embargo, la tendencia de las normativas más actuales, como la alemana [4] o la estadounidense [5], es ir a pruebas cíclicas, con una mayor complejidad para la puesta en carga, pero con una reducción de tiempo considerable. No obstante, todas ellas están bastante enfocadas a estructuras de hormigón.

2.3.2. Pruebas dinámicas

Las técnicas de análisis y diagnóstico de la salud estructural (SHM) basadas en la respuesta dinámica y el análisis modal ambiental u operacional se han usado con éxito para identificar daño en edificaciones y obras civiles. Los parámetros modales son función de las propiedades físicas y mecánicas del material (masa, amortiguamiento y rigidez). Los cambios en dichas propiedades se traducen en cambios en las propiedades modales. La heterogeneidad y variabilidad de las propiedades mecánicas de la madera pueden enmascarar las variaciones modales.

Las pruebas dinámicas se realizarán a partir de un excitador de vibración de carrera larga ELECTRO-SEIS® APS_113_HF, con cojinete de bolas (configurable), y un martillo modal IH-10. Se aplicará la cadena de medida AmemoMe, desarrollada por el grupo [6] para el procesamiento de la señal procedente de acelerómetros triaxiales digitales, con medidor de constantes ambientales (T^a y HR aire) y sistema MyRio (Figuras 3 y 4). La segunda generación de este tipo de sensor, también desarrollado por el grupo, se encuentra en proceso de protección bajo patente [7].



Figura 3. MyRIO con dos placas adaptadoras y un acelerómetro.

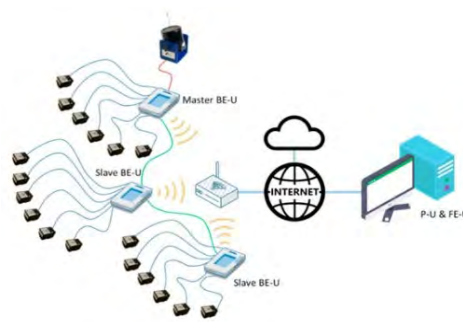


Figura 4. Configuración del sistema distribuido.

Se comienzan los ensayos identificando modalmente uno de los forjados de CLT. Se trata de buscar las propiedades equivalentes de la placa, asumiendo un comportamiento lineal, homogéneo e isótropo. Se parte de un modelo inicial donde, mediante el Método de los Elementos Finitos y con propiedades nominales, se obtiene una estimación de la masa, la flecha bajo carga y las primeras formas modales. En base al comportamiento estimado, se deciden las ubicaciones de los sensores (acelerómetros) y la forma más idónea de carga (estática) y excitación (dinámica). Dados los medios disponibles (sistema de monitorizado de desarrollo propio) se decide excitar mediante múltiples impactos y registrar la respuesta en aceleraciones en hasta 6 puntos sincronamente. Tras el análisis modal experimental, mediante las funciones de respuesta en frecuencia, se procede a la extracción de las propiedades modales (frecuencias, amortiguamientos y formas modales) y a su comparación con las del modelo computacional inicial. A la vista de las discrepancias, se inicia un proceso iterativo tras el cual se consigue determinar, dentro de un rango admisible, los parámetros de densidad, módulo de elasticidad y rigidez de los apoyos que hacen que el modelo numérico mejor se aproxime a la realidad experimental. Con el modelo ajustado, se comparan resultados tanto estáticos como dinámicos, valorando la bondad del ajuste realizado.

3. Líneas de investigación futuras

- **Estudio de daños ocultos realizados artificial y aceleradamente.** Los daños estructurales en las estructuras de madera conllevan pérdidas de densidad, rigidez y resistencia que se traducen en cambios en las propiedades dinámicas (frecuencias propias, modos de vibración y amortiguamiento estructural).
- **Control remoto de la salud de las estructuras de madera** aplicando un sistema avanzado de control digital que permita anticiparse predictivamente a la aparición de daños significativos, empleando una red de sensores electrónicos de bajo coste y algoritmos automáticos de desarrollo propio. La introducción de técnicas predictivas inteligentes (IA) a partir de datos de control servidos por los equipos desplegados en la estructura, así como la aplicación de técnicas de Edge Computing en los sensores y sus procesadores, permitirá la generación de alertas tempranas fiables.

Agradecimientos

Esta investigación fue financiada por la Junta de Castilla y León, cofinanciada por la Unión Europea a través del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) (ref. VA228P20).

Referencias

- [1] UNE-EN 14080, "Timber structures. Glued laminated timber and glued solid timber. Requirements." Asociación Española de Normalización AENOR, 2022. [Online]. Available: www.une.org
- [2] UNE-EN 338, "Structural timber. Strength classes." Asociación Española de Normalización AENOR, 2016. [Online]. Available: www.une.org
- [3] UNE 7-457, "UNE 7-457-86 Realización de ensayos estáticos de puesta en carga sobre estructuras de piso en edificación." Instituto Español de Normalización IRANOR, 1986.
- [4] "DAfStb Belastungsversuche." DAfStb, 2020.
- [5] ACI 437.2, "ACI 437.2-13 Code requirements for load testing of existing concrete structures." American Concrete Institute. Committee 437, 2014.
- [6] J. J. Villacorta *et al.*, "Design and Validation of a Scalable, Reconfigurable and Low-Cost Structural Health Monitoring System," 2021, doi: 10.3390/s21020648.
- [7] Universidad de Valladolid, "Patente española P202230280: 'Dispositivo de medición para una estructura arquitectónica,'" P202230280, 2022

1043

CONTRASTE EN EL COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE ESTRUCTURAS DE MARCO PLATAFORMA SEGÚN LA RIGIDEZ EN EL PLANO DEL DIAFRAGMA: UNA METODOLOGÍA IMPLEMENTABLE EN ETABS

Fernando Véliz Sanzana¹; Sebastián Berwart Astudillo¹; Pablo Guindos Bretones¹

¹ CENAMAD

Palabras clave / Palavras-chave:

Análisis en el plano, Diagonal equivalente, Modelación numérica, Sistema marco plataforma

Resumen / Resumo:

Este artículo presenta la implementación de un método de modelación para diafragmas de madera en estructuras de entramado ligero, cumpliendo con los estándares SDPWS. El método utiliza diagonales equivalentes y puede representar diafragmas con rigidez infinita, flexible o real. Además, permite considerar el comportamiento fuera del plano de la losa, abordando combinaciones de carga gravitacional y lateral. Al usar la rigidez real del diafragma, el modelo evita supuestos simplificados que suelen sobreestimar solicitaciones y llevar a estructuras sobredimensionadas. Se aplica el modelo en estructuras simples y en una vivienda de 4 pisos, variando la rigidez de los diafragmas. Los resultados indican que el modelo proporciona una distribución precisa de cargas en muros y anclajes, diferenciándose de enfoques de envolvente. Esto permite un diseño más preciso sin sobredimensionar componentes y, por lo tanto, reduce los costos constructivos.

1. Introducción

En las últimas décadas, la investigación sobre construcciones en altura en madera ha ganado relevancia en ingeniería estructural [1]. Este enfoque plantea el desafío de utilizar soluciones constructivas rígidas y fuertes tanto para el sistema gravitacional como para el lateral. Aunque los muros de corte y los sistemas resistentes a carga lateral (SRCL) son cruciales, comprender plenamente el comportamiento de los diafragmas y verificar su resistencia elástica es igualmente crucial. A menudo, los diafragmas se modelan como infinitamente rígidos o flexibles [2] debido a limitaciones de conocimiento, herramientas o capacidad computacional, lo que resulta en el diseño por envolvente, el que suele sobreestimar las solicitaciones, y no permite conocer las solicitaciones dentro del diafragma. Este artículo presenta un modelo fácilmente implementable en softwares de elementos finitos (FEM) llamado Modelo de Diafragma con Diagonal Link (MDDL), basado en el modelo *Truss* de Moroder [3] y adaptado para la modelación de losas igualmente fuera del plano.

1.1.Descripción y validación del MDDL

El modelo MDDL trabaja bajo el supuesto de un diafragma modelado como una viga con deformación por corte considerable [3], es decir, la deformación por corte de los paneles estructurales puede ser obtenida a partir de la Ecuación (1)

$$\Delta_{panel,corte} = \left[\frac{1}{Gd} + \frac{2s}{K_{ser}} \left(\frac{1}{b} + \frac{1}{h} \right) \right] \cdot \frac{FB}{H} = \frac{1}{(Gd)_{ef}} \cdot \frac{FB}{H} \quad (1)$$

Donde G es el módulo de corte del panel estructural, d es el espesor del tablero estructural, K_{ser} es el módulo de corrimiento del clavo, y s es el espaciamiento entre clavos. El resto de las variables se presentan brevemente en la **Figura 1**.

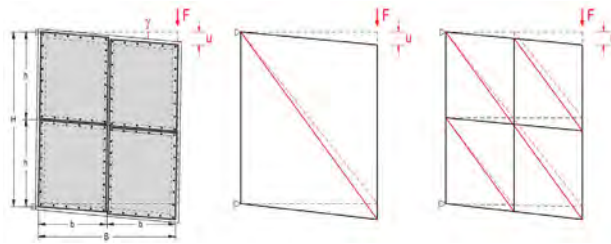


Figura 1. Modelo de diagonal equivalente con múltiples paneles. Adaptado de Moroder [3]

Se puede notar de la Ecuación (1) que el término $(Gd)_{ef}$ incluye la rigidez en serie del panel estructural y de los conectores arriostrantes, y que viene de un análisis matemático similar al utilizado por la SDPWS [4] para calcular el valor G_a de las soluciones de diafragmas, como se presenta en la Ecuación (2)

$$G_a = \frac{1,4v_{s(ASD)}}{\frac{1,4v_{s(ASD)}}{G_v t_v} + 0,75e_n} \quad (2)$$

En este sentido, y para seguir los lineamientos de la SDPWS [4] se ha decidido utilizar el valor de G_a para el modelo, en lugar de $(Gd)_{ef}$. Se puede verificar que, al usar G_a , los valores de desplazamiento de diafragmas modelados, versus el modelo analítico de la SDPWS [4] son equivalentes. Esta aproximación es más amigable con el usuario, dado que existe gran cantidad de valores G_a disponibles en la norma norteamericana, según diferentes configuraciones de diafragmas.

A continuación, el valor elegido de G_a debe ser escalado a las dimensiones del reticulado (cuadrado o rectángulo) a utilizar, según la Ecuación (3), para obtener la rigidez del elemento Link que será utilizado en la diagonal. El autor sugiere utilizar dimensiones de reticulados de 30, 40 ó 60 cm, dada la facilidad para luego distribuir el envigado gravitacional de acuerdo con estos espaciamientos típicos.

$$E_{ef} = \frac{G_a l_{ef}^2}{b_j h_j} \quad (3)$$

Con $l_{ef}^2 = b_i^2 + h_i^2$. Para completar los reticulados, se debe agregar un elemento de bloqueo (usual en diafragmas bloqueados), cuya rigidez corresponde a la de la viga de madera utilizada, y es modelada como un elemento Link uniaxial, dado que los elementos bloqueantes solo tienen aporte lateral, y no gravitacional. La manera de obtener la rigidez del elemento bloqueo se presenta en la Ecuación (4)

$$K_{bloqueo} = \frac{E_{viga} A_{viga}}{L_{viga}} \quad (4)$$

Los 3 elementos fundamentales descritos son arriostrados mediante un elemento Shell tipo membrana, con rigidez nula, únicamente para permitir la distribución de cargas gravitacionales/sísmicas sobre el diafragma, como cargas superficiales. Los elementos viga deben ser liberados en el plano para actuar como reticulado, y a su vez los bordes de cada viga deben ser liberados fuera del plano, para actuar como vigas simplemente apoyadas. La **Figura 2** presenta las deformadas en el plano y fuera del plano para una losa apoyada sobre 3 muros (en dirección Norte-Sur) igualmente espaciados, donde el vano izquierdo tiene vigas en sentido Este-Oeste (L: 3,6 m), y el vano derecho tiene vigas en dirección Norte-Sur (L: 5,2 m). Los valores obtenidos coinciden con los de los modelos analíticos correspondientes.

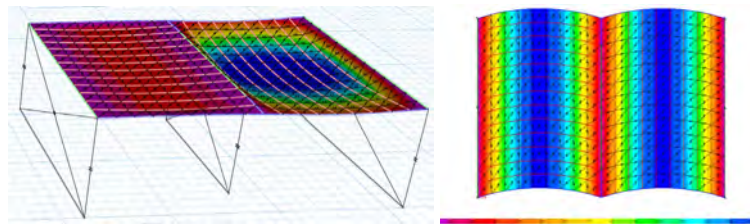


Figura 2. Campo de deformaciones fuera del plano (izquierda) y dentro del plano (derecha)

2. Implementación del MDDL en una estructura real

2.1.Descripción

Se presenta una estructura de 4 pisos (Estrella et. al 2019). Para esta investigación, se modelaron los muros mediante el Modelo Link-Frame (López et al. 2024), utiliza links diagonales equivalentes, y considera el volcamiento acumulado por piso. Tal modelo es altamente versátil para trabajar en conjunto con el modelo MDDL. Se utilizaron 4 tipos de diafragmas distintos: infinitamente rígido, alta rigidez, baja rigidez y muy flexible. Las rigideces del segundo y tercer diafragma fueron obtenidas a partir de ensayos experimentales ($G_a=5430 \text{ N/mm}$ y $G_a=1220 \text{ N/mm}$, respectivamente), disponibles en (Véliz et al., 2023) y (Véliz et al., 2024). Para obtener las cargas sísmicas se utilizó el análisis estático prescrito en la norma chilena NCh433 (INN, 2012). La **Figura 3** muestra la planta del edificio, junto al campo de deformaciones del diafragma del piso 4 (con sismo actuando en dirección X), cuando se asume diafragma muy rígido, y muy flexible. Adicionalmente se muestra una vista isométrica del edificio.

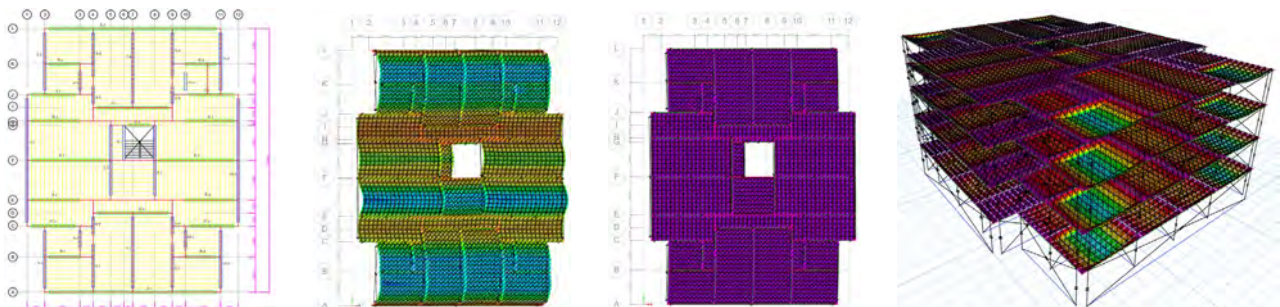


Figura 3. Estructura estudiada. De izquierda a derecha: (1) Planta real, (2) Deformación con diafragma flexible, (3) Deformación con diafragma rígido, (4) Vista isométrica con deformación gravitacional

2.2. Resultados y contraste

El modelo predice las deformaciones gravitacionales del envigado y muestra diferencias en la distribución de cargas laterales entre el uso de diafragmas rígidos y flexibles (ver **Figura 3**). Además, al aplicar el modelo MLF [6] para muros y considerar links verticales para los *Hold-down*, se reduce significativamente la carga al tener en cuenta el efecto de amarre de muros perpendiculares a la dirección de la carga, en comparación con cálculos manuales tradicionales. La **Figura 4** presenta las cargas en los muros en dirección X bajo un sismo, evidenciando que, aunque la mayoría de las solicitaciones quedan dentro de la envolvente, algunos casos muestran valores cercanos al mínimo de la envolvente (Muro B.1, B.2, K.1, K.2) e incluso algunos quedan fuera de la envolvente (Muro H.2, I.1). Esto respalda la idea de usar la distribución de corte real sobre el diafragma para evitar diseños no conservadores.

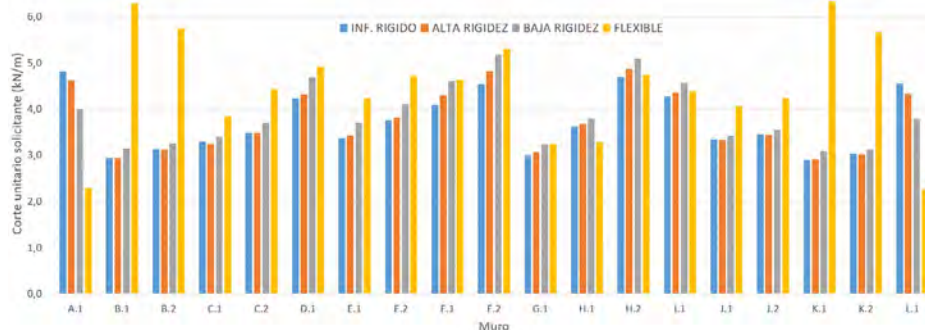


Figura 4. Cortes unitarios solicitantes en muros (Sismo en dirección X) según tipo de diafragma

3. Conclusiones

El modelo MDDL ha posibilitado la determinación precisa de la distribución de cortes hacia el SRCL, así como la comprensión de la distribución de cortes en el diafragma, con el objetivo de garantizar su comportamiento elástico. El análisis llevado a cabo ha evidenciado la redistribución de las solicitaciones en función de las disparidades de rigidez en el plano del diafragma. La implementación de este modelo conlleva una reducción significativa de las solicitaciones tanto en los muros como en anclajes, generando una disminución considerable de los costos constructivos.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo entregado por ANID BASAL FB210015 CENAMAD.

Referencias

- [1] M. Follesa, M. Fragiaco, D. Casagrande, R. Tomasi, M. Piazza, D. Vassallo, D. Canetti, S. Rossi, The new provisions for the seismic design of timber buildings in Europe, *Engineering Structures* 168 (3) (2018) 736–747. doi:doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.04.090

- [2] ASCE. Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures. American Society of Civil Engineers (ASCE); 2017. <https://doi.org/10.1061/9780784414248>.
- [3] D. Moroder, T. Smith, S. Pampanin, A. Palermo, A. Buchanan, Design of floor diaphragms in multi-storey timber buildings, in: Proceedings of the New Zealand Society for Earthquake Engineering annual Conference, O-32, Christchurch, New Zealand, 2015. doi:www.nzsee.org.nz/db/2015/Papers/O-32_Moroder.pdf.
- [4] American Wood Council. Special Design Provisions for Wind and Seismic. 2021.
- [5] Estrella, X., Guindos, P., & Almazán, J. L. (2019). Ground motions for FEMA P-695 application in subduction zones. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 16, e237.
- [6] López, N., Berwart, S., Guindos, P., The Link Frame Model (LFM), a tool for the seismic analysis timber frame buildings considering system effects, *Engineering Structures*. *Under review*.
- [7] F. Veliz, X. Estrella, J. Lagos, P. Guindos, Testing and nonlinear modelling of industrialized light-frame wooden diaphragms including optimized nailing and nonstructural sheathing, *Engineering Structures* 297 (2023) 117017. doi:doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.117017
- [8] F. Veliz, M. Chacón, J. Lagos, P. Guindos, Critical comparison of strong timber diaphragms: high-capacity light-timber frames versus CLT, *Structures* (2024). *Under review*.
- [9] Instituto Nacional de Normalización, Diseño sísmico de edificios NCh433 Of. 96, Santiago de Chile, 2012.

1044

CROSS-LAMINATED TIMBER AND CONCRETE COMPOSITE: AN EXPERIMENTAL AND NUMERICAL EVALUATION

Ramon Vilela Bergamin¹; Nilson Tadeu Mascia¹; Pablo Augusto Krah²

¹ University of Campinas

² Mackenzie Presbyterian University

Palabras clave / Palavras-chave:

Bending test, CLT-Concrete, Failure, Finite element analysis, Semi-rigid connections

Resumen / Resumo:

The application of Cross Laminated Timber (CLT) in civil construction is justified by its architectural and structural performance, as well as its sustainable aspects attributed to wood. However, when the project requires an increase in stiffness and strength, an interesting alternative is to produce composite slabs of CLT interconnected with a layer of concrete on top. This study investigates the structural performance of CLT-Concrete composite plates with semi-rigid connections. For this study, five CLT-Concrete plates with structural dimensions were industrially produced and tested through a four-point bending test, being four ones with HBV® connections and one of them without connections. Furthermore, a finite element analysis (FEA) via software ABAQUS was used to simulate the structural behaviour of these plates and connections. The experimental and numerical results demonstrate an increase in load capacity and stiffness, and a change from brittle to ductile failure, indicating a significant improvement in the structural safety of these composite elements.

1. Introduction

The production and use of cross laminated timber (CLT) are a reality in several countries around the world and its growth has been promising [1], giving aspects of sustainability with reduced CO₂ emission, energy efficiency associated with thermal comfort, and an adequate structural performance [2]. Research on the mechanical behaviour of CLT has provided a better understanding of this wooden product's safety and reliability for structures [3].

Compared to the CLT system, the CLT-Concrete composite system provides several advantages, including: *i.* Increased stiffness and strength [4]; *ii.* Enhanced fire resistance: The concrete layer on top of the CLT acts as a protective layer, improving the fire resistance of the composite plate [5]; *iii.* Better vibrational performance [6]; *iv.* Reduced fungal growth [7]; *v.* Improved seismic performance [8]; *vi.* Although there is much scientific knowledge about timber concrete composites structures [9], currently, there are no existing normative procedures to regulate the design of CLT-Concrete composite elements. In this sense, it is relevant to understand the mechanical behaviour and mode of rupture of CLT-Concrete elements in order to improve knowledge about this topic and contribute to the design of this new system.

In this scenario, the present paper aims to investigate how the structural behaviour of Brazilian CLT plates connected with HBV® sheets works when subject to bending.

2. Materials and methods

2.1. Experimental tests

For experimental evaluations, Crosslam, a Brazilian company, produced five CLT plates with a layup of 40L-20T-40L-20T-40L, each with a thickness of 160 mm. The raw material used to produce these layers was *Pinus taeda* L. wood species from Brazilian reforestation plantations. All of the plates received a layer of concrete 70 mm thick on top, making a total CLT-Concrete composite plate thickness of 230 mm. The specimens had a length of 4000 mm and a width of 800 mm. Figure 1 shows the experimental test set up.

One of the specimens was manufactured without mechanical connectors and was named by D1. In other specimens, metallic sheets of HBV® with a width of 90 mm, which were made by Germany TiComTec GmbH, were embedded in the same direction as the longitudinal layers, with a spacing of 200 mm to connect the CLT with the concrete layer. These connectors were embedded 40 mm into the CLT and 50 mm into the concrete layer. The CLT-concrete plates were named by E1, E2, E3, and E4.

Between CLT and concrete was installed a tarp plastic to minimize the wet transmission between materials while the concrete was fresh.

The five specimens were experimentally tested using a four-point bending test following the recommendations of BS EN 16351 [10] to determine the maximum load before rupture, as well as the displacements, strains, and slips between the CLT and concrete layers. Seven strain gauges were positioned along the mid-span section (z-axis) of each specimen, being two of them Kyowa model KC-60-120-A1-11 and were used on the concrete surface, while the other five ones, model Kyowa KFGS-5-120-C1-5, were applied to the wood layers.

The bending (EI_{ef}) and shear (GA_{ef}) stiffnesses were obtained from the experimental instrumentations, which considered the displacements relative to the region of pure bending moment and those relative to supports.

2.2. Numerical analysis

Numerical analysis was performed using the ABAQUS software. The model employed solid elements and the wood orthotropic model considering the longitudinal (L), radial (R), and tangential (T) directions. To minimize the concentration effect of the linear load, the lines of support and load were modelled with 5 mm thick steel sheets. The following configurations were used for the step controls: geometric nonlinearity was considered in the numerical analysis; a dissipated energy fraction was selected for the automatic stabilization box.

To reduce both the number of finite elements and processing time, two symmetric regions were imposed perpendicular to the x and z directions.

The properties of the steel sheets were established as isotropic elastic model, in which the Young's modulus $E = 205$ GPa and Poisson's ratio $\nu = 0.3$.

The density of the concrete was set to $\rho = 2400$ kg/m³, with the isotropic elastic parameters, Young's modulus $E = 24674.5$ MPa and a Poisson's ratio $\nu = 0.2$. Furthermore, to simulate the post-elastic behaviour of the concrete material from $f_{ck} = 30$ MPa, Concrete Damaged Plasticity (CDP) properties were imposed. The concrete's inelastic strain and displacement (fissure opening) properties were considered.

The external layers of CLT (1st and 5th layer) were assigned wood properties, including a mass density of $\rho = 550$ kg/m³, a longitudinal elastic modulus of $E_L = 11000$ MPa, considering elastic orthotropic behavior and plasticity with a maximum stress of 20 MPa. The internal layers (2nd, 3rd, and 4th) were assigned a mass density of $\rho = 480$ kg/m³ and under elastic orthotropic behavior with a longitudinal elastic modulus of $E_L = 4608$ MPa.

The model named "Glued" used contact to simulate tangential, normal, cohesive and damage behaviour. A friction coefficient was assigned to the tangential behaviour. The normal behaviour used the "hard" contact option, while traction-separation behaviour was specified for the cohesive behaviour, with uncoupled stiffness coefficients and no field variables. The maximum normal stress criterion was adopted for the damage property.

The "No-Glue" model contact only had normal behaviour and used the "hard" contact option. For Steel-Wood contact, a friction coefficient of 0.65 was used, while the Steel-Concrete contact was assigned a friction coefficient of 0.57. The "Wood-Concrete" contact had the same normal, cohesive and damage behaviour as the "Glued" contact, except for the tangential behaviour, which had a friction coefficient of 0.20 considering the tarp plastic between the materials.

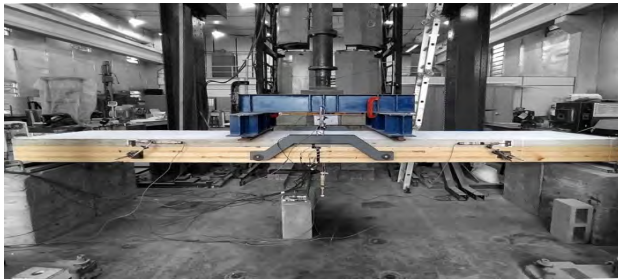


Figure 1. Four-point bending test of CLT-Concrete plates

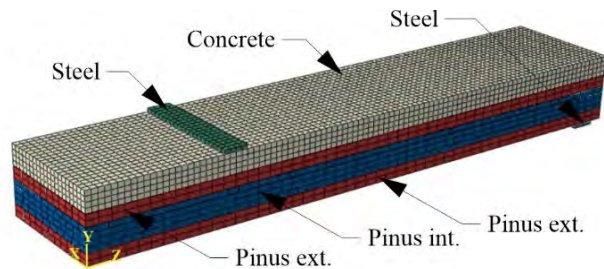


Figure 2. Numerical model

3. Results and discussions

The most common mode of rupture occurs in the tensile region of the finger joints in the lower layers. In addition, the wood layer near the knots is also a common location for rupture. It is worth noting that delamination between the penultimate and last layers and the propagation of the fracture are also common modes of rupture.

Figure 3 presents the load-displacement results obtained by the load cell and a pair of transducers positioned at the midspan. The figure shows that the maximum load obtained from the CLT-Concrete specimens without connection (D-series) resulted in a fragile rupture, while the E-series specimens demonstrated an increase in load post-initial rupture. Additionally, Figure 6 indicates a significant increase in stiffness when the layer of concrete was connected to the CLT.

The discrepancy in slip between specimens with and without connectors was evident in experimental results. For example, while the slip in the D1 specimen was 5.3 mm at a load of 93.5 kN, the E-series specimen exhibited only a few hundredths of a millimetre of slip at the same load.

Furthermore, the strain distribution along the z-axis measured by strain gauges was compared between experimental and numerical simulation for D1 and E-series. The strain distributions of D1 and E-series specimens are noticeably different.

The CLT-Concrete capacity of resisting to bending moment was improved in 126 % when the shear connectors was added. In the same way, the effective bending and shear stiffness increased 182 and 750 %, respectively.

The slip and uplift failures between CLT and concrete layer were observed in the FEA (Finite Element Analysis) model in conforming to experimental test. Figure 9 presents the displacements of D specimen simulated, and slip behaviour and uplift failure.

The slip between CLT and Concrete materials is occasioned by the flexibility of connection. However, the slip failure is characterized by a rupture of connector, which is not reversible. In this understanding, the slip evidenced in Figure 4 is not exactly a failure but a consequence of the elastic behaviour of the simulated connection.

The differences in stiffness of CLT and Concrete result in differences in the displacement of both materials in the absence of a connection between them. When there is a flexible connection, there will still be a tendency for separation between the materials perpendicular to the plan, which will be transmitted to the connector through tensile. Therefore, the uplift behaviour should not be neglected during the connector design process to CLT-Concrete.

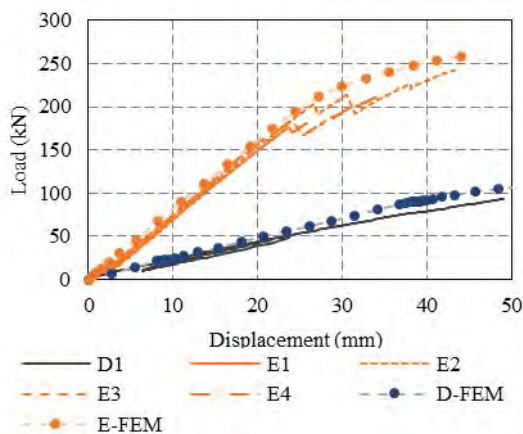


Figure 3. Displacement at midspan from experimental and numerical simulations, w

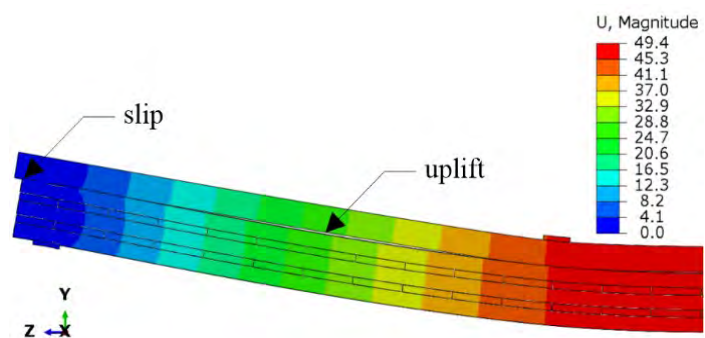


Figure 4. Slip behaviour and uplift fail by the FEA model, D specimen, units in millimetres

4. Conclusions

The findings of this research showed that the use of CLT with concrete plates connected together yielded significant improvements in structural performance compared to non-connected elements. The maximum load capacity increased by 126 %, the effective bending stiffness increased by 182 %, and the effective shear stiffness increased by 750 %. Additionally, the connected plates exhibited a gradual rupture behaviour compared to the brittle rupture observed in the non-connected plates, indicating an increase in structural safety.

The experimental and numerical results also showed good agreement in terms of vertical displacements and strains, as well as the observation of slip and uplift failures. The numerical model utilized Concrete Damaged Plasticity for concrete, orthotropic and plasticity properties for wood, and cohesive contact for the connectors. This model shown to be an efficient tool for simulating the structural behaviour of CLT-Concrete composite linked with semi-rigid connectors and a valuable resource for designing non-conventional structural schemes.

The authors suggest that the same numerical procedures can be applied to other types and quantities of connections to verify their effectiveness in similar applications.

References

- [1] Muszynski, L.; Larasatie, P.; Guerrero, J.E.M.; et al (2020) Global CLT industry in 2020: Growth beyond the Alpine Region. In: Proceedings of the 63rd International Convention of Society of Wood Science and Technology. Portorož, Slovenia, Pp 1–8.
- [2] Borgström, E.; Fröbel, J. (2019) The CLT Handbook: CLT structures - facts and planning, Swedish Wood. Stockholm.
- [3] Vilela, R.; Mascia, N.T.; Santos, L.F. (2020) Structural Reliability Analysis of Cross Laminated Timber Plates Subjected to Bending. In: Proceedings of the 63rd International Convention of Society of Wood Science and Technology. Portorož, Slovenia, Pp 540–547.
- [4] Bao, Y.; Lu, W.; Yue, K.; et al (2022) Structural performance of cross-laminated timber-concrete composite floors with inclined self-tapping screws bearing unidirectional tension-shear loads. *Journal of Building Engineering* 55:104653. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104653>
- [5] Shephard, A.B.; Fischer, E.C.; Barbosa, A.R.; Sinha, A. (2021) Fundamental Behavior of Timber Concrete-Composite Floors in Fire. *J Struct Eng* 147:04020340. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002890](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002890)
- [6] Weckendorf, J.; Ussher, E.; Smith, I. (2016) Dynamic response of CLT plate systems in the context of timber and hybrid construction. *Composite Structures* 157:412–423. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.08.033>
- [7] Setragian, Z.B.; Kusuma, C.C. (2018) Moisture Safety Evaluation of CLT-Concrete Composite Slab. Master's Thesis, Chalmers University of Technology.
- [8] Popovski, M.; Karacabeyli, E. (2012) Seismic behaviour of Cross-laminated Timber structures. In: *World Conference on Timber Engineering 2012*. Auckland, Pp 1–10.
- [9] Dias, A.; Schänzlin, J.; Dietsch, P.; Shaker Verlag (2018) Design of timber-concrete composite structures A state-of-the-art report by COST Action FP1402/ WG 4.
- [10] European Committee for Standardization (2021) BS EN 16351: Timber structures — Cross laminated timber — Requirements

1045

CÚPULA ELÍPTICA DE LA CAPILLA DE LA UNIVERSIDAD FRANCISCO DE VITORIA (POZUELO DE ALARCÓN, MADRID)

Laura Gonzalo Calderón¹; Jose Ramón Aira Zunzunegui¹

¹ Universidad Politécnica de Madrid

Palabras clave / Palavras-chave:

Estructura de cubierta, Iglesia, Madera laminada, Viga curva.

Resumen / Resumo:

La Universidad Francisco de Vitoria (Pozuelo de Alarcón) estrena en 2023 su nueva Capilla Universitaria, cuyo diseño arquitectónico, basado en la propia liturgia, despierta interés por su singularidad. Sobre el espacio central de asamblea aparece una cúpula de planta esférica de madera laminada GI24h, troncada en su eje mayor por el ábside de hormigón armado y con una luz máxima de 32 metros. La estructura de la cúpula está formada por 32 arcos curvos de sección 200x800. El gran número de piezas genera la necesidad de resolver la clave mediante un anillo metálico al que se unen 16 arcos, y una serie de anclajes que forman un segundo anillo para unir el resto de arcos a los primeros. La especial geometría de la cúpula hace que cada uno de los arcos sea diferente, ya que va variando la longitud del eje mayor de las elipses directrices. Los arcos se unen en su base mediante anclajes metálicos a la estructura de hormigón, especialmente preparada para soportar los empujes horizontales de las piezas. Se colocan dos capas de correas para la cubrición exterior y el revestimiento interior, que unen los arcos dos a dos. Con el fin de asegurar el arriostramiento en el plano de la cúpula, se disponen dos anillos triangulados, uno en la parte superior y otro a media altura, que garantizan que no existe inestabilidad por el giro de la cúpula en torno a su eje vertical.

1. Introducción

La nueva Capilla de la Universidad Francisco de Vitoria, situada en el municipio de Pozuelo de Alarcón, comienza a idearse en 2014 como un icono dentro del complejo universitario. No sólo quiere dar respuesta a la demanda interna del centro, sino convertirse en referente arquitectónico y artístico dentro de la edificación religiosa.

El edificio se articula a partir de un espacio central de asamblea de planta elíptica, a partir del cual surgen recorridos perimetrales que invitan al recogimiento y la meditación. En la tradición de la Iglesia, la elipse reúne en su geometría la perfección del círculo y la direccionalidad requerida para manifestar el sentido teológico direccional del templo cristiano.

Truncando el eje mayor de la elipse aparece el ábside, foco de la liturgia y las miradas, que acompañan a la luz en su entrada majestuosa sobre el altar, gracias al juego de formas curvas de las superficies, Figura 1.

Dada la complejidad de su geometría, marcada por la aparición de curvas tridimensionales, el edificio se resuelve mediante muros y arcos de hormigón armado in situ, gracias a una meticulosa labor de preparación de cimbras y encofrados. La cubierta del espacio central, sin embargo, se proyecta como una estructura de madera laminada Gl24h a base de gajos curvos unidos en una clave central metálica sin óculo, con una luz máxima de 32 metros.

El objeto de este documento es profundizar en la definición, diseño y cálculo de la estructura de la cúpula sobre el espacio de la asamblea, llevados a cabo por los autores a partir de la propuesta de los arquitectos responsables del Proyecto, D. Antonio Álvarez-Cienfuegos Rubio y D. Emilio Delgado Martos (Estudio Hago, Madrid).



Figura 1. Render de anteproyecto [1]

2. Diseño de la cúpula

La planta elíptica del espacio de asamblea supone una complicación geométrica en la definición de la cúpula, Figura 2. Se parte de una semiesfera elíptica cuyos ejes tienen una dimensión de 39'2 y 35'2 m, y una altura de 12 m, que se corta por dos planos. El plano horizontal de corte se sitúa a 4'3 m de la base, dejando por tanto la altura total en 7'7 m, mientras que el plano vertical recorta el eje mayor en 11'2 m, debido a la aparición del ábside. La dimensión mayor en planta, por tanto, corresponde al eje menor a la altura del plano de corte, y es igual a 32 metros. Los 32 arcos que componen la estructura se van adaptando a directrices elípticas diferentes entre sí, en función de la posición, por lo que deben ser trazados independientemente, excepto en el caso de las simetrías.

Los arcos se apoyan en una viga perimetral de hormigón armado, a la que se unen mediante anclajes metálicos específicamente diseñados para la obra. En la zona truncada por el plano vertical, aparece un gran arco de hormigón que resuelve la transición con la cúpula parabólica del ábside, de mayor altura, formada por una cáscara de hormigón armado ejecutado in situ.

La clave se resuelve mediante un anillo metálico. Debido a la gran cantidad de arcos y a la necesidad de unir adecuadamente estos con el anillo central, se precisaba de un elemento de dimensiones considerables para poder atornillar las piezas. Para reducir el tamaño del anillo se opta por llevar hasta él únicamente 16 arcos, de tal forma que entre cada dos de ellos aparece otro arco de menor longitud, y que se une a ellos lateralmente con un anclaje. Esto conlleva la formación de otro anillo metálico discontinuo de mayor dimensión, cuya transferencia de esfuerzos se realiza a través de los arcos más largos.

En dirección perpendicular a los arcos se colocan correas tanto en la cara superior como en la inferior, para la cubrición exterior y el revestimiento interior previsto. Estas correas son también elementos únicos, ya que entre cada dos arcos la separación e inclinación son únicas, y además se van adaptando a la curvatura cambiante hasta llegar a la clave. Esta particularidad se traslada así mismo al cerramiento exterior y al revestimiento interior, que deben ser realizados con especial esmero.

La estructura cuenta además con unas piezas de arriostramiento formando dos anillos estrellados, necesarios para asegurar su estabilidad.

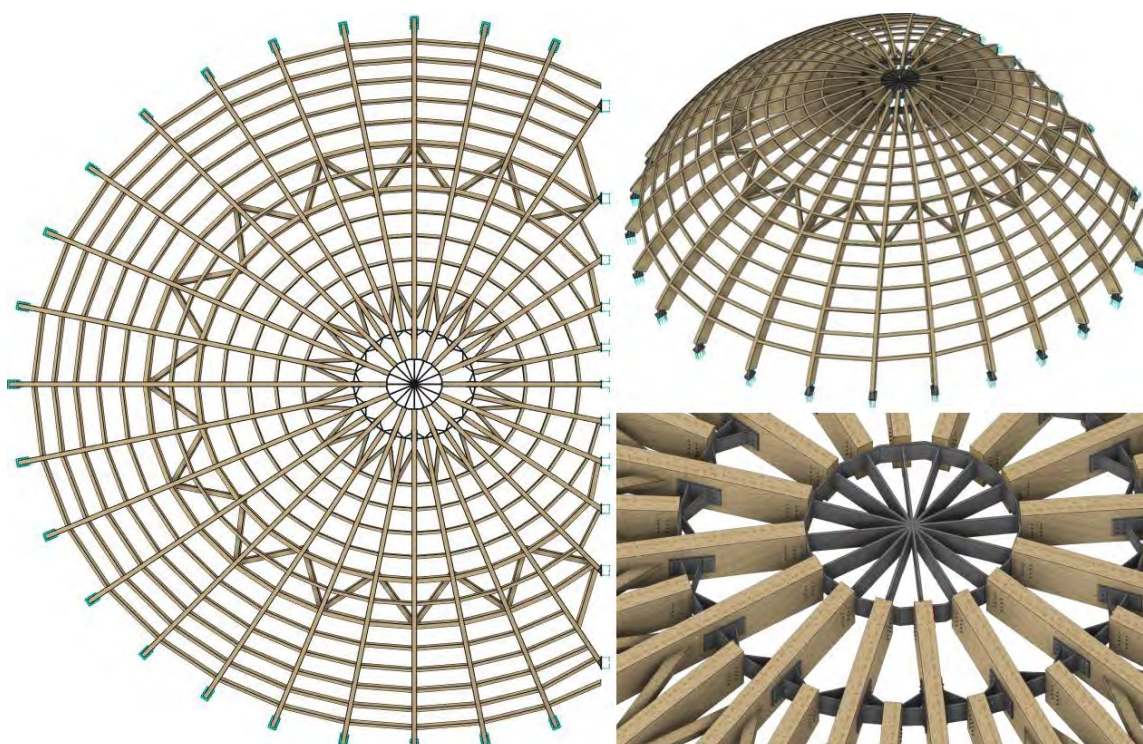


Figura 2 Imágenes del diseño con software BIM 3D

3. Cálculo estructural

El cálculo estructural se realiza mediante programas de cálculo de Elementos Finitos. En la definición de las cargas a aplicar es importante tener en cuenta que la inclinación de la cubierta es variable, debido a su curvatura. También cobra especial importancia el estudio de la alternancia de cargas, puesto que deben evitarse situaciones de desequilibrio y empujes indeseados.

Por tratarse de piezas curvas, se realiza inicialmente un análisis para conocer el coeficiente real de pandeo de cada uno de los arcos en función de su traslacionalidad. El anillo central y sus radios, realizados en acero laminado S275, están sometidos a compresión, lo cual precisa de una sección suficiente para evitar el pandeo, por lo que se utilizan chapas de 30 mm de espesor. Se convierte así en un elemento de gran rigidez que no sufre apenas deformaciones. Las reacciones en los

apoyos de los arcos son centrífugas, de tal forma que éste tendería a abrirse si no lo impidiesen los anclajes. La reacción horizontal en cada uno de los arcos es aproximadamente 125 kN y la vertical 140 kN. La viga perimetral de hormigón sobre la que se apoya y el arco de cierre en la zona del ábside precisan de suficiente dimensión horizontal para hacer frente a los empujes y disminuir los desplazamientos horizontales, limitando además de esta forma el desplazamiento vertical de la clave. Si bien la deformación vertical de este tipo de estructuras no resulta visible en sí misma, sí podría manifestarse en los elementos de cubrición y revestimiento interior.

Además, se estudia la estabilidad global de la estructura. Las cúpulas tienen tendencia a manifestar su inestabilidad en lo que podríamos denominar “efecto exprimidor”, es decir, la tendencia a girar en torno a su eje vertical. Para ello, es necesario arriostrarlas en su superficie, mediante triangulaciones en forma de anillo. Se utilizan aquí dos anillos, que permiten lograr esa estabilidad. El superior se sitúa junto al segundo anillo metálico, donde aparecen ya los 32 arcos. Se coloca otro anillo triangulado en la zona central de los arcos, con la particularidad de que no puede completarse por el truncado de la cúpula, de tal forma que el arco de hormigón recibe también los esfuerzos derivados.

Los arcos tienen una sección de 200x800 mm. Se descarta la posibilidad de utilizar sección variable porque, si bien se reduciría ligeramente el peso, no se logra ningún beneficio económico y se complica aún más la geometría. Para las viguetas de la cara superior, de la inferior y piezas de arriostramiento, se utilizan piezas rectas de secciones estándar adaptadas a los requerimientos estructurales, nunca superiores a 200x200 mm.

4. Puesta en obra

El montaje de la cubierta se realiza en primavera de 2023, Figura 3. Se coloca en primer lugar la clave metálica, elemento de gran peso (en torno a 3 toneladas), posicionada mediante varios arcos, y que requiere de un cimbrado especial para garantizar su inmovilidad en el transcurso de la obra. Antes del montaje de las vigas, se colocan los anclajes inferiores, formados por chapas de acero de espesores entre 16 y 25 milímetros. Se izan las vigas y se introducen en las chapas perpendiculares a la clave. Para finalizar, se sueldan los anclajes inferiores a las chapas existentes en la viga perimetral de hormigón. Tras los 16 arcos largos, se colocan los cortos. Sorprende en obra la precisión del montaje, en el que las tolerancias milimétricas son muy pequeñas respecto al tamaño de las piezas.

Una vez finalizado el montaje, el descimbrado de la clave es un momento de especial tensión, ya que en caso de existir errores de cálculo o de atornillado de las piezas, podría darse un descenso excesivo o incluso el colapso de la estructura. El descenso de este elemento es tan sólo de unos milímetros, tal como estaba previsto.

El revestimiento interior impide en la obra acabada contemplar todos los elementos de la estructura, pero persigue la definición de una superficie limpia y continua, acorde al propósito del edificio.



Figura 3 Imágenes del montaje de la obra

5. Conclusiones

Una cubierta en forma de cúpula con clave central es siempre en reto de diseño y cálculo estructural. En este caso, la geometría se complejiza debido a la planta elíptica y al truncado en el ábside. En todo caso, uno de los factores a los que debe prestarse mayor atención es a la estabilidad, para evitar la rotación de los arcos en torno al eje vertical. El resultado es sin duda espectacular, como muestra la documentación fotográfica previa a la colocación del revestimiento interior.

Referencias

[1] www.estudiohago.com/UFV-Chapel

1046

DEFINICIÓN DE PARÁMETROS Y PROPUESTA DE FICHA TIPOLOGICA APLICADA A LAS 16 IGLESIAS PATRIMONIALES DE CHILOÉ

Carmen Martín Palancar¹; M Angeles Benito Pradillo¹

¹ Universidad Politécnica de Madrid; ETSAM

Palabras clave / Palavras-chave:

Construcción en madera, Escuela Chilota, Bordemar, Iglesias Chiloé

Resumen / Resumo:

Al suroeste de Chile, en un apartado archipiélago, conocido como Chiloé, se encuentra un rico patrimonio arquitectónico realizado en madera, que dio comienzo en el siglo XVII. Más de 150 iglesias que se sitúan en las orillas del Pacífico, hablan de una historia aún algo desconocida en el mundo. Una serie de comunidades integradas por los indígenas de Chiloé y los misioneros europeos que les transmitieron la fe católica y promovieron el encuentro comunitario donde establecer un diálogo y la puesta en marcha de proyectos en común. Lo que dio como resultado la formación de una tipología propia denominada como Escuela Chilota de Arquitectura religiosa en madera. Estas iglesias son el núcleo vital alrededor del cual se ha desarrollado la vida y la cultura de estos pueblos marítimos.

En este artículo se analizan y definen tres parámetros: el entorno, un análisis espacio-funcional y una aproximación constructiva-estructural. Posteriormente y con las conclusiones obtenidas se configura una ficha tipológica que posteriormente se aplicará a 16 iglesias chilotas declaradas Patrimonio de la Humanidad.

1. Introducción

Las iglesias de la Escuela Chilota son un conjunto de arquitectura religiosa construido en madera. Situadas en el archipiélago de Chiloé, en la zona sur de Chile, tienen su origen en el siglo XVII¹. Tras el estudio y la observación de las fuentes existentes, se desarrollan en el presente artículo una serie de parámetros tipológicos con la intención de identificar en las 16 iglesias (declaradas Patrimonio de la Humanidad por la Unesco) ciertos puntos en común. Como conclusión de esos parámetros se realiza una ficha para ser aplicada a estos templos.

Entre los años 1999 y 2002 la Unesco declara Patrimonio de la Humanidad 16 templos chilotos que, además, son Monumento Nacional de Chile², por considerarse ejemplo de la fusión de la tradicional cultura europea e indígena. Como fruto de las misiones llevadas a cabo por los Jesuitas se da una cultura mestiza que alcanza su máxima expresión en esta singular arquitectura en madera.

2. Definición de parámetros

Los parámetros definidos tienen que ver con el entorno en el que las iglesias están construidas, los elementos espacio-funcionales que las forman y sus particularidades constructivo-estructurales.

2.1. Entorno

Se establecen dos variables referidas al tipo de asentamiento: el emplazamiento, considerando si es rural o urbano y, por otra parte, la organización espacial con respecto al mar. Se toma como referencia el artículo de Lorenzo Berg³



Figura 1: Ejemplo de entorno urbano: ciudad de Castro y plano esquemático de entornos urbanos. (izquierda). Ejemplo de entorno rural: pueblo de Chelín y plano esquemático de entornos rurales. Fuente fotografías: Elaboración propia Fuente planos: Consejo de Monumentos Nacionales de Chile

2.1.1. Emplazamiento rural o urbano

Se determinan como urbanas aquellas localidades calificadas en el estudio como pueblo o ciudad. Son las que han experimentado un cambio mayor a lo largo del tiempo, llegando a tener una dimensión superior y con un trazado de calles y caminos más regular. Y también se determinan como rurales aquellos emplazamientos que son aldeas o caseríos, caracterizados por tener una escasa población, con pocos cambios a su alrededor. Rodeando el templo se disponen el cementerio, el centro social, la escuela formando el centro del asentamiento poblacional.

2.1.2. Eje de bordemar o eje iglesia-plaza-mar

El elemento principal que acompaña a la iglesia o capilla es la explanada que se abre frente a esta. Su importancia viene dada por la necesidad de un espacio descubierto en el que poder reunir a la comunidad⁴, que, en un principio, no podía ingresar en la iglesia, ya que por la tradición local el acceso se limitaba a la clase sacerdotal. Esta importancia se incrementa con la percepción, por parte de seglares y frailes, de que los indígenas tenían una mejor experiencia de la fe vivida en comunidad. La dimensión de la explanada está muy relacionada con las celebraciones patronales que según la zona puede ser más o menos significativa. Esta explanada, en algunos casos, ha alcanzado a ser plaza ajardinada; en la mayoría de estas localidades es el único espacio público, de ahí su relevancia.

Con estos elementos, se procede a hacer una distinción según el eje que guardan con respecto al mar:

- Eje de bordemar: en el que la iglesia y la plaza o explanada están alineadas en paralelo al mar.
- Eje iglesia-plaza-mar: eje que vincula el mar a través del embarcadero con la plaza y la iglesia, en perpendicular.

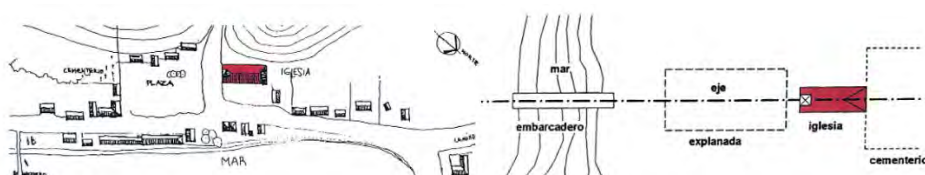


Figura 2: Organización eje de bordemar (izda) Fuente: Lorenzo Berg Organización eje iglesia-plaza-mar (dcha). Fuente: L. Berg

2.2.ESPACIO-FUNCIONAL

Son dos los volúmenes que forman el templo: uno vertical, conocido como torre-fachada y otro horizontal, que contiene las naves que conforman su interior. Para determinar estos parámetros y examinar la arquitectura Se analizan los planos de alzado frontal y planta de las iglesias.

2.2.1. Fachada principal

La fachada frontal del templo se divide en tres partes diferenciadas: el acceso, el hastial y la torre.

En el **acceso** se analizar la presencia o no del pórtico y el número de accesos, variando entre tres y cinco. En las situaciones en las que existe pórtico puede estar compuesto por arcos o dinteles. En el caso de arcos, son de medio punto, rebajados, apuntados, ojivales o arco carpanel; el número puede variar entre tres, cinco y nueve arcos. El número de huecos adintelados suele ser tres o cinco

Encima del acceso está el **hastial** de forma triangular sobre el que descansan los faldones de la cubierta e indica la presencia de un coro en el interior de la iglesia. Tiene una, tres o cinco ventanas, distribuidas en línea o siguiendo el contorno del hastial. Esta superficie triangular puede unificarse con el plano del primer cuerpo de la torre o puede aparecer como un frontón, separado del plano de la torre y remarcado con la presencia de un friso sobre los pilares.

Como remate de la fachada frontal, se alza la **torre**, quedando centrada en el conjunto del volumen vertical. Lo más habitual es que disponga de una torre, se dan casos de iglesias con dos o tres torres. La torre se compone de uno, dos o tres cuerpos, también llamados cañas. Estos cuerpos pueden ser de planta cuadrada o de planta octogonal y se acoplan unos a otros por medio de faldones. Se corona la torre con un chapitel sobre el que se coloca una cruz.

2.2.2. Planta

Las iglesias de la Escuela Chilota tienen planta basilical de tres naves: la nave central, de mayor ancho que las laterales, se extiende hasta el testero de la iglesia. Las naves laterales llegan hasta el plano de la cabecera, en la que se localiza el altar, reservando el espacio restante para situar la sacristía en un lado y otra sala para guardar objetos litúrgicos, separándose por medio de tabiques. En algunos casos estas salas se unen por detrás de la cabecera. Puede aparecer también un cortavientos a los pies de la nave central que funciona como una segunda entrada.

2.3.Constructivo-estructural

Por último, se estudian los elementos que componen la estructura de las iglesias. Con estos parámetros se pretende conocer la forma de construir propia de los chilotes y cómo aplican sus conocimientos en el uso de la madera para soportar las condiciones ambientales del lugar y cubrir un espacio en el que poder alojar a los fieles en la celebración de los ritos religiosos.

2.3.1. Formación de cubierta exterior

La cubierta de todas las iglesias de Chiloé está formada a dos aguas. Para ello, se emplea una armadura de par e hilera o de par y nudillo.

2.3.2. Geometría interior de la cubierta

El esqueleto que conforma la cubierta exterior se oculta en el interior con un sistema de bóveda construida en madera⁵, un rasgo que la hace singular en este tipo de cubiertas, que se suelen dejar a la vista. En la nave central, esta puede ser plana o abovedada. Si es abovedada, se encuentran las siguientes variaciones: artesa, bóveda de cañón de arco de medio punto, bóveda de cañón de arco rebajado y bóveda de crucería. En las naves laterales, la geometría interior de la cubierta consiste en un techo plano. El armazón que forma esta bóveda se reviste con tablas.



Figuras 3: Tipos de abovedamientos en la nave central: a) bóveda en artesa, b) bóveda con arco rebajado, c) bóveda de crucería), d) bóveda con arco de medio punto. Fuente: Elaboración propia

2.3.3. Separación entre naves



Figuras 4: Ficha tipológica. Elaboración propia

Se emplean elementos longitudinales para la separación entre las naves que sirven también de apoyo a la cubierta interior de la nave central y de las naves laterales. Generalmente, este elemento consiste en una línea de pilares sobre los que descansa una viga, y jabalcones que ayudan a reducir la luz entre estos. Esta estructura longitudinal se forra con tablonés de madera dando forma de arcos de medio punto o rebajados, o dinteles.

2.3.4. Fachadas laterales

Las fachadas laterales de los templos son muy sencillas. Revestidas con las tejas de alerce la mayoría, suelen presentar varias ventanas y alguna puerta que lleva a las naves laterales. En algunas iglesias se han incorporado puntales de apeo en las fachadas laterales, lo que advierte de un problema en la solución constructiva en estas, provocado por un empuje en los muros laterales. Como solución a este inconveniente, se pueden colocar crucetas en el plano del techo de la nave lateral, como se aplica en la iglesia de Achao.

3. Aplicación a ficha tipológica

A continuación, se realiza la ficha tipológica que resume los parámetros definidos anteriormente, incluyendo todas las posibles variaciones encontradas en las 16 iglesias chilotas analizadas.

4. Conclusiones

Estas iglesias son portadoras de una riqueza constructiva y estructural. Especialmente por el uso de la madera como material predominante. Este material, por su flexibilidad y ligereza, ha permitido a los constructores, desarrollar una gran variedad de soluciones constructivas y formales, manteniendo las características tipológicas de la Escuela Chilota.

Se ha realizado una ficha tipológica con la finalidad de ayudar en el entendimiento de los elementos característicos de la Escuela Chilota que puedan ser aplicables a diferentes templos y así ayudar en su clasificación

Referencias

- [1] Guarda, G.; (1984) Iglesias de Chiloé. Ediciones Universidad Católica de Chile. Santiago de Chile.
- [2] VVAA. Postulación de las Iglesias de Chiloé como Sitio del Patrimonio Mundial/UNESCO. Achao, Quinchao, Castro, Rilán, Nercón, Aldachildo, Ichuac, Detif, Vilupulli, Chonchi, Tenaún, Colo, San Juan, Dalcahue, Caguach, Chelín. 2003. Gobierno de Chile. Ministerio de Educación Consejo de Monumentos Nacionales. Segunda Serie, n° 29, 3ª edición.
- [3] Berg, L.; Guzmán, F.; Moreno, R.; (2022) De explanadas y plazas. Génesis y transformaciones del entorno sagrado de las Iglesias Patrimonio de la Humanidad de Chiloé. Rev. De Arquitectura. 27(42): 22-41.
- [4] Montecinos Barrientos, H.; Salinas Jaque, I.; Basáez Yau, P.; (1995) Las iglesias misionales de Chiloé: documentos. Ediciones Universidad de Chile. Facultad de Arquitectura y Urbanismo. Chile.
- [5] Arriaga, F.; (1999) Iglesias de madera en Chiloé. Boletín de Información Técnica. N° 198. AITIM. Marzo-Abril. 23-28.

1047

DEFINING PARAMETERS TO ACHIEVE MAXIMUM RATIONALIZATION OF CROSS-LAMINATED TIMBER (CLT) ARCHITECTURAL DESIGNS: THE CASE OF THE BRAZILIAN CONTEXT

Gabriela Lotufo Oliveira¹; Fabiana Lopes De Oliveira²

¹ Universidade de São Paulo

² Universidade Estadual de Campinas

Palabras clave / Palavras-chave:

CLT structures, BIM parameters, Mass timber, Assembly rationalization

Resumen / Resumo:

The use of mass timber structures and more specifically Cross-laminated Timber (CLT) panels has grown significantly in the last decade. While having seen earlier, more widespread adoption in Europe, the production of CLT panels only recently began in Brazil in 2012. Naturally, as with any novel technology, there remain many knowledge gaps, especially among designers, that lead to material inefficiencies in manufacturing and construction. This research aims to assist the conceptual development of actual sustainable architectures by organizing parameters related to the particularities of CLT structures that could be incorporated in BIM authoring tools, providing help for architects or designers during the conceptual design phase of a CLT building. To do so, the methodology involved the examination of practices adopted by the first producer of CLT panels in Brazil. Also, an analysis of three case studies was developed to illustrate the logistics and assembly phases of real structures that were built in different contexts. As a result, premises were defined for each macro phase of the construction process. They are associated not only with manufacturing restrictions, but also with the possibility for vehicles and assembly equipment to access the construction site and were then transformed into geometrical parameters to be incorporated into CLT BIM objects. Although the premises and parameters presented are based in the Brazilian context, it is possible and feasible to adjust them to suit another manufacturer or geographical context.

1. Introduction

An issue that is frequently highlighted by many authors in the field of prefabricated building systems [1][2][3][4] is the inadequate communication between design and manufacturing. The lack of awareness regarding manufacturing capabilities consistently results in inadequately designed architectural projects regarding the construction process of prefabricated technologies. Consequently, there is an evident increase in material waste, as well as assemblies that take more time and are executed in a more complex way than should be necessary. Among contemporary prefabricated technologies, one

can mention mass timber structures and more specifically Cross-laminated Timber (CLT) panels, which are a relatively new product to the construction sector. The use of these technologies has experienced significant growth in the last decade, as pointed out by studies that analyze past and future trends in this specific market [5][6][7]. In Brazil, the production of CLT panels only recently began in Brazil in 2012 and, until a few years ago, there was only one producer in the country [8]. Naturally, as with any novel technology, there remain many knowledge gaps about the technology that result in greater production of waste of resources (material and energy) due to design decisions, as identified before.

This research aims to assist the conceptual development of actual sustainable architectures, by organizing parameters related to the particularities of CLT structures that could be incorporated in BIM authoring tools such as Autodesk Revit or Trimble Sketchup, thus providing help for architects or designers during the conceptual design phase of a CLT building.

2. Materials and methods

The research is based on the production of the first producer of CLT panels in Brazil. Initially, the paper seeks to identify the variables inherent to the construction process of CLT structures that have a direct relationship to architectural design. The methodology involved the examination of practices adopted by this specific manufacturer and the Brazilian context. Also, an analysis of three case studies of low-rise buildings (manufactured and assembled by the same producer) was developed to illustrate the logistics and assembly phases of real structures that were built in extremely different contexts.

2.1. Overview of the construction process

The construction process of CLT structures in the Brazilian scenario is divided into five stages. These are (i) planning; (ii) raw materials; (iii) manufacturing; (iv) logistics and (v) assembly. Each of these macro stages, in turn, is subdivided into sub-stages, which can be visualized in the diagram presented in Figure 1.

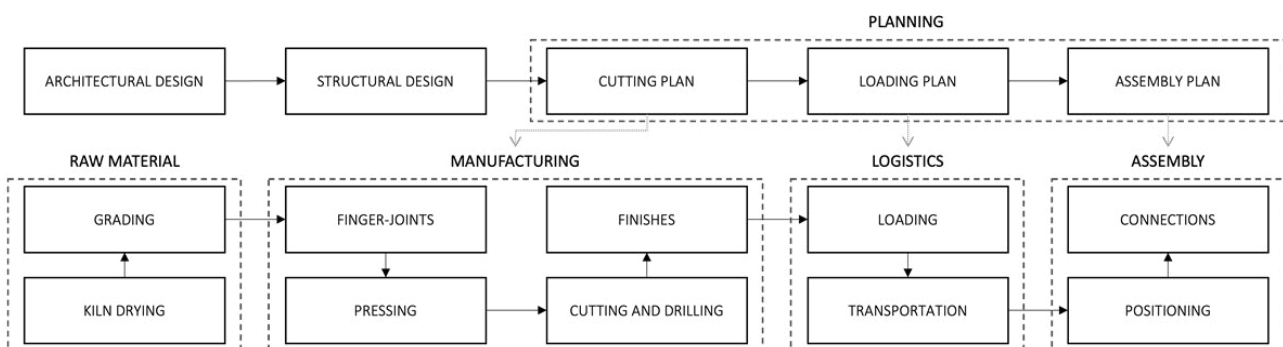


Figure 1. Diagram illustrating the construction process of a CLT structure.

The phases that are mostly related to the architectural design were deeper studied. A brief example of this study, regarding the manufacturing phase is presented next.

In the factory of the studied producer, there are two vacuum presses to manufacture CLT panels. One of them is 12.00 m long and the other is 14.40 m long, and both are 2.95 m wide. Before the actual production of the structural elements, the Cutting Plan is developed. In this process, all CLT pieces are

distributed on large panels to be manufactured. Then, from a single panel, it is possible to obtain several smaller elements that will shape the building. Another interesting aspect to consider in the cutting plan is the direction of the panels. To produce slabs, usually, panels are manufactured in the longitudinal direction, while for walls, panels are transversal, limiting the wall height to a maximum of 2.95 m. In longitudinal panels the wood grain direction is parallel to the length of the panel, as for transversal panels, the wood grain is parallel to its width. However, if the walls are arranged longitudinally during the cutting plan, the height limit can exceed 2.95 m, and this dimension becomes the length of the wall. This case is represented by the following figure (Figure 2), that illustrates the same building with a change in its ceiling height, which would increase from 2.80 m to 3.20 m. This adjustment may not result in significant modifications to the architectural design, but on the other hand, it requires a very different logic for the cutting plan, as well as a higher number of pieces that are needed to assemble the structure.

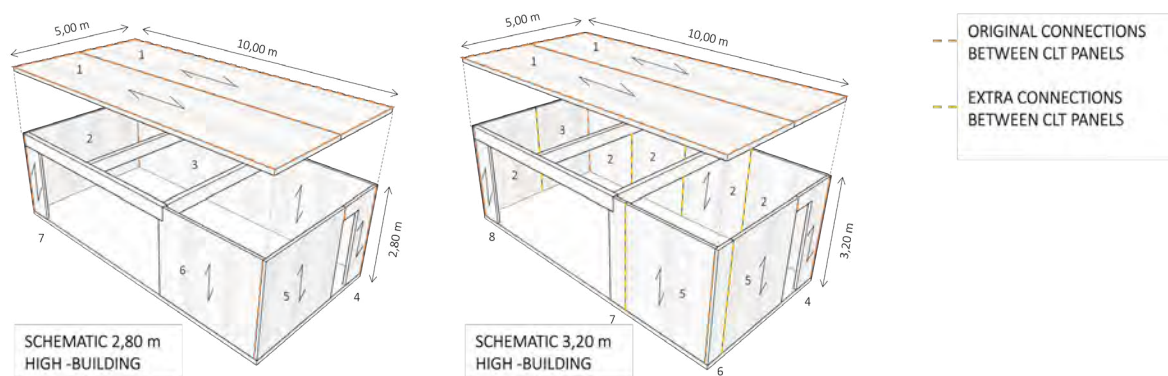


Figure 2. Comparison between the same schematic structure with two different ceiling heights.

2.2. Case studies

Each case study was built in a different context, which resulted in distinct decisions to be made for the logistics and assembly phases. The first case study was an extension on the second floor of an existing house in São Paulo (SP). It was located in an urban residential neighbourhood, making it impossible for larger vehicles to reach the building. The second case study involved a temporary building, with an approximate floor area of 55 m², which was assembled and disassembled within an architecture and interior design exhibition in São Paulo (SP), inside a heritage-listed building. Therefore, no equipment, such as cranes, was allowed inside the existing structure and the assembly was carried out only by field workers. The third analysed structure was a single-story residence assembled in the coastal city of Bertioğa (SP), with a floor area of approximately 280 m². It had no restrictions regarding the access of the vehicle or assembly equipment. As for the raw materials, the first and second structures used pine, while the last one used eucalyptus CLT panels.

3. Results

3.1. Analysis

After analyzing the construction process of the CLT structures for the specific Brazilian scenario, and the three case studies, the following premises were defined, for each macro phase established earlier:

- Regarding raw material: the choice of raw material (pine or eucalyptus) needs to be considered in architectural design, given the distinct characteristics of the wood species currently available in the national production;
- Regarding manufacturing: consider the press size as the dimensional limit for panels, with the current maximum dimensions achievable being 14.40 m x 2.95 m, for the producer that was studied;
- Regarding logistics: when access to the construction site is more complex, as seen in the first case study, the use of smaller vehicles becomes essential. Therefore, consider that smaller vehicles allow the transportation of pieces up to 8.00 m in length, while conventional ones enable the transport of loads up to 12.00 m in length;
- Regarding assembly: the location of the building may or may not allow the use of larger equipment for the assembly of the structure, as seen in the second case study. When the timber elements must be carried only by field workers, consider their maximum individual weight as 120 kg, according to Brazilian standards [9].

3.2. Parameters

The premises above mentioned were transformed into geometrical parameters to be incorporated in BIM objects of CLT panels, to be used in existing design software. Those objects can be either CLT slabs or CLT walls since the parameters for each are slightly different. Also, parameters are associated not only with manufacturing restrictions but also with the possibility for transportation vehicles and assembly equipment to access the building site. The parameters defined for CLT walls are presented in Table 1, as an example.

Table 1. Parameters for CLT walls, according to the access conditions of the building site

access conditions	no access restrictions	accessible for smaller vehicles only	not accessible for vehicles or equipment
thickness	0.08 m		
length	≤ 12.00 m	≤ 8.00 m	length ≤ (120 / (0.08 x width x density))
width	if length > 2.95 m, then ≤ 2.95 m		
	if length ≤ 2.95 m, then < 12.00 m	if length ≤ 2.95 m, then < 8.00 m	
density	if pine = 550 kg/m³ if eucalyptus = 650 kg/m³		
weight	no restriction		≤ 120 kg

4. Conclusions

CLT structures hold certain characteristics and peculiarities that must be considered from the beginning of the architectural design to ensure a greater rationalization of the construction process for this technology. So, by aiming to assist in the conception of such architectures, this paper analyzed features of the machinery and characteristics of the construction process of one specific Brazilian manufacturer in order to define premises and parameters for CLT BIM objects. However, it is entirely possible and feasible to adjust the parameters that were defined to suit another manufacturer or another geographical context, with distinct machinery or for a different raw material, for example.

It must be reinforced that the premises and parameters presented here are not absolute rules and are based in the Brazilian context. They are intended, above all, to provide the design professional with information so that they can make conscious choices, in order to ensure better use of the natural resources necessary for the construction of their design. It is understood that adapting the design to the premises imposed by the building technology, in order to create a structure that respects the nature of each material and technology, is above all a question of sustainability.

References

- [1] Krieg, O. D.; Lang, O. (2019) Adaptive automation strategies for robotic prefabrication of parametrized mass timber building components. In: Proceedings of the 36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2019), p. 521–528. Banff.
- [2] Gbadamosi, Abdul-Quayyum; Oyedele, Lukumon; Mahamadu, Abdul-Majeed; Kusimo, Habeeb; Bilal, Muhammad; Delgado, Juan Manuel Davila; Muhammed-Yakubu, Naimah. (2020) Big data for Design Options Repository: Towards a DFMA approach for offsite construction. *Automation in Construction*. Vol. 120.
- [3] Qi, Bing; Razkenari Mohamad; Costin, Aaron; Kibert, Charles; Fu, Meiqing. (2021) A systematic review of emerging technologies in industrialized construction. *Journal of building engineering*, v. 39.
- [4] Bianconi, Fabio; Filippucci, Marco; Buffi, Alessandro. (2019) Automated design and modeling for mass-customized housing. A web-based design space catalog for timber structures. *Automation in construction*, v. 103, p. 13-25.
- [5] Safarik, D.; Elbrecht, J.; Miranda, W. (2022) State of Tall Timber 2022. *CTBUH Journal* 1:22-31.
- [6] Salvadori, V. (2021). *Multi-Storey Timber-Based Buildings: An International Survey of Case-Studies with Five or More Storeys Over the Last Twenty Years*. Technische Universität Wien: Vienna, Austria.
- [7] Svatoš-Ražnjević, H., Orozco, L., & Menges, A. (2022). Advanced timber construction industry: a review of 350 multi-storey timber projects from 2000–2021. *Buildings*, 12(4), 404.
- [8] Oliveira, G. L. (2018). *Cross Laminated Timber (CLT) no Brasil: processo construtivo e desempenho. Recomendações para o processo do projeto arquitetônico* (Master Thesis, Universidade de São Paulo).
- [9] Consolidação das Leis do Trabalho (1943). Decreto-Lei nº 5.452 de 01/05/1943.

1048

DEL DICHO AL HECHO: DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE LA TÉCNICA DE ENCOLADO EN VERDE USANDO ESPECIES NATIVAS CHILENAS

Gonzalo Rodríguez-Grau¹; Carlos Galarce¹; Víctor Rosales Garcés²; Carlos R. Marín-Urbe³; Patricio Cortés¹; Claudio Montero²; Claudia Alvarado⁴; Lisa Muñoz⁵; Régis Pommier⁶

¹ Pontificia Universidad Católica de Chile;

² Universidad del Bío-Bío

³ Universidad Surcolombiana, Neiva, Colombia

⁴ Fuerza Aérea de Chile

⁵ Pontificia Universidad Católica de Valparaíso

⁶ Univ. Bordeaux

Palabras clave / Palavras-chave:

Adhesión, Bibliometría, Bilaminados, Nothofagus

Resumen / Resumo:

Las maderas nativas del género *Nothofagus* tienen un alto potencial en la producción de elementos estructurales para la industria de la construcción. Sin embargo, actualmente se utilizan principalmente en productos de bajo valor agregado, pues no cumplen con las dimensiones deseadas. Por lo tanto, es necesaria la implementación de una técnica que permita el uso y revalorización de estas maderas. Una técnica que podría revertir esta situación es la técnica de encolado en verde, pero diversas variables influyen en su resultado. Para identificar los factores claves involucrados se realizó un análisis bibliográfico de toda la información referente al tema. Con estos resultados se enfocó en la fabricación de muestras bilaminadas de *Nothofagus* (en condiciones de humedad y secas) procurando controlar las variables identificadas en el análisis bibliométrico. El análisis final permitió la generación de un protocolo de encolado inicial, el cual puede ser mejorado con futuros análisis que consideren el punto de saturación de la fibra, sus propiedades estructurales y el tratamiento superficial que se realice.

1. Introducción

El desarrollo de una estrategia inteligente para generar productos con alto valor agregado requiere controlar aspectos técnicos y de procesos, lo cual implica gestionar una alta cantidad de información. De esta forma, se pueden identificar los vacíos y falencias de los actuales procesos productivos. Una alternativa exploratoria disponible, desde el ámbito académico hasta el productivo, es el desarrollo de un análisis bibliométrico. Esta técnica proporciona una visión global de cada disciplina en estudio e indica algunos puntos de interés en un área de investigación específica, resumiendo la estructura bibliométrica e intelectual mediante el análisis de las relaciones sociales y estructurales entre los distintos componentes de la investigación [1].

De esta manera, el punto de partida de esta investigación fue explorar la generación de elementos constructivos utilizando la técnica de encolado en verde (o Green gluing en inglés) usando especies nativas chilenas. El encolado en verde es un método de encolado de madera sin secar artificialmente, recién aserrada y sin someterse a algún proceso de secado [2]. El carácter emergente del encolado verde exige un conocimiento adecuado y crítico de la terminología y los grupos de investigación. En este sentido, el análisis bibliométrico nos ayudó a descifrar y cartografiar el conocimiento científico acumulado y los matices evolutivos de campos bien establecidos, mediante la interpretación rigurosa de grandes volúmenes de datos no estructurados [3]. Así, lograremos la identificación de los puntos clave de la aplicación del encolado en verde.

La relevancia de una aplicación correcta de la técnica de encolado en verde es trascendental para la revalorización de especies, reducir los tiempos y costos del proceso de secado, mejorar la eficiencia en el uso del material y la sustentabilidad del ecosistema bosque. Finalmente, como prueba de concepto, desarrollamos la técnica de encolado en verde utilizando diferentes especies de *Nothofagus* crecidas en Chile. Con estos resultados logramos cumplir con nuestro objetivo principal, el cual fue desarrollar una estrategia inteligente para implementar y mejorar la técnica del encolado en verde usando especies nativas chilenas.

2. Materiales y métodos

El análisis bibliométrico se limitó a las bases de datos Scopus (Elsevier), Web of Science (Clarivate Analytics) y SciELO Citation Index (Web of Science-Clarivate Analytics). El período de las publicaciones establecido fue de 2000 a 2020. Se aplicó una estrategia de búsqueda en los campos título, resumen y palabras clave de las bases de datos. Los datos relevantes de este análisis permitieron acotar las variables a manejar.

Posteriormente, se realizaron diferentes tratamientos y procesos para favorecer la unión entre piezas, utilizando diferentes especies de *Nothofagus* en dos condiciones (seca y húmeda por debajo del PSF). El procedimiento de pegado se realizó con adhesivo del tipo Poliuretano Mono-Componente de la marca JOWAT. Para evaluar la calidad de los bilaminados elaborados y su potencial para ser empleados como elementos constructivos, se llevaron a cabo diferentes pruebas mecánicas y de caracterización. En la Figura 1 se muestra un esquema de la estrategia global.

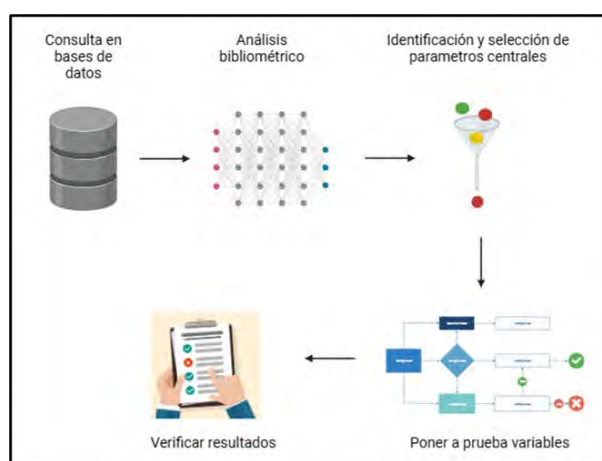


Figura 1: Esquema general para la implementación de la técnica de encolado en verde.

3. Resultados

3.1. Identificación de palabras clave

Según la literatura, las palabras clave son recomendadas para generar los mapas bibliométricos, los cuales permiten reconocer el foco de la investigación en los artículos académicos. El análisis de la co-ocurrencia de términos permitió identificar aquellos términos utilizados conjuntamente en uno o varios artículos. Como resultado se obtuvieron 534 palabras clave, correspondientes a términos reportados por los autores y las bases de datos, con al menos una ocurrencia. Se procedió a la normalización de los términos incorrectos o redundantes. La Figura 2 muestra las palabras clave reunidas en tres grupos compuestos por 20 o más palabras clave cada uno. Se diferencian por color (rojo, azul, verde), mostrando tres grupos temáticos predominantes en las publicaciones analizadas.

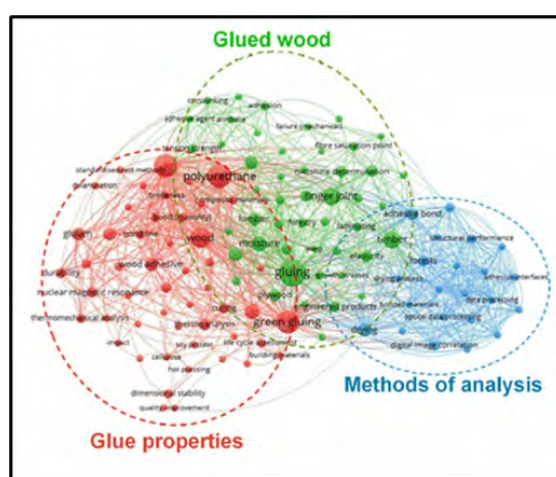


Figura 2: Temáticas más relevantes al momento de implementar la técnica de encolado en verde.

3.2.Resultados de la implementación de la técnica de encolado en verde

Los resultados indican que la implementación de la técnica de encolado en verde es viable utilizando algunas especies de *Nothofagus* crecidas en Chile. Un resultado interesante fue la diferencia en el espesor de la línea de cola y los cambios en la porosidad empleando madera húmeda para generar los bilaminados (Figura 3). Probablemente, los cambios pueden atribuirse a factores químicos (atribuidos directamente al adhesivo) y fisiológicos (dependientes del tipo de fibra u orientación). Sin embargo, más ensayos son requeridos para estimar el grado de importancia de cada factor.

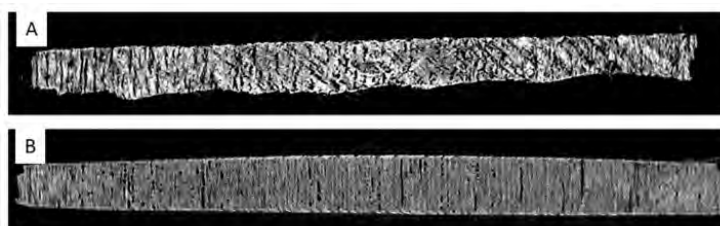


Figura 3: Distribución de la porosidad en la línea de encolado de *Nothofagus alpina* seco (A) y *Nothofagus alpina* húmedo (B) mediante la técnica Micro-CT.

4. Conclusiones

La implementación de una estrategia inteligente, que busca identificar las variables relevantes para la implementación de la técnica de encolado en verde fue exitosa. Los resultados del encolado en verde permitirían el uso de madera de *Nothofagus*, a pesar de no contar con el tamaño deseado por la industria. Nuestros resultados muestran la posibilidad de no secar estas maderas al 12+-2%, con la ventaja económica que eso significa, por lo que podría esperarse que su cuota de mercado/demanda aumente al masificar esta técnica en el sector productivo. A pesar de ello, nuevos ensayos se deben realizar a futuro en la línea de caracterizar y entender la morfología de la superficie, la implicancia del uso de puentes adherentes y otros compuestos utilizados para la activación superficial que consideren el punto de saturación, las propiedades estructurales de la madera y el tratamiento superficial de la madera a encolar.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo de ANID BASAL FB210015 CENAMAD. En particular, Gonzalo Rodríguez Grau, Víctor Rosales Garcés, Claudia Alvarado y Carlos Galarce agradecen el apoyo financiero de ANID + FONDEF/Concurso IDeA I+D, FONDEF/ANID 2021 10241.

Referencias

- [1] N. Donthu, S. Kumar, D. Mukherjee, N. Pandey, W.M. Lim, How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines, *J Bus Res.* 133 (2021) 285–296. <https://doi.org/10.1016/J.JBUSRES.2021.04.070>.
- [2] M. Sterley, *Green gluing of wood*, (2004).
- [3] G. Rodríguez-Grau, C. Marín-Urbe, P. Cortés-Rodríguez, C. Montero, V. Rosales, C. Galarce, Bibliometric Analysis of the Green Gluing Technique (2000–2020): Trends and Perspectives, *Forests.* 13 (2022) 1714. <https://doi.org/10.3390/f13101714>.

1049

DENSITY ESTIMATION BY THERMOGRAPHY IN RECOVERED TIMBER

Daniel F. Llana¹; Gamaliel López Rodríguez²; Roberto D. Martínez López²; Milagros Casado Sanz²; Y. Zaarir³; Guillermo Íñiguez-González¹

¹ Universidad Politécnica de Madrid

² Universidad de Valladolid

³ International Burch University

Palabras clave / Palavras-chave:

Circular Economy, Non-destructive testing, Reclaimed, Salvaged, Secondary timber, Thermal camera

Resumen / Resumo:

The construction and demolition C&D sector creates a great amount of waste. Part of that waste is wood that would have the possibility of reusing or recycling for several purposes. If recovered wood will be reuse as structural timber, its physical and mechanical properties should be determined or estimated. One of these properties is timber density. It can be determined as mass divided by volume. However, in the case of recovered timber, this is not always easy due to irregular cross-section and mass measuring difficulties. Non-destructive testing (NDT) was used in the past for timber density estimation. Among other NDT techniques using for density estimation is the thermography, based on the emissivity measurement during temperature changes in the timber surface. Thermography was successfully applied in the past in several research works for density estimation, measuring over a slim slice of new timber, with an almost perfect measurement surface. However, recovered timber surface has usually irregular surfaces. The present work studied the possibility to estimate density testing 15 recovered oak timber specimens. Measurements with a thermal imaging camera were carried out over two faces in each specimen. One face was planed to obtain an almost perfect surface, the other face was irregular and no work was carried out on it. The preliminary results shown the possibility to estimate density in recovered timber if a temperature change can be induced.

1. Introduction

The Construction and Demolition C&D sector generates a substantial amount of material waste, including wood with the potential for reuse or recycling in structural applications. Presently, policies within the European Union actively advocate for circularity by encouraging the reuse of materials derived from demolition processes and long term carbon storage in wood construction [1]. In order to reuse recovered timber, physical and mechanical properties should be evaluated. Recovered timber should be graded for reuse it for structural purposes. In the case of density, it is possible to determine it as mass divided by volume, measuring mass and dimensions. However, due to irregular cross-section of recovered timber is often difficult to determine the volume [2] and not always easy to measure mass. In addition, this is also a problem determining density of existing timber structures, where mass cannot

being measured in place. In those cases, density estimation by Non-Destructive Testing (NDT) can be so useful. Most common NDT techniques for density estimation are needle penetration resistance, pull-out resistance, core drilling, drill penetration resistance and drilling chips extraction [3, 4]. Furthermore, thermography technique was successfully used in new timber with average dimensions $200 \times 300 \times 20 \text{ mm}^3$ for density estimation by some authors [5, 6]. In these previous research works, emissivity was measured in new timber over an almost perfect surface, slim slice (20 mm), perfectly planed. However, in the case of recovered timber, surfaces are usually irregular and would be difficult to measure on it.

The main objective of the present research work is to explore the applicability of thermography technique for density estimation in recovered timber.

2. Material and methods

Testing material consisted on 15 European oak (*Quercus robur* L.) pieces of average cross-section of $135 \times 150 \text{ mm}^2$. Timber was recovered from a demolition of a 150 year old house in Spain. A specimen with average dimensions $75 \times 140 \times 272 \text{ mm}^3$ was sawn from each piece. The internal face of each specimen was planed and the external was irregular and no work in any way. The 15 specimens were heated in an oven at 60°C for one week. A thermal imaging camera Flir E75 (Teledyne FLIR LLC, Wilsonville, OR, USA) was used for emissivity measuring. Emissivity was measured continuously during one hour as each specimen was cooling down out of the oven in standard conditions of 65% RH and 20°C . A measurement in each face was carried out by specimen: a in the internal planed face, and after heating it again in the oven for two days, a measurement in the external face (Fig. 1).

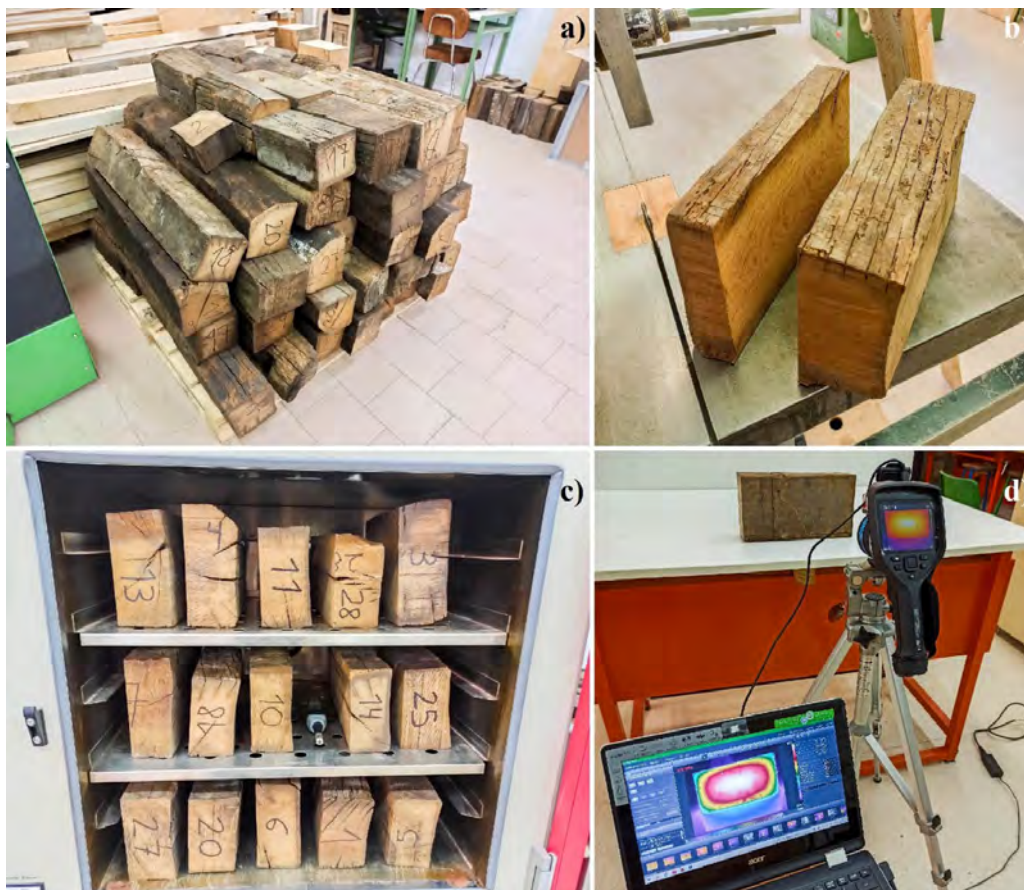


Figure 1. Specimens preparation and testing: a) recovered timber pieces; b) sawn specimens; c) specimens in the oven; d) thermography measurements.

3. Results

From the preliminary results, both measurements, in the perfect planed face and in the irregular external face, are valid and suitable for density estimation.

The results, based on 15 recovered timber oak specimens, require validation with a larger sample. An appropriate methodology for density estimation of recovered timber and existing structures, has been developed and can be applied in future studies.

4. Conclusions

Emissivity measurements by thermal imaging camera were successfully carried out in recovered timber, in both faces: in a perfectly planed face and in an irregular no carpentry worked face.

The possibility to estimate timber density from thermography measurements, already shown in new perfectly planed timber for few previous authors, is also possible in the case of recovered timber even if the timber surface is irregular as usually it is in old timber.

Preliminary results using thermography open the opportunity to in-situ density estimation, for example in existing structures or in demolition sites, if a change in temperature can be induced in the timber by an external heating source.

Acknowledgement

The RECOVERS project has received funding from the European Union's Horizon 2020 Research and Innovation Programme under the Marie Skłodowska-Curie grant agreement No. 101025786. The InFutURWood project was supported under the umbrella of ERA-NET Cofund ForestValue and has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement N°773324. The InFutURWood project has received funding in Spain from MICIU-Spain [PCI2019-103544]. The authors would like to thank María Portela from PEMADE USC, Alberto Aguado from UVA Campus Palencia and Patricia Vallelado from UVA for their helpful collaboration in some laboratory works.

References

- [1] European Commission 2020. A new Circular Economy Action Plan. COM/2020/98 final.
- [2] Osuna-Sequera, C.; Llana, D.F.; Íñiguez-González, G.; Arriaga, F. (2020) The influence of cross-section variation on bending stiffness assessment in existing timber structures. Eng. Struct. 204:110082. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.110082>
- [3] Llana, D.F.; Íñiguez-González, G.; Montón, J.; Arriaga, F. (2018) In-situ density estimation by four nondestructive techniques on Norway spruce from built-in wood structures. Holzforschung 72(10):871-879. <https://doi.org/10.1515/hf-2018-0027>
- [4] Martínez, R.D.; Balmori, J.A.; Llana, D.F.; Bobadilla, I. (2020) Wood density determination by drilling chips extraction in ten softwood and hardwood species. Forests 11(4):383. <https://doi.org/10.3390/f11040383>
- [5] López, G.; Basterra, L.A.; Acuña, L. (2013) Estimation of wood density using infrared thermography. Constr. Build. Mater. 42:29-32. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.001>
- [6] López, G.; Basterra, L.A.; Acuña, L. (2018) Infrared thermography for wood density estimation. Infrared Phys Techn 89:242-246. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2018.01.015>

1050

DERIVAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E AO CORTE – EN 384. APLICAÇÃO A UMA ESPÉCIE DE BAIXA MASSA VOLUMICA

Jose Machado¹; Artur Feio²

¹; 0000-0001-5057-0472

² 0000-0002-9403-015X

Palabras clave / Palavras-chave:

Cryptomeria japonica, Densidade, EN 408, Flexão, Derivação de propriedades mecânicas

Resumen / Resumo:

A utilização de madeira para fins estruturais no espaço europeu é regulamentada pela norma EN 14081-1, diferenciando dois procedimentos de classificação – visual ou mecânico. Para os diversos sistemas de classificação a obtenção de valores característicos de resistência mecânica baseia-se em geral na determinação experimental de três propriedades de referência – massa volúmica, resistência à flexão e módulo de elasticidade ou massa volúmica, resistência à tração e módulo de elasticidade. As restantes propriedades podem ser obtidas experimentalmente ou a partir destas, ditas propriedades de referência, sendo neste último caso utilizadas as equações propostas na EN 384. O presente estudo analisa a adequação das equações propostas para a compressão e o corte paralelo às fibras quando aplicadas a uma espécie de madeira de baixa massa volúmica, como é o caso da madeira de criptoméria. Os resultados obtidos evidenciam a possibilidade da equação relativa à estimativa dos valores de resistência característica para corte não ser adequada (não conservativa). Relativamente à aplicação da equação para estimar a compressão paralela às fibras esta revela-se adequada.

1. Introdução

A madeira é um material anisotrópico considerado ortotrópico para fins estruturais dada a diferença significativa entre suas propriedades ao longo da fibra (maior) quando comparadas com a fibra transversal (inferior). Assim, uma caracterização mecânica completa da madeira para fins estruturais requer um extenso programa de ensaios para cada espécie de madeira. Este programa experimental é dispendioso e dado o volume de madeira envolvido restringiria a madeira disponível para construção a algumas poucas espécies.

De forma a aliviar o trabalho experimental para caracterização de madeiras para fins estruturais a EN 384:2022 [1] permite somente o ensaio para determinação de algumas propriedades, ditas de referência, e através destas derivar as restantes. Assim, a partir dos valores de massa volúmica, resistência e rigidez à flexão ou, em alternativa, massa volúmica, resistência e rigidez à tração paralela às fibras, as demais propriedades, onde se incluem a resistência ao corte e à compressão paralelo às fibras, podem ser estimadas.

Dada a sua baixa massa volúmica, torna-se relevante avaliar se as equações preconizadas para converter as demais propriedades mencionadas na EN 384:2022 [1] são aplicáveis a esta espécie. Assim, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a adequação das equações incluídas na referida norma, para estimar os valores característicos relativos à resistência ao corte e à compressão paralela às fibras da madeira de criptoméria.

2. Material e métodos

Foram selecionadas vinte vigas com dimensão 2000x100x40 mm³ e vinte com dimensão 3000x150x50 mm³. A proveniência da madeira é a Região Autónoma dos Açores, sendo metade das vigas da ilha de São Miguel e a outra metade na Ilha Terceira. Estas duas ilhas são responsáveis por 78% da produção total de criptoméria da região.

As vigas foram condicionadas num ambiente de temperatura de 20°C±2°C e 65%±5% de humidade relativa do ar até atingir massa constante (variação menor ou igual a 0,1% em um período de 6h).

Após condicionamento as vigas foram sujeitas a ensaio de flexão de acordo com o descrito na EN 408:2017 [2], sendo determinada a tensão de rotura.

Após ensaio um provete pequeno cobrindo toda a seção transversal e com comprimento de 100 mm foi cortado próximo à zona de rotura para determinação da massa volúmica e do teor de água. Igualmente das extremidades das vigas (sem sinais de danos mecânicos), foram retirados provetes tanto para compressão quanto para resistência ao corte. Assim, foram obtidos vinte provetes de dimensão 40x100x240 mm³ e vinte de dimensão 40x150x300 mm³, tendo em vista a determinação da resistência à compressão paralela à fibra ($f_{c,0}$). Igualmente foram obtidos quarenta provetes de dimensões (55x32x300 mm³) para ensaio de corte. Estes provetes foram colados com resina epóxi de dois componentes a placas de aço. Após os ensaios apenas trinta provetes foram considerados como válidos, apresentando uma rotura na interface madeira/placa de aço inferior a 20%, critério adotado na EN 408:2017 [2].

3. Resultados

A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos experimentalmente.

Tabela 1. Resultados de flexão, compressão e corte

	Valor média (N/mm ²)	Valor característico $f_{c,0,k}$ (N/mm ²)	Coefficiente de variação (%)
Resistência à flexão	28,3	18,6	21
Compressão paralela às fibras	23,2	16,6	18
Corte paralelo às fibras	3,93	2,81	17

3.0.1. Estimativa da resistência à compressão – EN 384

A estimativa do valor característico da resistência à compressão paralela às fibras foi efetuada de acordo com a indicação da EN 384:2022 [1], Equação (1).

$$f_{c,0,k} = 4,3(f_{m,k})^{0,5} \quad (1)$$

O valor característico da resistência á flexão foi calculado assumindo uma distribuição Lognormal ($f_{m,k} = 18,6 \text{ N/mm}^2$), de acordo com a EN 14358:2016 [3]. No presente estudo foi incluída a equação indicada na versão EN 384:2004 [4], equação (2).

$$f_{c,0,k} = 5(f_{m,k})^{0,5} \quad (2)$$

A comparação da aplicação das duas equações é apresentada na figura 1.

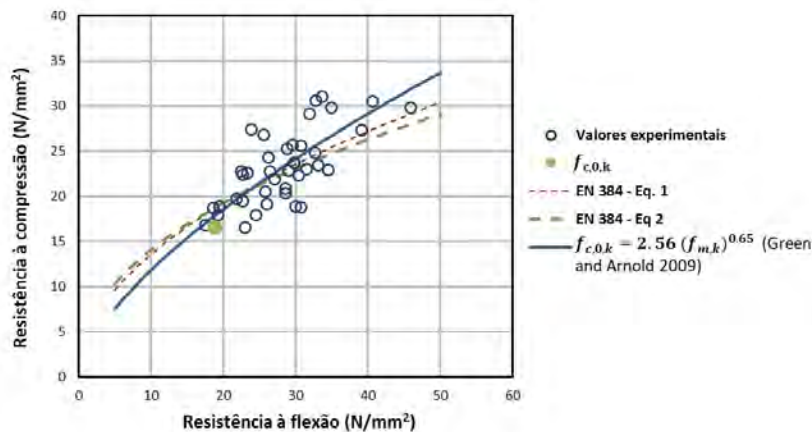


Figura 1. Resistência à compressão paralela às fibras em função da resistência à flexão

A Figura 1 permite verificar não existir uma diferença significativa entre a aplicação das duas equações das versões da EN 384 de 2022 e de 2004. Para a classe C14, atribuída à classe visual mais elevada de criptoméria segundo a NP 4544:2023 [5], a alteração introduzida pela Equação 1 (diminuição do valor característico de compressão) é de apenas -1,9% quando comparada com a Equação 2.

O valor característico da resistência à compressão da amostra ($f_{c,0,k} = 16,6 \text{ N/mm}^2$) foi determinado de acordo com a EN 14358:2016 [3], assumindo uma distribuição Lognormal. O valor característico de compressão da amostra é inferior ao valor esperado pela aplicação da Equação 1, Figura 1. No entanto, o valor está dentro do intervalo de confiança Lawless [5] para o 5º percentil para um nível de significância de $p < 0,001$ (estatisticamente altamente significativo), apontando a adequação da equação para criptoméria. Outros resultados indicam a obtenção de valores não conservativos para valores de resistência à flexão inferiores a 24 N/mm^2 [7].

3.1. Estimativa da resistência ao corte – EN 384

O valor característico da resistência ao corte paralelo à fibra ($f_{v,k}$) foi obtido em função da resistência à flexão de acordo a EN 384:2022 [1] através da Equação 3.

$$\begin{cases} f_{m,k} \leq 24 \text{MPa} ; f_{v,k} = 1,6 + 0,1 f_{m,k} \\ f_{m,k} > 24 \text{MPa} ; f_{v,k} = 4,0 \end{cases} \quad (3)$$

Tal como para a compressão, os resultados foram comparados com a equação anterior utilizada na EN 384:2004 [4], Equação 4.

$$f_{v,k} = \min. \left\{ \begin{matrix} 3,8 \\ 0,2(f_{m,k})^{0,8} \end{matrix} \right. \quad (4)$$

Comparando ambas as equações, os valores estimados são similares para classes de resistência acima da C40, mas na atual versão aumenta de forma significativa para classes de resistência inferiores a C40.

O valor característico da resistência ao corte ($f_{v,k,s} = 2,81 \text{ N/mm}^2$) foi determinado de acordo com EN 14358:2016 [3].

O valor determinado é significativamente inferior ao requisito da EN 384:2022 [1] para a classe C14 ($3,46 \text{ N/mm}^2$), sendo no entanto superior ao requisito da EN 384:2004 [4] ($2,07 \text{ N/mm}^2$). O intervalo de confiança Lawless para o 5º percentil [6] indica, para um nível de significância $p < 0,001$, que o valor estimado é significativamente inferior ao valor apontado pela EN 384:2022 [1] para a classe C18, Figura 2.

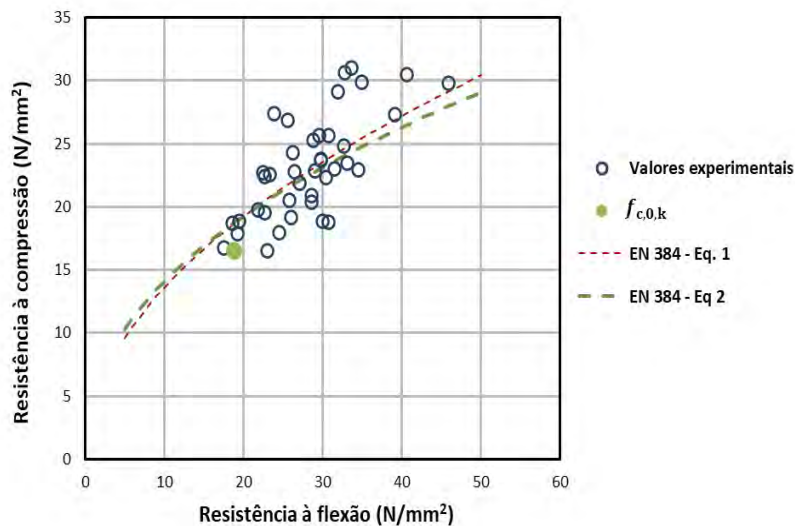


Figura 2. Resistência ao corte em função da resistência à flexão

4. Conclusões

Os resultados obtidos indicam que:

- O valor característico da resistência à compressão estimado através da atual equação EN 384:2022 [1] sobrestima em (+11%) o valor obtido a partir dos dados experimentais. No entanto, a diferença não é significativa e portanto, não existe evidência estatística que suporte a rejeição da hipótese de aplicação da Equação à madeira de criptoméria.
- O valor característico de resistência ao corte paralelo às fibras é sobrestimado pela equação atual prescrita pela EN 384:2022 [1]. A equação presente na EN 384:2004 [4] ajustou-se melhor aos resultados agora obtidos.

References

- [1] European standard (2022) EN 384:2016+A2:2022. Structural timber - Determination of characteristic values of mechanical properties and density. European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium.
- [2] European standard (2017) EN 408:2010+A1:2017. Timber structures - Structural timber and glued laminated timber - Determination of some physical and mechanical properties. European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium.
- [3] European standard (2016) EN 14358:2016. Timber structures - Calculation and verification of characteristic values. European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium.
- [4] European standard (2004) EN 384:2004. Structural timber - Determination of characteristic values of mechanical properties and density. European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium.
- [5] Norma Portuguesa (2023) NP 4544:2023. Madeira serrada de criptoméria para estruturas - Classificação visual para fins estruturais. Instituto Português de Qualidade, Caparica, Portugal.
- [6] Chakraborti, A.; Li, J. (2007) Confidence interval estimation of a normal percentile. The American Statistician 61(4): 331-336. <https://doi.org/10.1198/000313007X244457>.
- [7] Steiger, R.; Arnold, M. (2009) Strength grading of Norway spruce structural timber: revisiting property relationships used in EN 338 classification system. Wood Sci. Technology 43:259-278. <https://doi.org/10.1007/s00226-008-0221-6>

1051

DESARROLLO DE PLATAFORMA DE PRODUCTO MODULAR BASADA EN BIM, APLICADA A VIVIENDAS MULTIFAMILIARES DE BAJA Y MEDIANA ALTURA EN MADERA

Mauricio Vargas Mosqueda¹

¹ Universidad del Bio Bio

Palabras clave / Palavras-chave:

Automatización del diseño, Edificación en altura en madera, Modelado paramétrico, Plataforma de productos modulares, Diseño para la manufactura y ensamblaje

Resumen / Resumo:

La construcción modular ofrece grandes ventajas a nivel de productividad y sustentabilidad en la construcción de viviendas en altura en madera, ya que permite prefabricar grandes volúmenes de edificación en ambientes controlados, con una mayor calidad en los procesos, mejores condiciones de salud y seguridad laboral, y un mayor control de los residuos. Por otro lado, permite disminuir significativamente los tiempos de trabajo en sitio, minimizando retrasos por condiciones climáticas o logísticas. No obstante, la implementación de esta forma de edificar implica un cambio de paradigma dentro del sector construcción, siendo crucial reducir ciertas brechas. Uno de los principales aspectos a considerar son los procesos de diseño para la manufactura y ensamblaje, los cuales requieren una inversión mayor de recursos y de tiempo dentro del proyecto. En función de lo anterior, se desarrolló una plataforma de producto modular basada en BIM, con la finalidad de optimizar los niveles de industrialización y hacer más eficientes los procesos de diseño para la manufactura y ensamblaje de las edificaciones en estudio. Para ello se aplicó una metodología basada en ciencias del diseño, que permitió en primera instancia, entender el problema, para luego proponer y validar una solución. Como resultado, pudo desarrollarse un set de módulos adaptables que permiten generar distintas variantes de diseño y que pueden ser configurados fácilmente a partir de componentes constructivos estandarizados, digitalizados como objetos paramétricos en BIM. Asimismo, se generó un algoritmo de automatización desde un software paramétrico, que permitió, preliminarmente, agilizar los procesos de modelamiento digital.

1. Introducción

1.1. Viviendas en altura en madera

La construcción de viviendas en baja y mediana altura en madera, por su materialidad, tecnología constructiva y escala urbana, constituyen una extraordinaria opción para la construcción de viviendas en forma sustentable e industrializada. Esto, tomando en cuenta el hecho de que la madera, es hoy

en día, el único material existente en el planeta que permite construir edificaciones en altura con un balance ambiental positivo a lo largo de todo su ciclo de vida[1].

Por otro lado, la tecnología desarrollada actualmente en torno a la construcción madera permite construir y prefabricar componentes de grandes dimensiones, con alta resistencia, poco peso y posibilidades de ensamblaje en seco. Lo que hace de esta una tecnología ideal para alcanzar altos niveles de industrialización.

A pesar de esto, la novedad implícita en la construcción de estas edificaciones, aunada a sus condiciones de diseño y construcción, implican un cambio de paradigma para la industria de la construcción en general. Esto fundamentalmente debido al hecho de ser tipologías constructivas altamente industrializadas que deben ser diseñadas en forma precisa y total antes de iniciar sus procesos constructivos.

No obstante, la complejidad implícita en su desarrollo genera una brecha entre las soluciones de diseño a pedido y el tiempo de ejecución del proyecto, por lo que la tendencia común apunta a implementar soluciones repetitivas que no se adaptan a las condiciones propias del proyecto y el sitio, o bien soluciones modulares estandarizadas que impiden la flexibilidad de diseño.

Sin embargo, a raíz del surgimiento de los métodos modernos de diseño y construcción, entre los que se encuentran las Plataformas de Productos (PP), esta brecha ha ido disminuyendo.

1.2. Las plataformas de productos basadas en bim como método avanzado de diseño y construcción.

Los métodos modernos de diseño y construcción surgen hoy en día con la finalidad de optimizar y hacer más productivo el desarrollo de proyectos en el ámbito de la arquitectura, ingeniería y construcción (AIC)[2], [3].

Estos métodos permiten minimizar brechas entre los procesos de diseño y los procesos constructivos, a partir de la aplicación de técnicas de diseño y construcción virtual (VDC) [4], BIM (Building Information Modeling) [5], y de diseño paramétrico [6], [7], las cuales se apoyan en softwares de diseño, ingeniería y manufactura, asistidos por computadora (CAD, CAE y CAE respectivamente) que permiten un enlace directo con procesos de manufactura avanzada, como la manufactura robótica y/o el control numérico computarizado (CNC).

En este contexto surgen las Plataformas de Productos (PP) en base a BIM, como métodos de vanguardia [8]–[10].

Las plataforma de producto son sistemas integrados enfocados al el diseño para la manufactura y ensamblaje, que se construyen a partir de sets o conjuntos de componentes modulares o subensambles, los cuales poseen un representación virtual (basada en BIM) sustentada en un “gemelo físico”. Dichos componentes poseen también interfaces muy bien definidas, que garantizan distintas combinaciones en forma eficaz y eficiente, permitiendo así la producción de una variada gama de productos y servicios con un alto control de la cadena de valor, que pueden ser fabricados por uno o varios proveedores. Su propósito en si es racionalizar los procesos de manufactura y ensamblaje de componentes para reducir la carga de mano de obra y al mismo tiempo flexibilizar el proceso de personalización[10].

Las metodologías de Diseño para la Manufactura y Ensamblaje (DfMA) en las cuales se centran estas plataformas, fueron inicialmente ideas para el desarrollo productos de manufactura industrializada y luego traídas al ámbito de la construcción industrializada. Estas se enfocan en llevar el mayor porcentaje de construcción a la fábrica bajo procesos altamente automatizados con la finalidad de garantizar un mayor y mejor control de los procesos productivos, así como altos niveles de seguridad y salud laboral. Los métodos de DfMA se centran en el diseño de cada componente constructivo de la edificación tomando en cuenta sus procesos de manufactura “fuera de sitio”, transporte y ensamblaje “en sitio” (Gao et al., 2019; Tan et al.,2020).

1. Materiales y métodos

El problema de investigación se centra en la optimización de los procesos de diseño para la manufactura y ensamblaje de edificaciones en baja y mediana altura con la finalidad de alcanzar rapidez de modularización y flexibilidad de diseño. En consecuencia, se aplica una metodología de Investigación en Ciencias del Diseño (DSR) que involucra el desarrollo de soluciones o artefactos para abordar un problema [3,4]. De acuerdo a esto se definieron tres etapas para el desarrollo de la investigación: 1) estudio del problema, 2) desarrollo de la solución y 3) validación. En este sentido se comienza por analizar las condiciones de diseño y construcción de las edificaciones en estudio, considerando como alcanzar condiciones óptimas de modularización para obtener altos niveles de industrialización. A partir de esto se procede al desarrollo de una posible solución tomando como referencia casos de estudio. Por ultimo se hace una validación preliminar de la solución con dos casos de estudio.

2. Resultados y discusión

A partir de un estudio de casos se pudieron identificar y definir tipologías de módulos y reglas de configuración que permitieron la modularización total de los distintos diseño de plantas, respetando su configuración espacial original. Una vez definidos los distintos tipos de módulos se diseñó un sistema constructivo que facilitara la generación de sus distintas configuraciones constructivas, así como la adaptación a distintos tamaños. Este sistema está conformado por un set de componentes e interfaces constructivas que fueron diseñados y modelados como familias paramétricas en Revit (figura 2), tanto en CLT, como en MLE y entramado ligero. Para ello se tomaron en consideración criterios de estandarización de productos y de procesos. Como resultado se obtuvo una plataforma de producto modular, definida tanto por las tipologías de módulos, como por el sistema constructivo propuesto, que posibilita la configuración constructiva de múltiples diseños de planta (figura 3). Para complementar la propuesta se desarrolla un algoritmo de automatización en Rhinoceros y Grasshopper (figura 4) que permitió la parametrización de las distintas tipologías de módulos y agilizó la adaptación dimensional de acuerdo a los requerimientos de diseño.

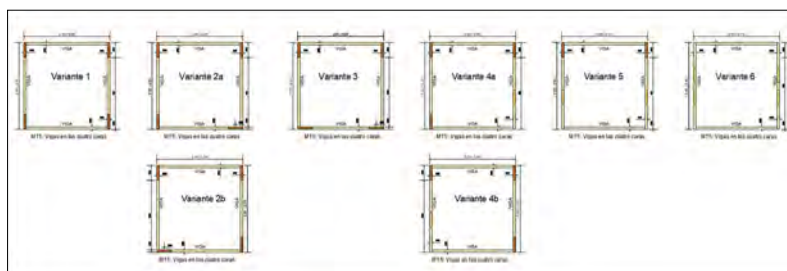


Figura 1. Tipologías de módulos configurables y adaptables. Fuente: elaboración propia.

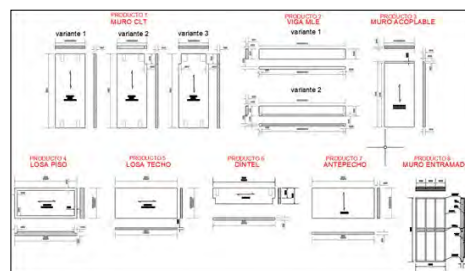


Figura 2. Sets de componentes que conforman el sistema constructivo. Fuente: elaboración propia.



Figura 3. Configuración de módulos a partir de familias paramétricas en Revit. Fuente: Elaboración propia.

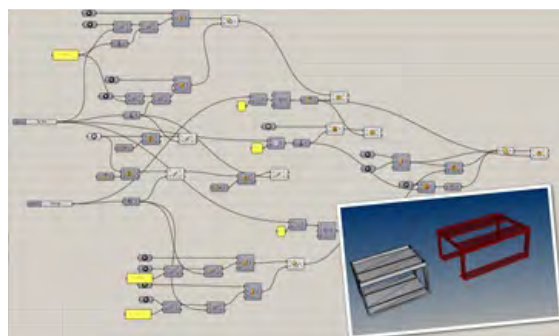


Figura 4. Canvas de Grasshopper. Algoritmo para módulo adaptable. Fuente: Elaboración propia.

3. Conclusiones

La investigación permitió definir un método de modularización constructiva que permite alcanzar altos niveles de industrialización, considerando para esto, el mayor volumen de construcción fuera de sitio posible ya que esto implica mayor control de calidad de los procesos contractivos, mejor manejo de desperdicios y mayores niveles de seguridad y salud laboral. Si bien la solución propuesta aporta grades ventajas a nivel de industrialización, el hecho de trabajar una modularización tridimensional, implica una alto porcentaje de repetición de componentes y el aumento de áreas y volúmenes de construcción, por lo que su factibilidad a nivel de costos debe ser evaluada en futuras investigaciones. Trabajar con un sistema híbrido permitió evitar la repetición de muros de CLT y alternarlos con muros entramados. Por otro lado, el método de modularización propuesto representa un punto de partida que puede ser potenciado a partir de otros recursos de automatización en combinación con inteligencia artificial, por lo que se percibe como una herramienta con alto potencial para optimizar los procesos de diseño para la manufactura y ensamblaje de edificaciones residenciales en altura en madera. Por otro lado, aun cuando la propuesta fue validada preliminarmente a nivel estructural, para su implementación definitiva requiere ser validada en forma más exhaustiva.

Referencias

- [1] M. Smyth, A Study of the Viability of Cross Laminated Timber for Residential Construction. Stockholm, Sweden, 2018.
- [2] A. Davies, “Modern Methods of Construction: A forward-thinking solution to the housing crisis?,” Rics, no. September, 2018, [Online]. Available: www.rics.org
- [3] F. Zilic, J. Elissetche, and V. Hernadez, “Oportunidades de manufactura avanzada para la industria de la construcción en Madera,” p. 98, 2019, [Online]. Available: www.polomadera.cl
- [4] Building and Construction Authority [BCA], “Singapore VDC Guide,” Building and Construction Authority, no. October, 2017.
- [5] X. Yin, H. Liu, Y. Chen, and M. Al-Hussein, “Building information modelling for off-site construction: Review and future directions,” *Autom Constr*, vol. 101, no. January, pp. 72–91, 2019, doi: 10.1016/j.autcon.2019.01.010.
- [6] S. Staub-french et al., “Building Information Modeling (BIM) and Design for Manufacturing and Assembly (DfMA) for Mass Timber Construction,” *BIM TOPiCS Research Lab -UBC*, no. November, p. 83, 2018, [Online]. Available: bimtopics.civil.ubc.ca
- [7] A. Shibani, A. B. Bhavsar, D. H. Hassan, M. Saidani, and A. Agha, “Investigating the Benefits of BIM for Mid-Rise Timber Buildings in Canada : A Qualitative Study,” *Journal of Mechanical And Civil Engineering*, no. February, 2021.
- [8] D. Popovic, S. Thajudeen, and A. Vestin, “Smart Manufacturing Support to Product Platforms in Industrialized House Building,” in *Modular and Offsite Construction*, 2019, pp. 284–292.
- [9] T. W. Simpson, J. R. Maier, and F. Mistree, “Product platform design: Method and application,” *Research in Engineering Design - Theory, Applications, and Concurrent Engineering*, vol. 13, no. 1, pp. 2–22, 2001, doi: 10.1007/s001630100002.
- [10] Bryden Wood, *Platforms: bridging the gap between construction + manufacturing*, vol. 2. 2018.
- [11] S. Gao, R. Jin, and W. Lu, “Design for manufacture and assembly in construction: a review,” *Building Research and Information*, vol. 0, no. 0, pp. 1–13, 2019, doi: 10.1080/09613218.2019.1660608.

1052

DESARROLLO DE SISTEMAS CONSTRUCTIVOS DE PINO PRESENTE EN EL SUDOESTE EUROPEO Y CORCHO NATURAL COMO EJEMPLO DE TRANSICIÓN HACIA LA CONSTRUCCIÓN DE ALTA EFICIENCIA ENERGÉTICA Y BAJO IMPACTO MEDIOAMBIENTAL, EL PROYECTO IMIP

Salvador Gilabert Sanz¹; Emilio A. Luengo²; J. Vicente Oliver Villanueva³; Eva Hermoso⁴

¹ Universidad Politécnica de Cataluña (UPC),

² Dept. Mecánica Medios Continuos y Teoría de Estructuras - Universidad Carlos III de Madrid; Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera (AITIM),

³ Universitat Politècnica de València (UPV)

⁴ ICIFOR-INIA, (CSIC), Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria

Palabras clave / Palavras-chave:

CLT- Cross Laminated Timber, Construcción sostenible, Pino marítimo, Pino uncinata, Quercus suber

Resumen / Resumo:

El presente artículo expone los resultados constructivos y de laboratorio obtenidos y desarrollados en el marco del proyecto europeo SUDOE IMIP (*Innovative Eco-Construction System Based on Interlocking Modular Insulation Wood & Cork-Based Panels* www.sudoe-imip.eu), financiado por el Programa Interreg Sudoe 2021-2024. En el presente proyecto se han diseñado, validado e implementado un sistema de construcción de bajo impacto ambiental, basado en madera de pino mediterráneo y corcho naturales. La investigación aborda como una de las principales aportaciones, la mejora significativa de la renovación del sector de la construcción tanto en la eficiencia energética del edificio como reduciendo significativamente los impactos medioambientales derivados del proceso constructivo y del uso del mismo en los edificios públicos y privados del Suroeste Europeo.

Los sistemas desarrollados y analizados, están destinados tanto para edificios de nueva construcción como para la rehabilitación o sistemas prefabricados, abarcando desde sistemas estructurales de forjados y muros de carga, a cerramientos de fachada y cubierta, así como particiones y sistemas sándwich tipo Structural Insulated Panel (SIP). Así se desarrollaron y ejecutaron con gran éxito, tanto los sistemas, las acciones piloto o edificaciones reales, como los ensayos de laboratorio que se describen en este artículo, confirmando la citada eficiencia de los mismo, tanto a nivel mecánico como térmico.

1. Descripción de los sistemas

Los paneles IMIP se centran fundamentalmente en la revalorización y tecnificación de los recursos forestales de la zona del suroeste de europeos, en concreto de la madera de pino marítimo, pino uncinata, y el corcho natural [1]. Dichos materiales se combinaron para componer tanto paneles simples como detalles tipo compuestos de productos de ingeniería de la madera con el objetivo de contribuir a la mejora de la eficiencia energética [2]:

Especificaciones de los productos y sistemas:

- CLT: pino marítimo (*Pinus pinaster*, certificado PEFC) con un contenido de humedad del 12 ± 2 %.
- CLT Composite: CLT + OSB-3 según EN 13986 paneles a base de madera para uso en construcción.
- Encolado: adhesivo de poliuretano (PUR) bicomponente (A+B) según EN 15425.
- Material aislante: se utiliza corcho granulado y paneles de corcho negro según especificaciones EN 14304.

Los sistemas compuestos se clasifican como Tipo A, Tipo B, Tipo C y Tipo D. La figura 1 muestra las acciones piloto desarrolladas incluyendo los productos diseñados durante el proyecto IMIP [3].

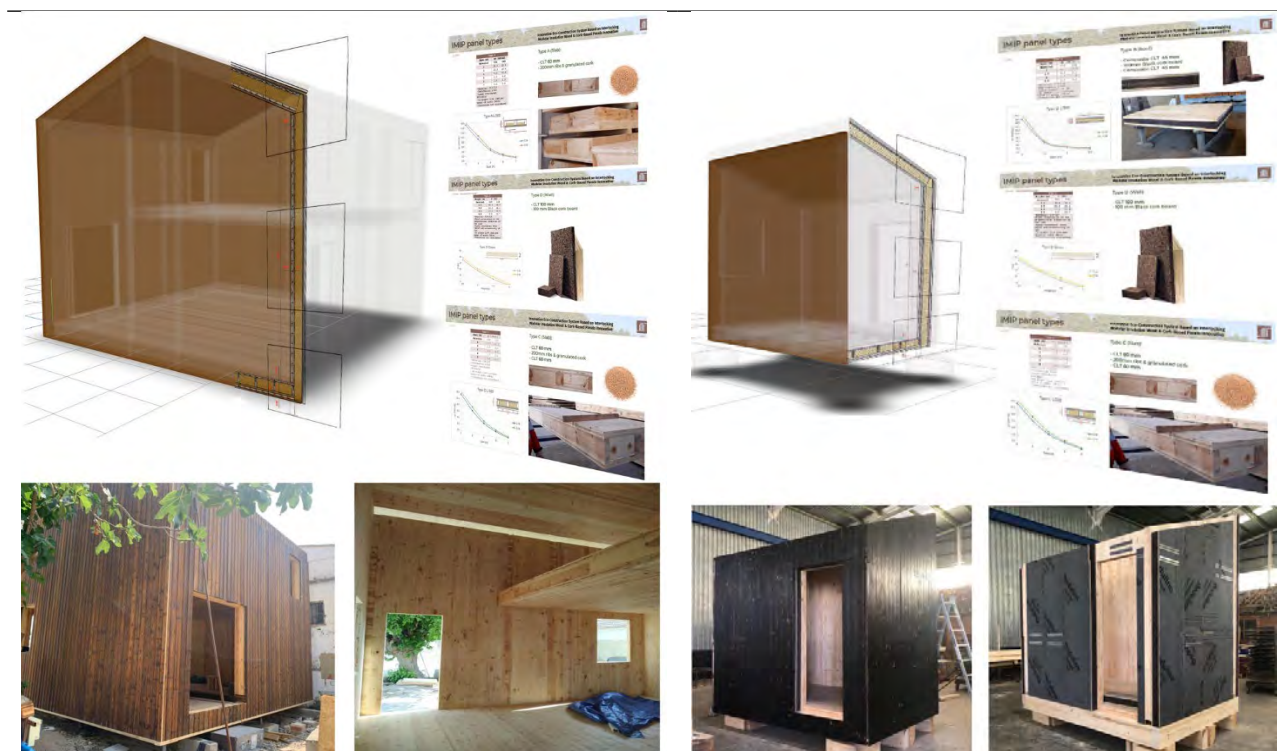


Figura 1. Acciones piloto desarrolladas en el proyecto. Izquierda en Valencia, derecha en Portugal.

Se debe exponer que en el entorno del proyecto IMIP, se ha realizado una acción piloto en Valencia, ver Figura. 1 izquierda, como ejemplo de edificación semiprefabricada, que puede sustituir edificaciones de viviendas plurifamiliares así como edificaciones de diferentes usos [3]. Además, se ha ensayado otra acción piloto desarrollada en Portugal, ver Figura 1 derecha, donde se ha estudiado la eficacia de la implementación de sistemas totalmente prefabricados y ensamblados in situ [3]. Así se ha constatado que la mejora de rendimiento en cuando al ahorro de tiempo de obra y su consecuente ahorro económico ha sido sustancial respecto a sistemas tradicionales. Los 7,5 m² de construcción de la edificación de Portugal prefabricada y lista para ensamblar, se finalizó en 1 sólo día de montaje.

2. Resultados

Al comparar en la Figura 2, la tabla de emisiones de kg CO₂ eq. en combustibles fósiles (GWPf), se obtiene un impacto del sistema de fachada IMIP de 1,70E+01 kg CO₂ eq., mientras que el equivalente en una fachada de ladrillo es de 1,85E+02 kg CO₂ eq., lo que implica que el impacto medioambiental comparativo de un sistema en base a ladrillo cerámico frente a uno en base madera IMIP, es alrededor de diez veces superior. De manera análoga sucede con los sistemas de forjados y cubiertas, Figura 3.

Si realizamos la comparación en el caso de GWPt en emisiones en Kg de CO₂ eq. totales, los resultados son incluso más significativos ya que los sistemas IMIP confeccionados en madera local y corcho natural, tienen un efecto de sumidero de carbono, esto es debido a que durante el proceso de crecimiento de las materias primas (madera de pino marítimo y corteza de alcornoque), éstas han absorbido CO₂ de la atmósfera y éste queda embebido en el sistema [4]. Así los resultados para una fachada en base a ladrillo cerámico, el impacto total en emisiones es de 1,85E+02 kg CO₂ eq. mientras que el de los sistemas de fachada IMIP es de -8,50E+01, lo que implica que la diferencia se incrementa significativamente, llegando prácticamente a ser quince veces menor el impacto por emisiones totales en los sistemas IMIP, que en los basados en cerámica.

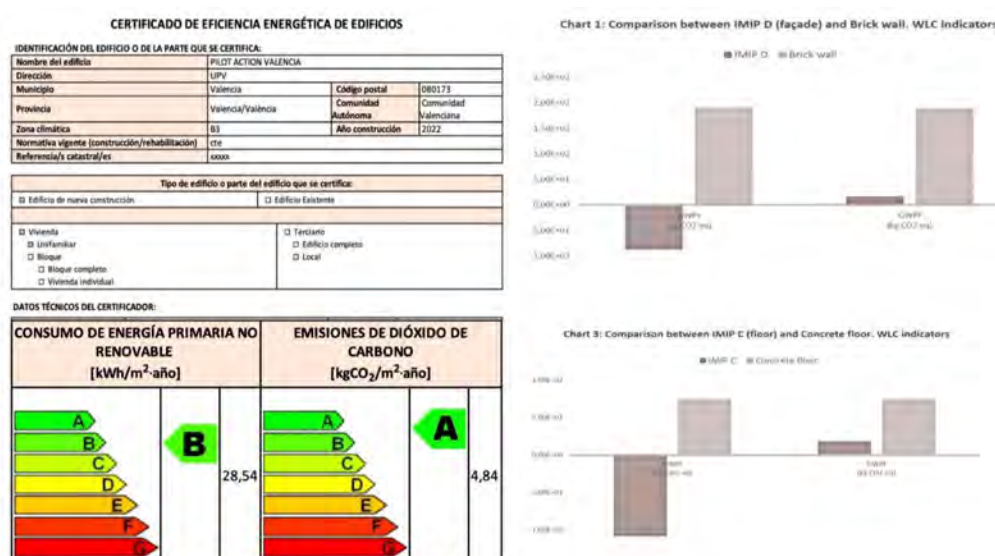


Figura 2. Comparación de fachada fabricada con el sistema IMIP tipo D y ladrillo. Indicadores WLC

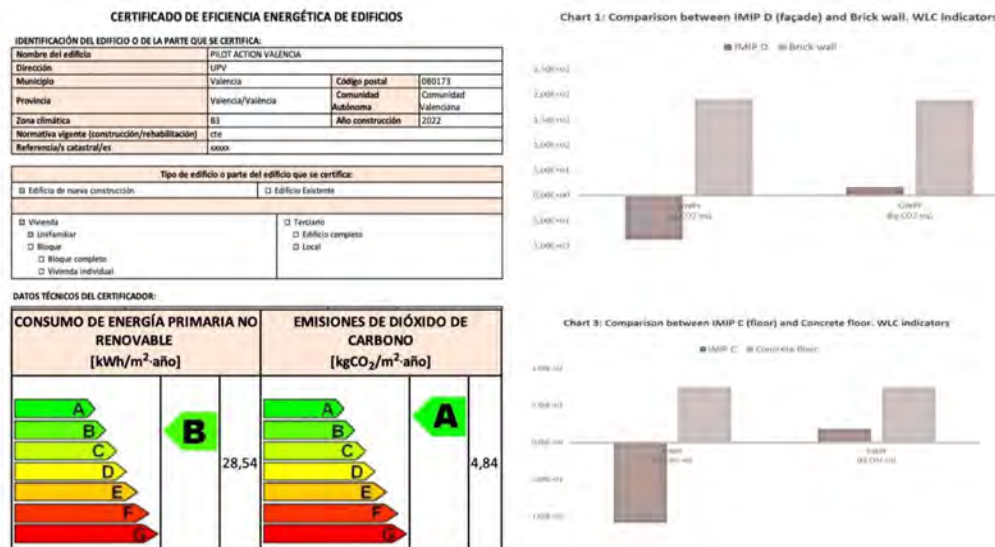


Figura 3. Comparación de forjados fabricados con el sistema IMIP tipo C y hormigón.. Indicadores WLC

3. Referencias y bibliografía

- [1] Brunet-Navarro, P.; Gilabert, S.; Monleón, M.; Redón, M.; Hermoso, E.; Sánchez-González, M.; Luengo, E.; Mandrara, Z.; Gominho, J. and Oliver-Villanueva, J.V. (2020) Interlocking Modular Insulation Panels Manufactured with Mediterranean Pinewood and Cork. Environ. Sci. Proc. 2021, 3, 86-90.
- [2] García-Valcárcel, A., Pérez-Sánchez, A., González-Cruz, M.C., González-Vidal, F.J., (2019). Energy efficiency and CO2 emissions reduction by applying BIM methodology in residential building design. Journal of Cleaner Production, 212, 576-587.
- [3] Project IMIP SOE3/P3/E0963 Innovative Eco-Construction System Based on Interlocking Modular Insulation Wood & Cork-Based Panels www.sudoe-imip.eu
- [4] Uwizeyimana, P., Perrin, M., Laügt, E., & Eyma, F. (2022). Durability study of glulam timber under cyclic moisture loading. Construction and Building Materials, 315, 125715.

1053

DESCARBONIZANDO EL SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN CON MADERA PROCEDENTE DE BOSQUES SOSTENIBLES

Pablo Narváez Cañedo¹; Ana Belén Noriega Bravo¹; Marta Salvador Del Pozo¹; Araceli Muñoz García¹; Raquel López Labiano¹

¹ PEFC España

Palabras clave / Palavras-chave:

Certificación forestal PEFC, Certificación de proyectos constructivos, Demandas de mercado, Gestión forestal sostenible, Madera maciza industrializada, Trazabilidad

Resumen / Resumo:

En un contexto marcado por regulaciones e iniciativas globales como el Pacto Verde Europeo y los ODS 2030, la madera es el mejor aliado del sector de la construcción, responsable del 36% de las emisiones de gases de efecto invernadero en la Unión Europea, para avanzar hacia modelos de ciudad más sostenibles. Al funcionar como un sumidero de carbono, la madera se erige como el material idóneo para asegurar la descarbonización, contribuyendo así a la neutralidad climática y a la bioeconomía circular, con impacto positivo para la sociedad y el planeta.

1. Introducción

En un contexto marcado por regulaciones e iniciativas globales como el Pacto Verde Europeo y los ODS 2030, la madera es el mejor aliado del sector de la construcción, responsable del 36% de las emisiones de gases de efecto invernadero en la Unión Europea, para avanzar hacia modelos de ciudad más sostenibles. Al funcionar como un sumidero de carbono, la madera se erige como el material idóneo para asegurar la descarbonización, contribuyendo así a la neutralidad climática y a la bioeconomía circular, con impacto positivo para la sociedad y el planeta.

En las ciudades se concentran más del 70% de las emisiones de la contaminación, representan más del 60% del uso de recursos y producen el 50% de los desechos globales, y a la vez, también pueden jugar un importante papel en la solución. En el High level Political Forum on Sustainable Development de UNECE de marzo de 2023, en el que se produjo la revisión del ODS 11 Ciudades y comunidades más sostenibles, se estableció que a través de la planificación urbana adecuada y la construcción con materiales sostenibles es posible descarbonizar. Otras organizaciones del ámbito empresarial, como el Forest Solution Group del World Business Council For Sustainable Development [1], han reconocido que el sector forestal puede apoyar la transición hacia una economía con bajas emisiones de carbono fomentando el uso de productos de madera en el sector de la construcción.

El sector de la construcción puede y debe contribuir a un cambio de modelo económico y productivo sostenible y responsable con el uso de los recursos, el origen de las materias primas, las emisiones de carbono y la recuperación y reducción de residuos pre y post consumo. Esto, unido a las políticas derivadas del Pacto Verde Europeo, fuerzan la transición a la neutralidad climática del sector de la construcción y a la búsqueda de soluciones sostenibles que faciliten el cumplimiento de estos requerimientos.

2. Ventajas de la madera como material de construcción

En este marco, la atención recae sobre un material milenario: la madera. La madera es un material natural renovable, reciclable, biodegradable, duradero y con propiedades de eficiencia energética y baja huella ambiental que lo hacen idóneo para incluirlo en construcción. Las construcciones en madera permiten el almacenamiento de carbono en los productos a lo largo de su ciclo de vida. Algunos estudios [2] indican que el uso de 1 m³ de madera en sustitución de otros materiales de construcción como el hormigón o el acero reduce las emisiones de CO₂ a la atmósfera una media de 1,1 a 3,9 toneladas de CO₂. La madera es el único material de construcción que almacena una cantidad sustancial de carbono y, emite mucho menos carbono en su proceso de producción, en comparación con el cemento o el acero [3].

Las estructuras de madera son más ligeras que las de otros materiales, tienen una gran durabilidad, una baja conductividad térmica y un buen comportamiento frente a sismos. Respecto a las ventajas económicas, construir con madera permite reducir significativamente los plazos de ejecución de la obra e incrementar el ratio de metros útiles lo que supone una disminución de los costes de construcción por m². En cuanto a las ventajas sociales, el uso de madera proporciona un gran confort y bienestar a los ocupantes de los edificios, de manera similar a si estuvieran en contacto con la naturaleza. Además, construir con este material contribuye a la economía de las zonas rurales, especialmente si la madera procede de la propia región [4]. Por otro lado, y según diversos estudios [5], al final del ciclo de vida de un edificio, si está construido en madera su valor es 153% superior a si estuviera construido con hormigón, debido al valor económico y/o energético de sus componentes.

En los últimos años, la construcción con madera ha experimentado un profundo proceso de transformación, tecnificación y digitalización para adaptar este material a las exigencias constructivas y de habitabilidad actuales, como por ejemplo la industrialización y producción en masa. Uno de los avances más interesantes en el panorama de la construcción es el crecimiento del uso de madera maciza compuesta, como la madera contralaminada (CLT), la madera microlaminada (LVL) o la madera laminada encolada (MLE o glulam). La ingeniería ha permitido hacer de la madera grandes formatos para servir de elemento estructural en las construcciones, permitiendo su prefabricación y ensamblaje in situ y agilizando así el proceso de montaje, lo que conlleva la reducción de tiempo, residuos, contaminación ambiental, acústica y luminosa y la mejora de la seguridad.

Además de su uso a nivel estructural para construir en altura, la madera se emplea también en interiores para la fabricación de suelos, vigas, perfiles, tarimas, pavimentos, cubiertas y revestimientos, así como elementos de carpintería tales como ventanas, puertas y escaleras u otros derivados del corcho. Otra característica adicional de la madera es su versatilidad y capacidad de permitir diseños diferenciados. Las distintas especies forestales que permiten aprovechar madera como el pino, el abeto, el alerce, el castaño, el roble o el chopo, ofrecen diferentes características físicas, pero también, variedad de colores, patrones de vetas y caracteres de la madera.

3. Gestión forestal sostenible y trazabilidad

Las cualidades ambientales, sociales y económicas de la madera en el sector de la construcción permiten prever, según ha indicado el World Bank recientemente, que el consumo de madera podría cuadruplicarse para 2050. En este contexto, una de las claves es garantizar su origen sostenible y trazabilidad a lo largo de la cadena de suministro. Para que las masas forestales perduren en el tiempo es necesario que procedan de bosques que cuenten con mecanismos de verificación de gestión forestal sostenible, como la certificación PEFC. Esta certificación asegura que se cumplen unas condiciones económicas, sociales y medioambientales justas y responsables, desde el bosque hasta el consumidor final, impidiendo la deforestación y la tala ilegal y contribuyendo a la regeneración y crecimiento de los bosques, entre muchos otros beneficios. Igualmente, en todos los eslabones de la cadena de producción de los productos de madera se asegura la trazabilidad de ese origen sostenible y el cumplimiento de unas condiciones laborales dignas, creando un tejido económico sostenible y promoviendo el desarrollo rural. A su vez, elegir madera certificada PEFC contribuye al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2030, en especial del 8 (trabajo decente y crecimiento económico), 9 (industria, innovación e infraestructura), 11 (comunidades y ciudades sostenibles), 12 (producción y consumo responsable), 13 (acción por el clima) y 15 (vida de ecosistemas terrestres).

4. La certificación de proyectos constructivos

Para demostrar que la madera utilizada en un proyecto constructivo procede de fuentes sostenibles certificadas, PEFC ha diseñado la certificación de proyectos. A través de esta modalidad de certificación, se ofrece un mecanismo para verificar de forma independiente el uso de madera certificada en un proyecto constructivo único. El director de proyecto que obtiene la certificación establece un sistema de gestión que permita el control de todos los materiales de origen forestal utilizados en la construcción y se responsabiliza de la formación del personal y de realizar las auditorías internas, abarcando las actividades realizadas por todos los subcontratistas. Posteriormente, la certificación independiente realizada por una tercera parte demuestra que el proyecto ha sido rigurosamente auditado según una norma internacional, dando garantías del uso de madera certificada y diferenciándolo en el sector de la construcción.

Otro aspecto fundamental del uso de madera certificada es su reconocimiento en los sistemas de certificación de construcción sostenible a nivel internacional, como el sistema LEED del Green Building Council de Estados Unidos, el BREEAM de Building Research Establishment en Reino Unido, el Estándar de Construcción WELL del International Building Institute, el Built Green en Canadá, el sistema VERDE en España de GBC, el RICS Ska y el CASBEE en Japón y el GBC de Australia, entre otros.

En la actualidad hay proyectos como el Life Hardwood for the Home, liderado por CESEFOR y en el que participan PEFC España, ITEC, Nasuvinsa, Tecnalia, Egoín, Grupo Gámiz y Hazi, que pretende desarrollar nuevos productos de madera orientados a la construcción, articulando una nueva cadena de valor para el uso en cascada de la madera de los hayedos y promoviendo la creación de nuevos productos tecnológicos de alto valor añadido con un almacenamiento duradero del carbono. Otras iniciativas, como la campaña global “Diseñando el futuro con madera sostenible” desarrollada por PEFC, promueven el uso de madera estructural, de interiores y carpintería, y ponen en valor estos productos como aliados clave para la descarbonización del sector de la construcción.

En el ámbito de la prescripción, existen iniciativas de administraciones públicas que multiplican el impacto de los productos de madera como solución para la descarbonización. La Xunta de Galicia ha anunciado recientemente que los nuevos edificios que construyan deberán emplear, al menos, un 20% de madera en su estructura, o el Ayuntamiento de Barcelona, a través del Programa Ayuntamiento + Sostenible, demanda productos de madera con garantías de proceder de bosques sostenibles y con certificación PEFC.

5. Implantación de la certificación forestal

Según los datos del 1 de noviembre de 2023, España cuenta con un total de 2.752.591 ha certificadas PEFC en gestión forestal sostenible, gestionadas por 65.461 propietarios y selvicultores [6], lo que representa un 14,8% de la superficie forestal arbolada. A nivel mundial son ya 291 millones de hectáreas de bosque certificado distribuidas en 44 países. En cuanto a la certificación de cadena de custodia, existen más de 20.000 empresas certificadas a nivel internacional, de las que 1.730 están ubicadas en España. El sector de aserraderos y rematantes y el de madera y construcción suponen el 33% y el 31% respectivamente, es decir más de 1.100 empresas certificadas en cadena de custodia, que suministran madera y productos de madera con garantías de trazabilidad y origen sostenible al sector de la construcción.

Según datos del Banco Mundial, en España se ha producido un incremento del 33,6 % de superficie forestal arbolada de 1990 a 2016. Por otro lado, a escala global, aunque durante el periodo 2001 a 2020 se perdieron cerca de 4,7 millones de hectárea anuales en zonas tropicales, en Europa, Oceanía y Asia la situación es la inversa, con incrementos de 1,5 millones, 0,2 millones y 3,6 millones de hectáreas, respectivamente [7]. Al garantizar la producción y aprovechamiento sostenible de la madera a través de la certificación PEFC, será posible dar respuesta a esta creciente demanda de madera para el sector de la construcción, asegurando que esta no tenga un efecto negativo sobre las masas forestales [8]. Además, el aumento de la demanda de madera para usos de mayor valor como la construcción podría mejorar las masas degradadas, expandir la superficie forestal mediante plantaciones y poner el foco en la gestión forestal sostenible llevada a cabo por los selvicultores.

Algunos de los ejemplos de construcciones que ya contemplan el uso de madera de origen sostenible con certificación PEFC como la biblioteca Gabriel García Márquez de SUMA Arquitectura (Barcelona), ganadora del Premio Mejor Biblioteca Pública del 2023 que entrega la Federación Internacional de Asociaciones e Instituciones Bibliotecarias (IFLA) y Systematic; el polideportivo de Turó de la Peira de Anna Noguera (Barcelona), ganadora del premio a mejor Edificio deportivo 2019 del World Architecture Festival (WAF); el edificio de Paseo Mallorca 15 de Ohlab (Palma de Mallorca), ganador del premio a mejor Proyecto con madera certificada 2022 del WAF; La Arboleda del Sur de Blas Arquitectos (Ezcaray), la promoción ARV8 de Ábaton (Madrid) o la Herri Eskola de Soria Arquitectos (Alkiza). Todo ellos son referentes arquitectónicos que muestran la compatibilidad entre el diseño fascinante que permite crear la madera certificada y la conservación de los bosques verificada por la certificación PEFC.

6. Conclusiones

Las excelentes cualidades ambientales, sociales y económicas de la madera y su elevada tecnificación e industrialización para su producción en masa, podrían producir un marcado incremento de su consumo en el sector de la construcción. Por tanto, es imprescindible garantizar que los hábitats forestales perduren en el tiempo a través de mecanismos de verificación independiente como la certificación de proyectos constructivos PEFC, que asegura el origen sostenible y la trazabilidad hasta el proyecto final, garantizando un origen sostenible de los materiales, impidiendo así la deforestación y la tala ilegal y contribuyendo a la regeneración y crecimiento de los bosques, entre muchos otros beneficios.

Referencias

- [1] Forest Solution Group del World Business Council For Sustainable Development, Forest Sector Net-Zero Roadmap, 2023
- [2] How can wood construction reduce environmental degradation? Elias Hurmekoski. European Forest Institute, 2017
- [3] Circularity concepts in wood construction, Geneva Timber and Forest Study Paper 95, UNECE, 2023
- [4] Guía para el fomento de la madera en contratación pública de edificaciones sostenibles, Agencia Galega da Industria Forestal, 2023
- [5] Gu. H, Liang. S, Bergman, R., Comparison of Building Construction and Life Cycle Cost for a High-Rise Mass Timber Building with its Concrete Alternative, FPS IC / Forest Product Society – International Conference, 2020.
- [6] Certificación Forestal PEFC: Gestión Forestal Sostenible & Cadena de Custodia, PEFC España, 2023.
- [7] Evaluación recursos forestales mundiales, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2020.
- [8] Can rising demand for timber in construction accelerate deforestation? Eduardo Rojas Briales y Simon Flinn, 2023.

1056

DESENVOLVIMENTO DA MADEIRA LAMELADA PREGADA (MLP) PARA USO DE SISTEMA PLACA

Carlito Calil Júnior¹; Carlito Calil Neto²; Melissa Lago De Jesus S. Silva²

¹ Universidade de São Paulo

² Rewood

Palabras clave / Palavras-chave:

Desempenho mecânico, Madeira engenheirada, Prego de madeira, Prego metálico

Resumen / Resumo:

A madeira lamelada pregada (MLP/NLT) possui baixo custo de produção, fabricação simples, bom desempenho arquitetônico e mecânico, suas lamelas resistem à carga em conjunto através da ligação de pregos. Tais características estão elevando o conceito do produto e o tornando popular. Além disso, por ser um produto engenheirado de madeira, está associado a redução de emissões de gases com efeito estufa, é proveniente de recurso natural e renovável. Esse estudo tem como objetivo desenvolver placas de MLP com pregos metálicos e pregos de madeira, a fim de tornar o produto mais sustentável. Para isso, os dois tipos de placas serão ensaiados à flexão, de modo que o desempenho mecânico será analisado de forma comparativa. Além disso, o emprego do MLP em obras já realizadas pela Rewood será apresentado para demonstrar sua aplicabilidade. Resultados preliminares acerca do MLP com pregos metálicos indicaram bom desempenho do material. Espera-se obter bons resultados com o MLP com o prego de madeira para compará-lo à fixação com prego metálico.

1. Introdução

O conceito de desenvolvimento sustentável tem estado presente em discussões e objetivos dos diversos setores da sociedade com envolvimento de países dispostos a poupar energia e reduzir emissões de gases com efeito estufa. Nesse aspecto, a indústria da construção demanda alto consumo de energia e alta poluição na fabricação de materiais convencionais, como o aço e concreto. Considerando tais questões, a madeira é um material de construção renovável de base biológica e tem sido empregada em edifícios e pontes em muitos países, de modo que se tem a redução da produção de carbono [1].

Com isso, as estruturas de madeira estão se tornando objetos de estudo para se investigar a ampla aplicabilidade e otimização desse material natural. Nesse contexto, tem-se produtos oriundos da madeira maciça, como a madeira lamelada colada (MLC), a madeira lamelada cruzada (MLCC) e a madeira lamelada pregada (MLP). Em meio ao desenvolvimento de novos produtos com melhor colagem, como a madeira lamelada colada, o MLP desapareceu. Porém, voltou a ser popular por conta de suas vantagens, sendo usado principalmente como piso de madeira e lajes. Diante disso, as

especificações, detalhamentos e recursos para o MLP estão desatualizados. É relevante o avanço de estudos relacionados a esse produto, pois possui custo mais baixo, tem fabricação simples, tem bom desempenho arquitetônico e mecânico, layout flexível, ainda, as lamelas resistem à carga em conjunto através da ligação de pregos.

Tal ligação está associada ao questionamento acerca de conexões metálicas na madeira, que no caso da ligação pregada funciona através de uma combinação do atrito entre o prego e a madeira com a compressão da madeira em torno do fixador à medida que este é conduzido para dentro. Sendo assim, uma possível exposição à água pode ser capaz de induzir corrosão do fixador, fazendo com que o desempenho da ligação seja comprometido. Todavia, através da adequação de mercado é possível reduzir o risco de falhas e conceber estruturas mais duráveis com planos de manutenção adequados [2].

Nesse âmbito, tem-se os pregos de madeira que eram usados no passado no lugar de fixadores de metal para construções de madeira expostas a ambientes úmidos [3]. Tais fixadores possuem a leveza e compatibilidade com o produto engenheirado (MLP).

Sendo assim, este estudo tem como objetivo testar placas de MLP produzidas com prego de madeira e placas pregadas com prego anelar metálico, sob flexão, a fim de comparar o desempenho das duas, avaliando-se o comportamento da ligação pregada.

2. Materiais e métodos

O programa experimental está sendo desenvolvido no Laboratório de Madeira e Estruturas de Madeira (LaMEM), da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, juntamente com a Rewood – Soluções estruturais em madeira engenheirada, no Brasil. Os ensaios contemplarão dois tipos de placas, MLP pregado com prego de madeira e MLP pregado com prego anelar metálico.

Foram ensaiadas 2 placas, compostas por 34 lamelas de *Pinus Taeda*, pregadas por dois arranjos distintos de pregos anelares de 3 mm de diâmetro e 35 mm de comprimento, acopladas por uma placa estrutural de OSB (Oriented Strand Board) com dimensões 11,1x1200x2600 mm.

Em uma placa, os pregos foram dispostos a cada 270 mm alternando altura em relação à seção, já a segunda placa, dois pregos a cada 270 mm com espaçamento de 30 mm e 25 mm de distância em relação aos limites da seção transversal.

Para a confecção das placas com prego de madeira fez-se uma aplicação preliminar desse prego em amostras de madeira. O arranjo de produção seguirá a mesma disposição das placas pregadas com prego metálico.

O procedimento dos testes das placas será realizado conforme o descrito por Pereira [4], com base na ANSI/APA PRG 320 (2011), com dimensões 2600 mm x 1500 mm.

A configuração do ensaio é apresentada na Figura 1, com posicionamento da placa de MLP no sentido das lamelas com orientação para o sentido do vão, apoiada em dois tubos metálicos posicionados a 100 milímetros de suas bordas. Uma viga de perfil metálico I é disposta no eixo central da placa, cujo cilindro hidráulico é ajustado para seu centro seja coincidente com a face do MLP. Após, 3 extensômetros são colocados na parte inferior da placa, ao longo do comprimento da viga metálica.

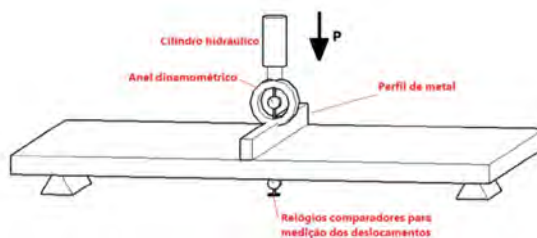


Figura 1. Configuração do ensaio

A carga é aplicada gradualmente até o limite de $l/300$, tal qual l é o vão que corresponde à distância entre os apoios da placa. Desse modo, a carga é aplicada até o limite de 8 milímetros, ao atingi-lo, faz-se o descarregamento e repete-se o processo por mais duas vezes. Em seguida, a carga é aumentada até a ruptura da placa. Os resultados serão analisados de forma comparativa entre o MLP pregado com prego anelar e com prego de madeira.

3. Resultados

Com base nos resultados parciais obtidos no ensaio de flexão das placas de MLP pregadas com prego metálico, foi possível observar o seu comportamento, através dos dados de força versus deslocamento, que indicou comportamento elástico, no intervalo da deformação máxima de 8 milímetros. A Tabela 1 apresenta os resultados referentes à densidade, força de ruptura, módulo de elasticidade estático e módulo de ruptura.

Tabela 1. Resultados

Placa	Teste	Densidade (kg/m ³)	Força de ruptura (kgf)	MOE (MPa)	MOR (MPa)
1	1	570,5	9327	8614	34
	2			8725	
	3			8824	
2	1	580,1	9081	8839	33
	2			9170	
	3			9173	

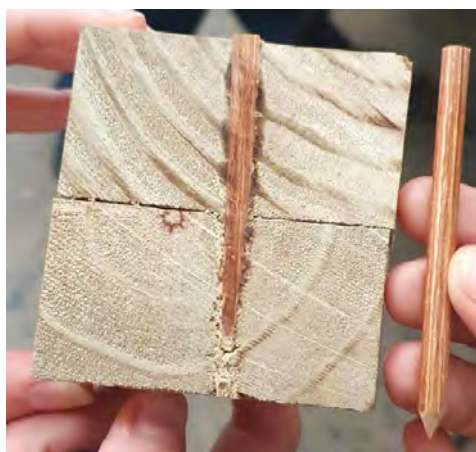
A média do módulo de elasticidade da placa 1 foi de 8721 MPa e a da placa 2 foi de 9061 MPa. Em relação à força de ruptura, não houve diferença significativa entre as placas, de modo que a placa 1 foi 2,71% maior. A Figura 2 apresenta a placa ensaiada, tendo ruptura por tração nas fibras inferiores.



Figura 2. Placa de NLT rompida

Com o objetivo de reduzir a emissão de CO_2 , desenvolver materiais com carbono incorporado, melhorar condições de corte e arranjos nas estruturas, buscou-se substituir pregos metálicos por pregos de madeira. Tais pregos são obtidos através da técnica de densificação que é capaz de produzir o material à base de madeira com desempenho mecânico superior em relação à madeira natural. Sendo capaz de utilizar conectores de madeira como substituto de fixadores metálicos, para aplicações específicas, em componentes de madeira moderadamente carregados e densos. Neste estudo, utilizou-se o prego de madeira do fabricante Lignoloc e máquina Beck para aplicação.

Em relação ao estudo preliminar da inserção do parafuso de madeira numa amostra de madeira, obteve-se uma fixação satisfatória. Todavia, o desempenho de tal parafuso será avaliado através das placas de MLP, por meio do ensaio de flexão. A Figura 3 ilustra a inserção.



a) prego de madeira inserido



b) aspecto do prego na madeira

Figura 3. Inserção do prego numa amostra de madeira

4. Conclusões

Constituindo-se uma tecnologia muito antiga, o produto MLP, ainda apresenta características físicas e mecânicas muito interessantes para aplicação em projetos e empreendimentos contemporâneos, além de representar modernidade, possuir custo benefício e estética capaz de se alinhar a arquitetura atual. Isso faz com que o MLP seja um produto que se destaca no mercado brasileiro que possui madeiras tropicais em abundância que podem ser empregadas na produção de tal produto engenheirado. Os resultados obtidos indicaram bom desempenho do MLP com prego metálico. Espera-se obter um comparativo entre os dois tipos de placas pertencentes ao programa experimental, visto que estudos que visam o aprimoramento do produto tornam-se relevantes, sobretudo, no âmbito da sustentabilidade. Por isso, espera-se alcançar resultados que possibilitem melhorar o material para viabilizar sua aplicação na construção civil, levando-se em consideração a pegada de carbono associada ao material.

O produto desenvolvido já foi utilizado em várias obras residenciais e comerciais no Brasil, tendo boa aceitação no mercado, algumas das desenvolvidas pela Rewood serão apresentadas nesse estudo.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Tetti pelo fornecimento do material.

References

- [1] Li, Z.; Feng, W.; He, M.; Chen, F.; Sun, X. (2023) Bending performance of nail laminated timber: experimental, analytical and numerical analyses. *Constr. Build. Mater.* 389: 131766. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131766.
- [2] Yermán, L.; Zhang, Y.; He, J.; Xiao, M.; Ottenhaus, Lisa-Mareike; Morrell, J. J. (2022) Effect of wetting and fungal degradation on performance of nailed timber connections. *Constr. Build. Mater.* 353: 129113, out. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129113>.
- [3] Riggio, M.; Sandak, J.; Sandak, A. (2016) Densified wooden nails for new timber assemblies and restoration works: a pilot research. *Constr. Build. Mater.* 102: 1084-1092. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.045.
- [4] Cesar Moraes Pereira, M. (2015) Metodologia para estudo da caracterização estrutural de painéis de Madeira Laminada Colada Cruzada. Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, SP, Brasil. 107 p.

1057

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A TIMBER BUILDING FOR APARTMENTS, LIBRARY AND OFFICES IN NORWAY

Manuel Sánchez-Solís¹

¹ Degree of Freedom

Palabras clave / Palavras-chave:

Beech, BIM, LVL timber, Moment connections

Resumen / Resumo:

Degree of Freedom, in collaboration with Helen & Hard architects, have designed a four-storey building containing a library, apartments and offices for a bank in Nord Odal, Norway. Glued laminated timber portal frames, with moment resisting corner connections, are placed radially around a central courtyard giving the building its distinctive circular geometry. Cross-laminated timber panels are used for floor slabs, bearing walls and for the communication and services cores, providing lateral stability to the structure. LVL Baubuche timber is also used to stiffen the library beams. All timber elements are shaped in coordination with the architects and fabricated with openings by means of a fully integrated BIM system.

1. Introduction

The Samling (unification in Norwegian) project stands out for the contrast of a traditional construction material, timber, with a modern design aesthetic. It uses both innovative fabrication techniques and connection details. The geometry, materials and spaces of the building have been treated as a set to define a connection between inwards and outwards, since the intention of the architects is to create a new identity and an initiation for further development in Nord-Odal as shown in Figure 1.



Figure 1. Exterior view of the building (© Helen & Hard)

2. Architectural concept

The objective of the building is to gather literature, knowledge, economy, people, tradition and history under one single roof, which fits with the multiple functions assigned to the building. From the beginning, the design team was aware of the concept that timber, as a construction material, has intrinsic healthy and environmental benefits. When harvested responsibly, wood is arguably one of the best tools architects and engineers have for reducing greenhouse gas emissions and storing carbon in buildings as carbon cycle of timber follows a closed natural loop. In addition, the timber provides a high aesthetic component to the buildings. Therefore, the architects proposed to have visible structural systems.

3. Structural system

The structural system is divided into two different parts. The library area consists of almost 12m high glued-laminated timber portal frames to create an open space under the roof. The frames are partially connected to each other by means of a mezzanine that rests on a cantilevered glulam-LVL mixed double girder system. The corners of the library frames are rigidly connected, which provides lateral stability in their plane. The shape of the beams and columns are optimized according to that behaviour. This structural system is replicated for the offices area where open spaces are requested by the architects. Over this level, a standard 2-storey timber-framed structure is used for the apartments by means of pinned joints between beams and columns which results on simpler connection details. Different arrangements of timber parts are shown in Figure 2.



Figure 2. Building arrangement (©Helen & Hard)

4. Connections

Connections are realized in several different forms depending on the magnitude and type of forces to be transferred, on one hand, and on the required stiffness for the global behaviour of the building, on the other hand. The fastening elements (screws, dowels, bolts or nails) slide inside the timber when transferring forces which results in a specific stiffness for each connection. This slip modulus has an impact on the overall response of the building.

In situations in which rigid solutions are sought, glued parts are often used, such as LVL inserts in the library beams or the embedded bars in the corners of the frames (more innovative solution in this building). The bending moment transfer between both pieces must be guaranteed to ensure the desired behaviour of the structure. Details of these joints can be seen below in Figures 3 and 4.

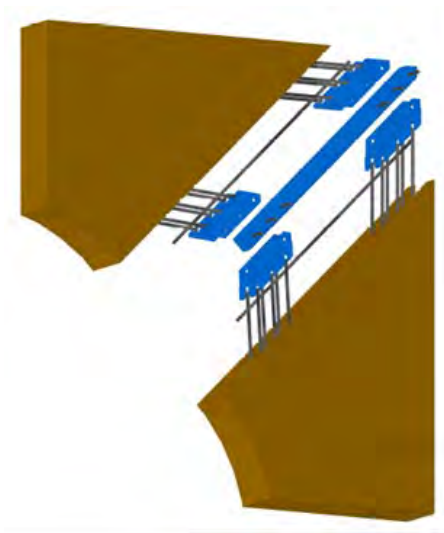


Figure 3. Modelling of moment connection



Figure 4. Final aspect of corner joints (©Emma Sukalic)

5. Conclusions

The design of the Samling project turns out to be innovative, using a traditional material such as timber. The architectural approach is an interesting structural engineering challenge focused mainly on taking care of the connection details between the different pieces.

Acknowledgement

This project was a collaboration with the architects Helen & Hard, Creation Holz, the Municipality of Nord Odal, the main contractor Ø.M. Fjeld and the suppliers of the timber parts, Aaneslands Limtre and Blumer-Lehmann.

1058

DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DEL COEFICIENTE DE ROZAMIENTO DE MADERA MICROLAMINADA DE EUCALIPTO (*EUCALYPTUS GLOBULUS* LABILL.)

José Ramón Villar-García¹; Pablo Vidal-López¹; Desirée Rodríguez-Robles¹; Manuel Moya Ignacio¹; Antonio José Lara Bocanegra²; Almudena Majano Majano²

¹ Universidad Extremadura

² Universidad Politécnica de Madrid

Palabras clave / Palavras-chave:

Fricción, Tribología, Propiedades de la madera, Simulación numérica, Uniones, LVL

Resumen / Resumo:

En este estudio se determinan experimentalmente los coeficientes de rozamiento estáticos y dinámicos en madera microlaminada (LVL por sus siglas en inglés) de *Eucalyptus globulus* Labill. El estudio abarca las dos configuraciones posibles, esto es, todas las láminas que componen el producto con sus fibras en una misma dirección LVL-L, y con dos de ellas en disposición transversal, LVL-T, así como también en las distintas superficies de corte que se pueden originar en las piezas respecto a la orientación de las fibras. Se persigue obtener valores para los distintos pares de rozamiento que se pueden dar en la ejecución de uniones estructurales carpinteras según los planos de corte de las caras enfrentadas. Los valores medios obtenidos globalmente, sin considerar orientaciones, fueron 0.53 para el coeficiente de rozamiento estático y 0.37 para el dinámico, si bien, para los pares que implican superficies de mayor rugosidad, en especial testas, fueron apreciablemente superiores. La madera microlaminada LVL-T presenta algunos valores de rozamiento ligeramente superiores al LVL-L, aunque puede considerarse que ambas oscilan en valores similares. Los resultados obtenidos proporcionan coeficientes realistas para aplicaciones prácticas, en particular para su implementación en simulaciones numéricas, donde los valores de fricción en muchos casos son genéricos o estimados.

1. Introducción

La fricción entre piezas de madera está presente en multitud de sistemas estructurales. Es en la transmisión de fuerzas en uniones entre barras donde cobra especial relevancia, fundamentalmente en el caso de uniones carpinteras. Diversos trabajos [1,2] atestiguan la importancia del conocimiento del coeficiente de rozamiento para una correcta simulación numérica.

La madera microlaminada o LVL por sus siglas en inglés (Laminated Veneer Lumber) es un producto tecnológico derivado de la madera compuesto por varias chapas de madera de espesor usualmente inferior a 6 mm encoladas mediante un adhesivo fenólico. El producto resultante, obtenido en forma de tablero, con una orientación definida de las chapas, presenta unas excelentes propiedades mecánicas y mejora la estabilidad dimensional con respecto a la madera estructural convencional. La disposición de

fibra puede ser de todas las chapas en la misma dirección (LVL-L), o se pueden rotar algunas chapas orientando unas fibras transversalmente a las otras (LVL-T), Figura 1. Además, en una pieza de madera microlaminada podemos diferenciar 3 superficies distintas: tabla, canto y testa.

Las especies de madera generalmente utilizadas en la producción de LVL son el abeto y el pino. También existe en el mercado europeo LVL fabricado a partir de una especie frondosa, concretamente haya (*Fagus sylvatica*), comercializado con el nombre de BauBuche [3]. Se trata de uno de los productos estructurales de madera con mayores prestaciones en el mercado europeo actual.

En España, una de las especies frondosas más abundante es el *Eucalyptus globulus* Labill., con superficie forestal principalmente en Galicia, Asturias, Cantabria y la provincia de Huelva. La madera microlaminada de eucalipto se presenta como una especie alternativa en el sur de Europa al haya centroeuropea por sus también elevadas prestaciones mecánicas. En concreto, la madera libre de defectos de *Eucalyptus globulus* presenta resistencias ligeramente superiores a las del haya y rigideces mayores, además de una buena durabilidad. Por tanto, se estima que el LVL de eucalipto podría alcanzar valores de propiedades mecánicas similares a las del LVL de haya.



Figura 1. Microlaminado de *Eucalyptus globulus* en configuraciones L (abajo) con todas las chapas orientadas en dirección longitudinal y T (arriba) con la tercera chapa desde la parte superior e inferior orientada en dirección transversal.

El coeficiente de rozamiento no se encuentra normalizado dentro de las propiedades mecánicas de la madera, apareciendo únicamente en la Tabla 6.1 de la EN1995-2:2004 (2016) Eurocódigo 5-Parte 2 [4] y solo para madera aserrada de coníferas. Existen estudios previos de los autores sobre rozamiento en madera aserrada y laminada [5–7]. Como investigaciones relevantes en LVL, cabe destacar la realizada por Bejo et al [8] a bajas presiones de contacto en LVL de álamo amarillo, y por Dorn et al [9] a alta presión en LVL de *Picea abies* contra acero.

2. Materiales y métodos

Se emplearon probetas de dimensiones $100 \times 40 \times 25 \text{ mm}^3$. Las probetas fueron acondicionadas en una cámara climática al 12% de humedad. Teniendo en cuenta probetas LVL-L o LVL-T obtenemos 11 pares de rozamiento a ensayar: 1L-1L, 1T-1T, 2L-2L, 2T-2T, 3-3, 1L-2L, 1L-3, 2L-3, 1T-2T, 1T-3, 2T-3, según la siguiente nomenclatura: 1L: Cantos LVL-L; 1T: Cantos LVL-T; 2L: Testas LVL-L; 2T: Testas LVL-T; 3 Tablas con disposición de fibras longitudinal. Se han realizado para cada par de rozamiento 15 ensayos.

A falta de normativa europea para realizar ensayos de rozamiento y tomando como base la normativa americana ASTM G-115-10 [10], los autores desarrollaron un procedimiento de ensayo modificando una máquina de corte directo [11]. La velocidad de rozamiento fue de 8 mm/min y la carga normal de 0.625 MPa.

3. Resultados y discusión

La Figura 2 muestra los gráficos más representativos de variación del coeficiente de rozamiento en función del desplazamiento para los ensayos realizados con pares de rozamiento Testa LVL-T y Tabla (longitudinal).

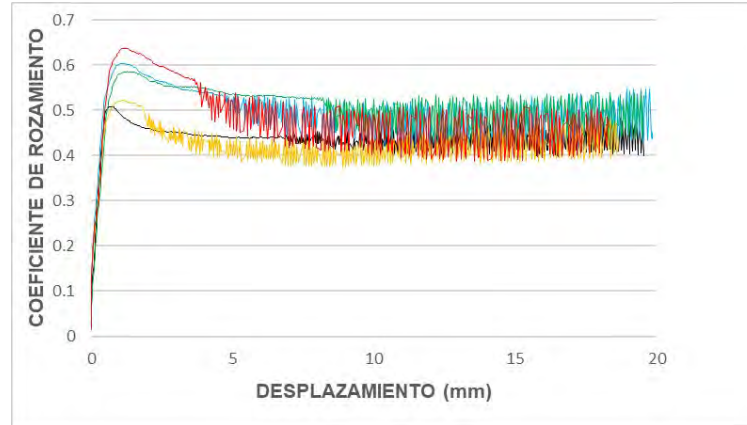


Figura 2. Relaciones entre coeficientes de rozamiento y desplazamientos del par de rozamiento 2T-3.

En la región estática se produce un incremento lineal de la fuerza de fricción hasta alcanzar el punto de “desplazamiento inminente”, a partir del cual se produce una inflexión en la gráfica, cuyo máximo constituye el coeficiente de fricción estático μ_s . Superado el máximo, se produce una disminución de la fuerza necesaria para el deslizamiento y, por tanto, del valor del coeficiente de rozamiento. Se observa la oscilación en el gráfico del fenómeno conocido como stick-slip, también detectado en trabajos previos y por otros autores [12], cuya asíntota inferior es el coeficiente dinámico, μ_k . En la Tabla 1 se muestran los resultados obtenidos para las diferentes combinaciones de rozamiento.

El valor medio global sin considerar orientaciones es de 0.54 para el coeficiente estático y 0.38 para el dinámico, lo que supone valores similares a los de la madera en general. No obstante, para los pares que implican superficies de más rugosidad, testas y cantos, el valor es apreciablemente mayor. Los coeficientes de variación (CoV) disminuyeron ligeramente respecto a la madera aserrada, lo cual podría deberse a la mayor uniformidad de este producto en determinadas caras. La relación μ_k/μ_s alcanzó una media de 0.72, valor cercano al obtenido para madera aserrada o laminada.

Tabla 1. Valores medios de los coeficientes de rozamiento y coeficiente de variación de los ensayos CoV.

		μ_s	CoV	μ_k	CoV	μ_k/μ_s
1L-1L	CANTO-CANTO L	0.45	21.0%	0.36	18.0%	0.80
1T-1T	CANTO-CANTO T	0.48	21.6%	0.35	19.4%	0.73
1L-3	CANTO L-TABLA (long)	0.45	18.2%	0.34	20.0%	0.76
1T-3	CANTO T-TABLA (long)	0.43	22.7%	0.34	24.5%	0.79
2L-2L	TESTA-TESTA L	0.75	31.0%	0.41	9.7%	0.55
2T-2T	TESTA-TESTA T	0.85	15.3%	0.44	8.3%	0.52
2L-3	TESTA L-TABLA (long)	0.51	17.8%	0.38	16.0%	0.75
2T-3	TESTA T-TABLA (long)	0.56	13.8%	0.41	14.8%	0.73
1L-2L	CANTO-TESTA L	0.53	20.9%	0.38	19.1%	0.72
1T-2T	CANTO-TESTA T	0.54	12.4%	0.41	12.3%	0.76
3-3	TABLA-TABLA (long)	0.42	26.7%	0.33	31.9%	0.79
		0.54		0.38		0.72

4. Conclusiones

La madera microlaminada de *Eucalyptus globulus* presenta valores de rozamiento acordes con la madera en general y con los obtenidos por otros autores para este producto realizado con otras especies. Sin embargo, presenta valores ligeramente superiores a la madera aserrada respecto al rozamiento dinámico y aún más significativos en cuanto al estático. La parte con mayor resistencia al deslizamiento es la testa, donde se encuentran los cortes de madera transversales a la dirección de fibra, seguida del canto y por último las superficies de tabla, que ofrecen los coeficientes de rozamiento más bajos. La madera microlaminada LVL-T alcanza algunos valores de rozamiento superiores al LVL-L, aunque de manera tan leve que pueden considerarse similares.

Agradecimientos

Este trabajo es parte del proyecto de I+D+i PID2020-112954RA-I00, financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033.

Referencias

- [1] Villar-García, J.R.; Crespo, J.; Moya, M.; Guaita, M. (2018) Experimental and numerical studies of the stress state at the reverse step joint in heavy timber trusses. *Mater. Struct.*, 51, 17, doi:10.1617/s11527-018-1144-9.
- [2] Koch, H.; Eisenhut, L.; Seim, W. (2013) Multi-mode failure of form-fitting timber connections – Experimental and numerical studies on the tapered tenon joint. *Eng. Struct.*, 48, 727–738, doi:10.1016/j.engstruct.2012.12.002.
- [3] Pollmeier, <https://www.pollmeier.com/baubuche/>
- [4] European standard (2016) EN 1995-2:2016 Eurocode 5 : Design of timber structures - Part. 2. Bridges; European Committee for Standardisation (CEN), Brussels, Belgium.
- [5] Villar-García, J.R.; Vidal-López, P.; Rodríguez-Robles, D.; Moya Ignacio, M. (2022) Friction Coefficients of Chestnut (*Castanea sativa* Mill.) Sawn Timber for Numerical Simulation of Timber Joints. *Forests*, 13, doi:10.3390/f13071078.
- [6] Villar-García, J.R.; Vidal-López, P.; Corbacho, A.J.; Moya, M. (2020) Determination of the friction coefficients of chestnut (*Castanea sativa* Mill.) sawn timber. *Int. Agrophysics*, 34, 65–77, doi:10.31545/intagr/112270.
- [7] Crespo, J.; Majano-Majano, A.; Lara-Bocanegra, A.J.; Guaita, M. (2020) Mechanical properties of small clear specimens of *Eucalyptus globulus* Labill. *Materials*, 13, 906, doi: 10.3390/ma13040906.
- [8] Bejo, L.; Lang, E.M.; Fodor, T. (2000) Friction coefficients of wood-based structural composites. *For. Prod. J.*, 50, 39–43.
- [9] Dorn, M.; Habrova, K.; Koubek, R.; Serrano, E. (2021) Determination of coefficients of friction for laminated veneer lumber on steel under high pressure loads. *Friction*, 9, 367–379, doi:10.1007/s40544-020-0377-0.
- [10] ASTM International ASTM G115-10 (2018) Standard Guide for Measuring and Reporting Friction Coefficients; Am. Soc. Testing Materials: West Conshohocken, PA, USA.
- [11] Villar García, J.R.; Vidal López, P. y; Moya Ignacio, M. Device to perform friction tests between solid bodies. *Utility Model U 201932027* 2020.
- [12] Berman, A.D.; Ducker, W.A.; Israelachvili, J.N. (1996) Experimental and Theoretical Investigations of Stick-Slip Friction Mechanisms. In *Physics of Sliding Friction*; Persson, B.N.J., Tosatti, E., Eds.; Springer Netherlands: Dordrecht; pp. 51–67 ISBN 978-94-015-8705-1.

1059

DETERMINATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF EUROPEAN OAK ROUNDWOOD SPECIES FOR STRUCTURAL PURPOSES

Kay-Uwe Schober¹; Franka Brüchert²; Maximilian Leonhard Müller¹; Udo Hans Sauter²

¹ Mainz University of Applied Sciences, Timber and Plastics Research Group, Mainz, Germany

² FVA Forest Research Institute of Baden-Württemberg, Freiburg, Germany

Palabras clave / Palavras-chave:

Bending strength, Non-destructive testing, Small-diameter logs, Visual grading, Wood density, Quercus petraea

Resumen / Resumo:

In most European countries, small-diameter oaks are not considered for structural use. The basis for structural use and design are the knowledge of the specific mechanical properties and the understanding of performance influencing factors like wood defects, moisture content and density distribution. Oak logs of *Q. petraea* (Matt.) Liebl. have been investigated with respect to use for construction purposes. As design codes and standards lack of direct classification for roundwood for construction purposes, the characterization of the raw material in this project has been done by visual quality assessment, complemented by the physical determination of the characteristic strength and stiffness values. Wood density and their variation along the specimen length and over the entire cross-section, the moisture content, internal and external wood defects and the roundwood geometry were measured by non-destructive and destructive methods. Additionally, dynamic and static modulus of elasticity and modulus of rupture were determined for log characterisation. The results show that strength and stiffness properties are affected by the moisture content and the underlying morphological stem features of green oak. The results were in line with similar tests on softwood logs and other studies comparing destructive and non-destructive mechanical characterisation methods for roundwood. Among the investigated predictors for the mechanical characteristics, oven-dry wood density and log dynamic modulus of elasticity showed the best correlation with strength. A further improvement in strength prediction will allow strength grading for efficient utilization of small-diameter roundwood oaks in a subsequent study and prepare them as load-bearing members in timber structures.

1. Introduction

The research project GREEN OAK BUILDING aimed on making small-diameter oak logs with diameters up to 250 mm available as structural timber members, e. g. for columns, frameworks and agricultural buildings, like barns. For this purpose, the mechanical properties of such logs and the factors influencing them must be determined, as such structural members in “natural form” have only been insufficiently investigated so far. Most of the previous studies on strength properties have been conducted on sawn softwood, since softwoods have been used much more frequently for load-bearing structures than hardwoods in recent decades due to their straightness and

easier to predict mechanical properties. To obtain the required data for comprehensive characterisation of the raw material, the research tasks were split up into non-destructive investigations, undertaken in Freiburg, Baden-Württemberg [1], and determination of strength and stiffness by destructive testing, carried out in Mainz, Rhineland-Palatinate [2]. The research results of both interdependent investigations on small-diameter oak logs (*Quercus petraea*) shall serve to upgrade the potential of this currently in Germany unused forestry resource as a local source building material for rural areas.

2. Characterisation of the Raw Material

2.1. Material and methods

210 oak logs with a length of 5 m and an average mid diameter of about 25 cm were sampled from one stand at age of app. 90 years. The trees have developed from stump sprouts. The logs were divided into 3 subsamples ($n = 70$ each) of which 2 were used to facilitate the measuring process. From these subsamples, 80 logs were debarked, 30 logs were edged on two sides and 30 logs were edged on four sides. Debarking was executed for faster drying, edging for a simplified construction geometry (Figure 1, left). In the experimental program, green density distribution and internal knot features of the logs were determined by computed tomography scans (MiCROTEC® CT.LOG, (Figure 1, middle). Dry wood density was measured on 2×1 cm small clear wood samples, which were taken in four radial directions from a ~ 2 cm thick log disc from the top end of the log (Figure 1, right). The samples were dried to constant weight at 103°C , followed by immersion weighing. In conjunction with the mass measurement of the log at all phases of the test programme, we were able to determine the moisture content of the logs at earlier points in time as well. External wood defects, i.e. knots, were investigated by visual log grading according to the German Framework Agreement for Timber Trade (RVR) [3].



Figure 1. Debarked samples (left), measurement of log density and geometry (middle) and density distribution on a log disc (right).

2.2. Results

Round wood grading according to RVR show that most logs were graded in quality class C, which represents intermediate quality logs characterised by a large number of small to medium sized knots, the presence of curvature and other features. Mean number of externally visible knots and burls per log was $24.9 (\pm 17.9)$ and mean curvature was $1.7 \% (\pm 0.8 \%)$, with multiple curvatures occurring frequently. Wood density in oven-dry condition (4720 samples, Figure 2, left) was within the range found for oak in the literature [4]. Moisture content in fresh condition was on average at 66.8% , probably due to the very dry weather conditions over the last years. The logs dried to an average moisture content of 35.4% within ~ 20 months (for example 70 logs from sub-sample 2, Figure 2, middle) until the testing programme

terminated with destructive testing. Dynamic modulus of elasticity ranged from 5,481 MPa to 18,754 MPa (median 12,070 MPa) for all logs. For a better interpretation of the results, the internal knot structures of the logs have been taken into account. All knot features in CT scans of five logs were manually annotated (over 10,000 polygons in total) and categorised (Figure 2, right). A machine-learning algorithm was trained with these data to develop an automated knot detection procedure for knot segmentation from the CT data. Due to the accuracy achieved, stronger correlations between knot architecture and their strength is expected; investigations on this are still in progress.

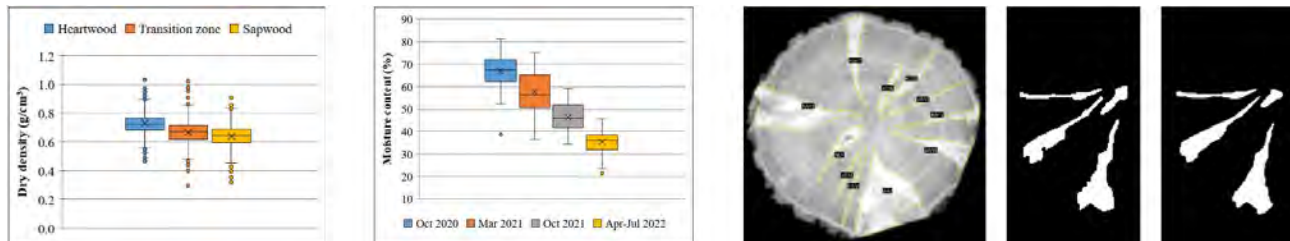


Figure 2. Dry wood density (left), moisture content over time (middle), manual and AI-segmented knot features in a CT slice (right).

3. Log Bending Tests for Determination of Strength and Stiffness

3.1. Material and methods

At the test facility, each log was weighed and measured and the slope of grain was recorded. The experimental program consisted of 4-point-bending tests following DIN EN 14251 [5] (Figure 3 left). Due to varying shape and diameters at tip and butt and distortions, special support devices have been custom made to address the irregular geometries (Figure 3 middle). First, non-destructive evaluation measurement was taken on each log while it was simply supported at the ends. The specimen were loaded up to a third of the failure load according to a preliminary design, then unloaded and the MOE was determined from measuring the incremental deformation 60 s after the first load level was applied. The deflections at midspan, near loading and at the supports were obtained with a linear variable displacement transducer and laser sensors. After testing, a 50 mm thick disc was removed from an area close to the location of failure to determine moisture content and the specific wood density as well as oven-dry density and moisture content at failure location. The surface envelope of each log has been digital recorded to calculate the cross-section data (Figure 3 right). The MOR was calculated according to [5] with the horizontal and vertical diameter at point of failure, the maximum load and distance between load head and nearest support. The MOE was determined from the incremental deformation and applied load linear regression.



Figure 3. Natural spiral growth and load-induced distortion (left), end-grain with support (middle), digitalized cross-section (right)

The green oaks had an average MC of ca. 70% after felling, drying within 20 months to 35% at the time of testing, which is still above the FSP of approximately 25% MC for oak wood [4]. The test series were evaluated statistically and design values have been derived following the “Design assisted by testing” guidelines of EC – Basis of structural design [6].

3.2. Results

The calculated static MOE from testing ranged from 4,360 MPa to 17,211 MPa with an average of 10,059 MPa and a coefficient of variation of 29.3%. The calculated MOR show a more homogenous distribution in the range of 27.39 MPa to 106.69 MPa with an average value of 60.27 MPa, COV = 22.6%. The statistical evaluation of all samples and subsamples shows that both, modulus of elasticity and modulus of rupture were normal distributed over the number of all samples. The variation of around 23% for the fibre parallel bending strength is in line with similar tests executed on softwood and hardwood logs, [4], [7], [8]. Including the MOE in the evaluation, a linear regression dependency can be observed (Figure 4). The mean MOE obtained by destructive tests appears 18% lower than the dynamic MOE measurement. At the time of testing, the MC was still over the FSP. The MC will reduce to 10-12% equilibrium humidity in service class 1. The relationship of oven-dry density to MOR and to MOE could be confirmed as linear (Figure 4). For further investigations, the relevant material properties have been also calculated for SC 1 conditions ($u = 12\%$), as the MC at the time of testing was above FSP for all specimens.

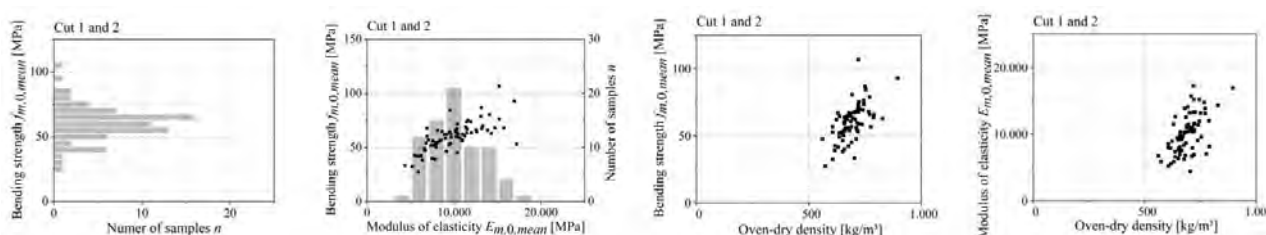


Figure 4. Distribution of MOR for all samples, relation between MOE and MOR, MOR and density, MOE and density

4. CONCLUSIONS

The results of the research show that small-diameter oak logs appear suitable for load-bearing structures. This could be a significant addition to the existing range of applications as fuelwood, since those logs are not considered suitable for high valued use due to curvature, knot distribution or diameter restrictions. The best explanation for the variation in bending strength was obtained by the measurement of the oven-dry density at the top end of the logs, followed by the measurement of the global dynamic modulus of elasticity. A good correlation between flexural strength and stiffness could be observed in the first test series, basis for developing a grading system for round timbers. The moisture content of the logs showed a significant correlation with bending strength, but this relation appears to be coincidental since almost all logs were still above the fibre saturation point at the time of testing. A follow-up study is needed in which logs of at least two nearby sites are sorted and then tested to confirm the flexural properties. These investigations have been started with destructive testing recently and will be expanded by studies of the effects of changing moisture content in logs on strength and stiffness as an aid for further classification and quality control issues. The log curvature in the range found in the test material had no effect on the bending strength, probably because it was

not related to tension wood occurrence. The number of knots and burls quantified in course of external quality grading was weakly correlated with strength. However, the influence of knots is still under evaluation. In particular, innovative machine learning procedures applied to CT scans with respect to internal knot features could lead to a better strength prediction.

Acknowledgement

This project received funding via the Waldklimafonds (WKF) funded by the German Federal Ministry of Food and Agriculture (BMEL) and Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Nuclear Safety and Consumer Protection (BMUV) administrated by the Agency for Renewable Resources (FNR) under grant agreement No. 2218WK18.

References

- [1] Hofmann, N.; Brüchert, F.; Sauter, U.H.; Schober, K.U.; Hörnel-Metzger, B.; Müller, M.L. (2023) Green Oak Building with High-Tech Methods, Part 1: Characterization of the Raw Material. In Proceedings of the 13th World Conference on Timber Engineering (WCTE 2023). June 19-22. Oslo, Norway. Pp. 711-716. doi:10.52202/069179-0097
- [2] Schober, K.U.; Hörnel-Metzger, B.; Müller, M.L.; Hofmann, N.; Brüchert, F.; Sauter, U.H. (2023) Green Oak Building with High-Tech Methods, Part 2: Log Bending Tests for Determination of Strength and Stiffness. In Proceedings of the 13th World Conference on Timber Engineering (WCTE 2023). June 19-22. Oslo, Norway. Pp. 119-125. doi:10.52202/069179-0016
- [3] DFWR; DHWR (2023) Rahmenvereinbarung für den Rohholzhandel in Deutschland (RVR) [German framework agreement for timber trade]. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), Gülzow-Prüzen. Report No. 1.101. 57 p.
- [4] Krpan, J. (1954) Untersuchungen über den Fasersättigungspunkt des Buchen-, Eichen-, Tannen- und Fichtenholzes [Studies on the fibre saturation point of beech, oak, fir and spruce wood]. Holz als Roh- und Werkstoff 12 (3): 84-91.
- [5] DIN EN 14251:2004-04. Structural round timber - Test methods. German Version EN 14251:2003. DIN, Berlin, Germany.
- [6] DIN EN 1990:2021-10. Eurocode: Basis of structural design; German version EN 1990:2002 + A1:2005 + A1:2005/AC:2010, DIN, Berlin, Germany.
- [7] Zangiacomo, A.L. et al. (2013) Avaliação do módulo de elasticidade de peças estruturais roliças e de corpos-de-prova de *Pinus elliottii*. Scientia Forestalis, Piracicaba 41 (98): 283-291, 2013.
- [8] Nocetti, M., Aminti, G., Wessels, C. B., Brunetti, M. (2021) Applying Machine Strength Grading System to Round Timber Used in Hydraulic Engineering Works. Forests 2021, 12(3), 281. <https://doi.org/10.3390/f12030281>.

1060

DIEZ AÑOS DE TRANSFORMACIÓN: AVANCES EN DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN CON MADERA EN LA UNIVERSIDAD DE CIENCIAS APLICADAS DE VIENA - FH CAMPUS WIEN Y SU CRECIENTE COMPROMISO INTERNACIONAL

Aída Santana Sosa¹; Martin Aichholzer¹; Elena Mitrenova¹

¹ FH Campus Wien

Palabras clave / Palavras-chave:

Enseñanza universitaria, Cooperación internacional, Madera maciza industrializada, Materiales biológicos y renovables

Resumen / Resumo:

La Universidad de Ciencias Aplicadas de Viena, FH Campus Wien celebra el décimo aniversario del programa Arquitectura - Green Building, destacando su papel pionero en la formación de profesionales de la construcción sostenible. Desde su inicio, el programa ha integrado materiales biológicos y renovables en el plan de estudios, formando a más de 100 arquitectos colegiados y consolidando su posición en la enseñanza de construcción verde. El Kompetenzzentrum Bauen und Gestalten, centro de investigación de la institución, ha experimentado un crecimiento sustancial, participando en proyectos clave y generando un impacto significativo en la comunidad académica y profesional. Proyectos como "Nach.Plan.Bauen" y "Holzbau 4.0" han marcado hitos significativos, explorando la enseñanza avanzada y la digitalización en la construcción con madera. El proyecto internacional Erasmus+ "HiBiWood" alineó las demandas de la industria de la construcción de madera con la formación académica. El proyecto más reciente de esta entidad, "Sus^Cool" busca fomentar la construcción sostenible con materiales biológicos y renovables a través de un enfoque práctico. Esta International Summer School, actualmente en fase de desarrollo, busca la participación de aquellas entidades interesadas para establecer cooperaciones internacionales de larga duración que fomenten el intercambio conocimientos y experiencias a través de estudiantes y profesionales fomentando así un uso más extendido de la madera en la arquitectura.

1. Introducción

La Universidad de Ciencias Aplicadas de Viena, FH Campus Wien, celebra una década desde la implementación de la enseñanza de Green Building, cuyo programa ha desempeñado un papel fundamental en la formación de profesionales en construcción sostenible y ha consolidado la posición de la institución como precursor en su enseñanza, siendo pionera integrando el uso de materiales biológicos y renovables, en especial la madera, como parte integral del plan de estudios. Iniciado con un programa de licenciatura y seguido con el máster, persigue proporcionar a los estudiantes una perspectiva holística y avanzada sobre el impacto ecológico, económico y social de la arquitectura y la construcción. Con

más de 100 arquitectos colegiados, la enseñanza Green Building ha logrado un impacto significativo en diferentes áreas del sector gracias a su enfoque práctico y sostenible, donde la madera se posiciona como material principal de construcción. El sólido respaldo de la industria y entidades públicas sustenta la viabilidad del programa, cuyo crecimiento se refleja en el aumento en las matrículas de los estudiantes, del personal y en la adquisición de nuevos proyectos de investigación a través del centro de competencia para la investigación “Kompetenzzentrum Bauen und Gestalten” establecido en 2016 y que funciona como motor de innovación contribuyendo al avance de conocimientos que se implementan también de manera paralela en la enseñanza. Éxitos en competiciones de arquitectura y reconocimientos nacionales subrayan la calidad de la enseñanza y de la investigación, fortaleciendo su estructura y proporcionando oportunidades enriquecedoras a través de colaboraciones nacionales e internacionales en torno al uso de materiales biológicos y renovables. Mirando al futuro, participa en conferencias y foros internacionales fomentando el intercambio de experiencias y conocimientos para abarcar desafíos globales de manera local. Mediante su proyecto más reciente y financiado por la municipalidad de Viena (MA23) “Sus^cool”, la FH Campus Wien aspira a construir de manera colaborativa el programa de estudios de una International Summer School, promoviendo un intercambio constante entre estudiantes y profesores, así como la activa difusión de conocimientos y experiencias. El objetivo es fortalecer la colaboración internacional, nutrir la formación de futuros arquitectos e ingenieros especializados en construcción sostenible, y contribuir a la transformación continua del sector.

2. Enseñanza arquitectura - green building

2.1. Licenciatura

El programa de licenciatura en Arquitectura – Green Building ofrece una educación técnica y práctica centrada en los principios de construcción sostenible, tecnologías verdes y eficiencia energética, proporcionando una base sólida para la creación de edificaciones ecológicas y eficientes, poniendo especial énfasis en el estudio de materiales sostenibles. El enfoque holístico del programa incluye la consideración del ciclo de vida completo de un edificio, desde la planificación hasta la demolición, y examina el impacto social y económico de las construcciones en las comunidades locales. Los estudiantes participan en proyectos prácticos, aplicando sus conocimientos en situaciones a escala real y colaborando en equipos para diseñar y ejecutar proyectos sostenibles. Este enfoque integral, combinado con una conciencia ambiental crítica, prepara a los graduados de FH Campus Wien para abordar los desafíos actuales de la construcción sostenible con una comprensión profunda y práctica de los principios fundamentales.

2.2. Master

Con el diseño integral e interdisciplinario como enfoque principal del estudio, los estudiantes de arquitectura e ingeniería exploran de manera grupal y a través de un enfoque práctico, un amplio abanico de temas detalladamente. Esto incluye construcciones modulares, rehabilitación y redensificación, diseño en concordancia con la economía circular, y el uso de materiales biológicos y renovables, en donde la construcción con madera maciza industrializada se desarrolla de manera transversal e interdisciplinaria a lo largo de todo el máster. Los ejercicios prácticos de diseño arquitectónico que realizan los estudiantes se apoyan en clases teóricas que complementan el proceso de planificación, en las que se incluyen estimaciones de huella ecológica, de costos, principios básicos e históricos del diseño sostenible y construcciones en madera de varios pisos. Cabe destacar la participación en concursos internacionales estudiantiles de arquitectura, como los organizados por ProHolz, donde los estudiantes han sido premiados de manera constante año tras

año, siendo destacadas por el jurado internacional las aptitudes técnicas de los estudiantes y la viabilidad de los proyectos presentados. En la Figura 1 se presentan dos participaciones en concursos correspondientes a los años 2019 y 2020. El primero consiste en un proyecto de redensificación mediante la ampliación de pisos sobre un edificio existente [1], mientras que el segundo es un centro escolar [2]. Ambos proyectos se caracterizan por un enfoque modular y un concepto de desmontaje y reutilización de componentes.



Figura 1: Propuesta de ampliación de pisos (2019) y del centro escolar (2020)

3. Investigación y enseñanza

A lo largo de siete años, el centro de investigación, Kompetenzzentrum Bauen und Gestalten, ha crecido de manera sustancial, consolidándose como un referente en investigación y proyectos en construcción y diseño sostenible, cuya participación activa en proyectos de investigación ha pasado de 1 en sus inicios en 2016 a 6 en la actualidad, con un énfasis creciente en proyectos de arquitectura y en el uso de materiales biológicos y renovables, y contando con la colaboración de un número relevante de empresas y entidades públicas. Con un aumento progresivo del personal, de 2 en 2016 a 8 en 2023, el centro ha expandido significativamente sus capacidades, fortaleciendo su impacto en la comunidad académica y profesional, a pesar de su juventud. El enfoque continuo en la generación y difusión de conocimiento se refleja en un constante aumento en el número de publicaciones y participaciones en congresos y conferencias, tanto nacionales como internacionales, así como en su complementación y estrecha relación con la enseñanza. Dentro de este marco, destacan proyectos clave que han marcado hitos significativos y que han desembocado en un creciente compromiso con el intercambio internacional. El proyecto “Nach.Plan.Bauen” [3] permitió sondear las posibilidades de la enseñanza avanzada y específica en paralelo al plan de estudios general de la universidad, en el que se abordaron temas concretos de la construcción sostenible en Austria con una participación representativa de la industria, que se anclaron en la oferta formativa de la institución en forma de módulos de postgrado. Por otro lado, el proyecto “Holzbau 4.0” [4] permitió analizar y profundizar en el sector de la construcción con madera de la mano de expertos tanto en diseño como en construcción, con el objetivo de fomentar la digitalización y la colaboración para el diseño y ejecución de edificios de varios pisos. Posteriormente, a través del proyecto internacional Erasmus+ “HiBiWood” [5], que contó con la colaboración de seis instituciones europeas de cinco países diferentes, se desarrolló un módulo académico internacional que alinea las exigencias de la industria de la construcción de madera con la formación académica universitaria, incluyendo talleres intensivos que se desarrollaron en cooperación y que incentivó el intercambio tanto de estudiantes como de profesores. Estos proyectos han allanado el camino para el proyecto más reciente que enfrenta la institución, “Sus^ACool - International Summer School on Sustainable Design and Circular Constructions from Renewable Materials”.

3.1. Sus^cool

Esta escuela de verano internacional sobre diseño sostenible y construcciones circulares con materiales renovables tiene como objetivo fomentar y ampliar las competencias y la transferencia de conocimientos a nivel internacional en el campo de la construcción sostenible con materiales biológicos y renovables, como fibras y adobe en combinación con madera, basándose en un enfoque práctico que permitirá a los estudiantes construir mockups a escala real de sus proyectos. La International Summer School representa un paso significativo hacia la internacionalización sostenible y a largo plazo de esta institución, estableciendo nuevas colaboraciones y fortaleciendo las existentes, tanto a nivel académico como empresarial, con aquellos países interesados. Esta escuela de verano se concibe como una entidad itinerante que se organizará durante los primeros dos años en Viena, con la posibilidad de ser alojada por universidades asociadas en el futuro. Su objetivo principal es fomentar la participación activa y el intercambio mutuo entre estudiantes y expertos de diversas universidades internacionales, empresas e instituciones de investigación, estableciendo así una comunidad académica y científica que promueva el uso de madera y otros materiales de construcción biobasados, así como prácticas de construcción sostenible mediante enfoques de aprendizaje interdisciplinarios. En esta fase de desarrollo del proyecto, este documento tiene como objetivo estimular la participación de las entidades interesadas, invitándolas a ponerse en contacto con el equipo de trabajo de la universidad y unirse al proyecto.

4. Conclusiones

La FH Campus Wien conmemora diez años de su programa Arquitectura - Green Building, destacando su carácter precursor en la formación de profesionales en construcción sostenible. La institución, pionera al integrar biomateriales y estrategias sostenibles en su currículo, se enfoca especialmente en madera y proporciona una educación técnica y práctica, que a su vez se presenta holística y detallada. Los éxitos en competiciones de arquitectura, reconocimientos nacionales y la participación activa en conferencias resaltan la calidad de la enseñanza y la investigación. El centro de investigación, Kompetenzzentrum Bauen und Gestalten, ha crecido y se ha consolidado como referente en investigación y proyectos sostenibles, colaborando con empresas y entidades públicas. Proyectos clave, como “Nach.Plan.Bauen” y “Holzbau 4.0” definieron aspectos relacionados con la educación continua y con el sector de la construcción con madera de varios pisos, los cuales sentaron las bases del primer proyecto internacional de la entidad a través del programa Erasmus+, “HiBiWood”. Este alineó las demandas de la industria de la construcción en madera con la formación académica universitaria, formando futuros arquitectos e ingenieros dentro del marco europeo en el diseño y construcción con madera en edificios de varias plantas. Estos proyectos han allanado el camino para la iniciativa más reciente que organiza la FH Campus Wien, “Sus^Cool - International Summer School”, que busca ampliar competencias y conocimientos a nivel internacional en el diseño sostenible y las construcciones circulares con materiales renovables. En conclusión, la FH Campus Wien mira al futuro con iniciativas como “Sus^Cool”, aspirando a fortalecer la colaboración internacional, nutrir la formación de futuros profesionales y contribuir a la transformación continua del sector hacia prácticas más sostenibles. En este contexto, se busca la participación activa de entidades interesadas para enriquecer y consolidar estos esfuerzos.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su más sincero agradecimiento a todas las personas que han contribuido al desarrollo de este plan de estudios a lo largo de estos 10 años, permitiendo su evolución desde licenciatura hasta máster y la creación del centro de investigación. Este reconocimiento incluye profesores internos y externos, estudiantes, personal de investigación y administrativo y se extiende a las entidades financiadoras de los proyectos de investigación, y en especial a la municipalidad de Viena (MA23).

Referencias

- [1] Santana-Sosa, A.; Aichholzer, M. (2022) Light up! – International Wood Student Competition for Standard Systems to Vertical Extensions. Renovation, restoration, & rehabilitation of urban buildings using wood-based technologies : Portorož, Slovenia, 6-9 September 2022: book of abstracts. Electronic ed. Izola, Koper: Innorenew CoE; University of Primorska Press (Woodrise 2022), S. 3–5. ISBN 978-961-293-189-6. <https://www.hippocampus.si/ISBN/978-961-293-189-6.pdf>
- [2] Schachenhofer, M.; Aichholzer, M.; Santana-Sosa, A. (2022) Integral planning – potentials and challenges for the construction of timber buildings. A teaching example. APP (Acta Polytechnica CTU Proceedings) 38, S. 402-409. doi.org/10.14311/APP.2022.38.0402
- [3] Santana-Sosa, A.; Aichholzer, M.; Mitrenova, E.; Schachenhofer, M. (2022) Exploring the State of Knowledge and Gaps Regarding Sustainability within Viennese Construction Industry. APP 38, S. 410–416. doi.org/10.14311/APP.2022.38.0410.
- [4] Santana Sosa, A.; Aichholzer, M.; Mitrenova, E.; Kovacic, I. (2023) STATUS QUO OF AUSTRIAN TIMBER CONSTRUCTION SECTOR. Kjell Arne Malo, Anders Q. Nyrud und Kristine Nore: World Conference on Timber Engineering 2023 (WCTE 2023). Oslo, Norway, 19.06.2023 - 22.06.2023, S. 4545–4554. doi.org/10.52202/069179-0592
- [5] Mitrenova, E.; Aichholzer, M.; Santana Sosa, A. (2023) HIBIWOOD - DIDACTIC APPROACHES FOR ACADEMIC EDUCATION ON MULTI-STOREY TIMBER BUILDINGS. Kjell Arne Malo, Anders Q. Nyrud und Kristine Nore: World Conference on Timber Engineering 2023 (WCTE 2023). Oslo, Norway, 19.06.2023 - 22.06.2023, S. 4590–4596. doi.org/10.52202/069179-0598

1061

DISEÑO DE EDIFICACIONES RESIDENCIALES EN ALTURA EN CLT EN EL CONTEXTO CHILENO. LA TORRE PYMELAB-MADERA COMO CASO DE ESTUDIO

Mauricio Vargas Mosqueda¹

¹ Universidad del Bio Bio

Palabras clave / Palavras-chave:

Edificaciones residenciales en altura, Madera Contralaminada (CLT), Diseño para la Manufactura y Ensamblaje (DfMA), Entrega integrada de proyecto (IPD), Chile

Resumen / Resumo:

En la actualidad, las edificaciones residenciales en baja y mediana altura construidas en madera contralaminada (CLT) representan una alternativa importante en términos de productividad y sostenibilidad para la industria de la construcción, ya que son edificaciones con un alto grado de industrialización, desarrolladas en base a madera, la cual es, hoy en día, el único material carbono negativo con el cual es posible construirlas. La industrialización implícita en estas edificaciones exige la racionalización de sus procesos de diseño, tomando en cuenta, desde el inicio, a cada una de las especialidades involucradas. En este contexto, en función del interés de Chile en incursionar en la construcción de estas edificaciones, la investigación tiene como objetivo estudiar sus procesos de diseño y de desarrollo de proyecto en el contexto chileno, así como los procesos de toma de decisiones asociados. Para ello se toma como caso de estudio, la torre PymeLab-Madera, ubicada en el campus de la Universidad del Bio Bio, Chile, la cual es un edificio experimental de cinco pisos, construido en CLT. Dada la naturaleza del problema de investigación, se aplica una metodología asociada a las Ciencias del Diseño (DSR), la cual se enfoca en el desarrollo de soluciones de diseño, con base científica, que permitan resolver problemas del mundo real. Como resultado se obtuvo un Modelo de entrega Integrada de Proyectos que se espera pueda servir de referencia para el diseño y desarrollo de estas edificaciones en el contexto chileno.

1. Introducción

La madera contralaminada (CLT) es un producto de ingeniería en madera masiva que permite la prefabricación a gran escala de edificaciones. Su excelente desempeño, tanto estructural como medioambiental, aunado a su condición industrializada, promete revolucionar la industria de la construcción en general. Una de sus aplicaciones más prometedoras es en la construcción de edificaciones residenciales de baja y media altura, dada su escala sustentable que se integra al hecho de que el CLT constituye hoy en día el único material carbono negativo con el cual es posible construirlas [1]. Para Chile, la construcción de estas edificaciones es de interés general, ya que podrían contribuir significativamente con la reducción del déficit habitacional de manera industrializada y sostenible.

Aunado a esto, el país cuenta con una conocida tradición en la construcción en madera, así como con una sólida industria de productos forestales que facilitarían su construcción. Además, se ha experimentado un crecimiento significativo en el desarrollo de productos de madera masiva, principalmente Glulam y CLT, los cuales constituyen su principal materia prima.

En este contexto, la construcción de estas edificaciones requiere un cambio radical de paradigma hacia la construcción industrializada. Esto implica, entre otros aspectos, la necesidad de adaptarse a nuevos enfoques de diseño y desarrollo de proyectos, que integren a los distintos actores involucrados de manera temprana y colaborativa. Desde este enfoque, son varios los métodos y sistemas desarrollados, como el Diseño Integrado (DI), el Diseño para Fabricación y Ensamblaje (DfMA) y la Entrega Integrada de Proyectos (IPD) [2].

De acuerdo con esto, esta investigación tiene como objetivo estudiar los procesos de diseño y de desarrollo de proyectos asociados a Edificios Residenciales en altura en CLT en el contexto chileno, así como los procesos de toma de decisión involucrados. Para ello se toma como caso de estudio la torre experimental PymeLab-Madera, la cual consta de cinco pisos y se encuentra ubicada en el campus de la Universidad del Bio Bio, en Concepción, Chile (ver figura 1).

2. Materiales y métodos

La investigación parte de la pregunta: ¿Cuáles son las consideraciones de diseño y de desarrollo de proyecto más adecuadas para un edificio residencial de mediana altura en CLT en el contexto chileno? En consecuencia, se aplica una metodología de Investigación en Ciencias del Diseño (DSR) que involucra el desarrollo de soluciones o artefactos para abordar un problema [3,4]. De acuerdo a esto se definieron tres etapas para el desarrollo de la investigación: 1) estudio del problema, 2) desarrollo de la solución y 3) validación. En este sentido el problema se centró en el proceso de diseño de la Torre PymeLa, por lo cual, luego de una etapa previa de preparación y revisión de la literatura científica referencial, se plantea un modelo preliminar de diseño colaborativo y desarrollo del proyecto con un equipo académico adhoc, apoyado en BIM, el cual se fue ajustando a lo largo de todo el proceso (ver figura 2). Durante el desarrollo del diseño y al final de este, se realizaron entrevistas y encuestas a los especialistas involucrados que permitieron mapear el proceso, definiendo etapas, procedimiento y las especialidades relevantes requeridas, lo cual fue luego usado para el desarrollo de un Modelo de Entrega Integrada de Proyecto que podrá ser usado como referencia para futuros procesos de diseño. Por otro lado, el proceso de toma de decisiones fue estudiado, determinando los pesos de cada una de las especialidades involucradas.

2.1. Estudio de caso

Se tomó como caso de estudio la Torre de Madera PymeLab, construida en el campus de la Universidad del Bio Bio, Chile, la cual fue ideada como un laboratorio vivo para el desarrollo y aplicación de diferentes productos o soluciones de innovación para la construcción en madera [5]. El diseño de este edificio fue desarrollado por un equipo multidisciplinario de académicos especialistas en construcción en madera de distintas áreas profesionales como Arquitectura (4 especialistas), Ingeniería estructural (2 especialistas) Ingeniería en Maderas (1 especialista), BIM (2 especialistas), Acústica (1 especialista) Confort higrotérmico (1 especialista) y Diseño industrial (1 especialista), los cuales trabajaron bajo un modelo de diseño colaborativo diseñado ad hoc (ver figura 2).

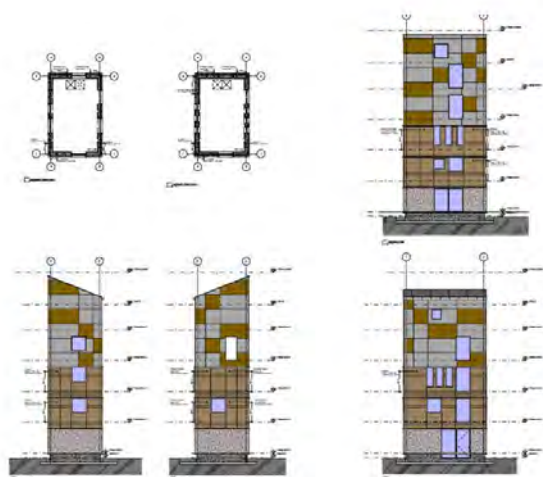


Figura 1. Plantas y alzados. Torre PymeLab

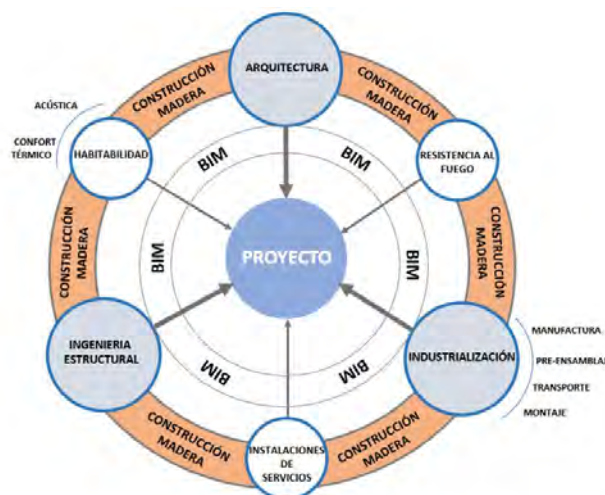


Figura 2. Modelo de diseño colaborativo. Fuente: Elaboración propia

3. Mapeo del proceso y encuestas al equipo de especialistas

Para la definición de las etapas involucradas en el proceso de diseño y de las entradas y salidas esperadas en cada una de ellas, se hizo un seguimiento que fue validado a través de entrevistas constantes a los especialistas involucrados. Esto permitió definir las actividades, requerimientos y productos esperados en cada una fase. Así mismo, se hicieron consultas, a través de encuestas, a los distintos especialistas, que permitieron definir el nivel de participación y el peso de las distintas especialidades en cada una de las tareas y áreas de desarrollo del proyecto. Esto último se hizo de acuerdo a una escala de valoración del 0 al 5, siendo 0=no participa (NP); 1=participación débil (DBL); 2 y 3=participación intermedia(INT) y 5=líder participación (LD) (ver tablas 1 y 2).

4. Resultados y discusión

El diseño de la Torre PymeLa-Madera, resultó ser un proceso complejo que involucra múltiples variables y factores de toma de decisiones. En primer lugar, se hizo necesario garantizar el flujo de información aguas arriba para definir restricciones y condiciones de diseño. El desglosar el proyecto en partes, para la identificación de tareas y áreas de toma de decisiones, resultó ser una buena estrategia para abordarlo de manera eficiente. Esto implicó la definición clara de las partes del proyecto, que podrían desarrollarse de forma integrada y colaborativa por parte de los especialistas implicados, evitando interferencias e iteraciones posteriores que alargarían el proceso. En este sentido las partes del proyecto se identificarán como: 1) Proyecto de arquitectura 2) Proyecto estructural; 3) Proyecto de habitabilidad (confort acústico, confort higrotérmico, seguridad ante el fuego); 4) Proyecto de fachada; 5) Proyecto de techo; 6) Proyecto de terminaciones; 7) Proyectos de instalaciones; 8) Proyecto manufactura; 9) Proyecto de montaje (ver ejemplo en tabla 1). En cada una de estas partes del proyecto, fue necesario definir el nivel de desarrollo esperado, así como las entradas y salidas de especificaciones técnicas y de detalles y los resultados esperados. Esto permitió definir un modelo IPD generalizado, así como una lista de chequeo de tareas, que pueden ser adaptados y aplicados en proyectos específicos. Asimismo se pudo definir preliminarmente el nivel de participación de cada una de las especialidades en cada fase del proyecto (ver figura 3).

Tabla 1. Ejemplo de resultados de ponderación de pesos de toma de decisiones desde la vista arquitectónica.

	ARQUITECTURA							peso individual	ponderación	peso sum	Peso final
	Espec. 1	Espec. 2	Espec. 3	Espec. 4	Espec. 5	Espec. 6	Espec. 7				
PROYECTO ARQUITECTÓNICO											
Programa arquitectónico	5	5	5	5	5	5	5	14.286	500.000	5.000	5
Emplazamiento (Contexto urbano, accesos, orientación solar)	5	5	5	5	5	5	5	14.286	457.143	4.571	5
Espacialidad	5	4	5	4	5	4	5	14.286	457.143	4.571	5
Distribución espacial	5	5	5	5	5	5	5	14.286	500.000	5.000	5
Forma y volumen arquitectónico	5	5	5	5	5	5	5	14.286	500.000	5.000	5
Fenestraciones (ventanas y puertas: aperturas, posición, geometría, tamaño)	5	4	5	4	5	5	5	14.286	471.429	4.714	5
Pisos de altura	5	5	5	4	5	4	5	14.286	442.857	4.429	4
Escalera (forma, geometría, materialidad)	5	3	5	4	5	4	5	14.286	442.857	4.429	4
Sistemas de ventilación natural	5	3	4	2	3	5	5	14.286	365.714	3.657	4
PROYECTO ESTRUCTURAL											
Sistemas estructural y constructivo	5	4	3	4	2	5	4	14.286	365.714	3.657	4
Sistema de prefabricación	4	4	4	4	2	5	5	14.286	400.000	4.000	4
Sistemas de transmisión de cargas horizontales	4	5	0	4	3	4	4	14.286	342.857	3.429	3
Sistemas de transmisión de cargas gravitatorias	4	5	0	3	3	4	4	14.286	342.857	3.429	3
Sistemas de disipación de energía sísmica	2	2	0	3	0	4	4	14.286	214.286	2.143	2
Loses estructurales	5	4	0	3	0	4	3	14.286	271.429	2.714	3
Sistemas de fundación	3	4	0	3	0	4	3	14.286	242.857	2.429	2
Componentes estructurales (Geometría, materialidad, resistencia, peso, costos, otros)	4	3	2	4	3	4	4	14.286	342.857	3.429	3
Conexiones (tipos, ubicación, distanciamiento)	3	4	0	4	1	3	3	14.286	257.143	2.571	3
Resistencia al fuego	4	4	3	4	1	4	5	14.286	357.143	3.571	4
Soluciones de protección por diseño	5	4	5	3	5	5	5	14.286	457.143	4.571	5
Procesos de fabricación de componentes estructurales	3	4	4	3	1	4	3	14.286	314.286	3.143	3
Secuencia de ensamble	2	4	4	3	2	5	3	14.286	328.571	3.286	3
Núcleo de escaleras	5	3	5	3	4	5	3	14.286	400.000	4.000	4

Tabla 2. Ejemplo de resultados de los pesos por especialidad en la toma de decisiones del proyecto de arquitectura.

ITEM	ARQUITECTURA	ESTRUCTURA	HABITABILIDAD	MANUFACTURA	ENSAMBLAJE	INSTALACIONES
Programa arquitectónico	5 (LD)	2 (INT)	2 (INT)	2 (INT)	1 (DEB)	1 (DEB)
Emplazamiento (Contexto urbano, accesos, orientación solar)	5 (LD)	1 (DEB)	3 (INT)	1 (DEB)	1 (DEB)	1 (DEB)
Espacialidad	5 (LD)	1 (DEB)	3 (INT)	3 (INT)	2 (INT)	2 (INT)
Distribución espacial	5 (LD)	2 (INT)	2 (INT)	3 (INT)	1 (DEB)	1 (DEB)
Forma y volumen arquitectónico	5 (LD)	4 (LD)	2 (INT)	4 (LD)	1 (DEB)	1 (DEB)
Fenestraciones (ventanas y puertas: aperturas, posición, geometría, tamaño)	5 (LD)	4 (LD)	3 (INT)	4 (LD)	2 (INT)	2 (INT)
Pisos de altura	4 (LD)	5 (LD)	3 (INT)	4 (LD)	3 (INT)	3 (INT)
Escalera (forma, geometría, materialidad)	4 (LD)	4 (LD)	1 (DEB)	3 (INT)	2 (INT)	2 (INT)
Sistemas de ventilación natural	4 (LD)	1 (DEB)	5 (LD)	1 (DEB)	1 (DEB)	1 (DEB)

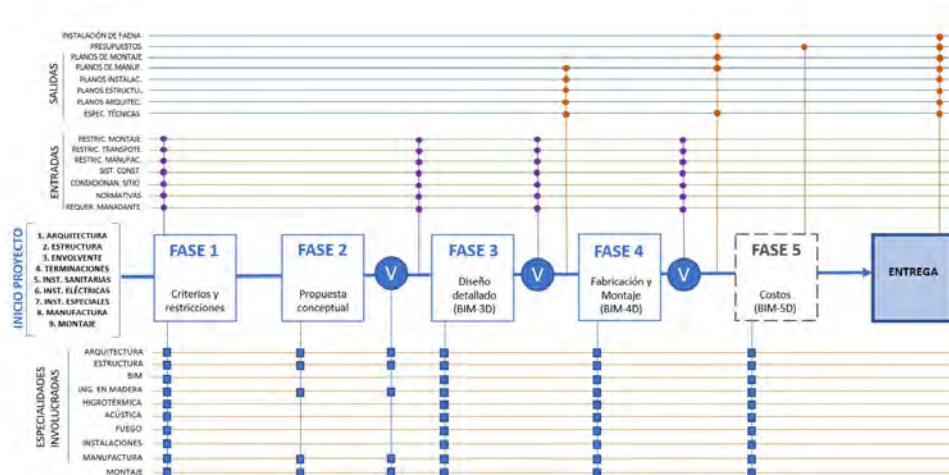


Figura 3. Modelo de IPD para edificaciones residenciales en altura en CLT. Fuente: elaboración propia.

5. Conclusion

La investigación permitió identificar diferentes aspectos implícitos en el proceso de diseño de edificios residenciales en CLT, como el tipo de especialidades involucradas, restricciones de diseño, fases del proceso, partes del edificio, niveles de desarrollo y factores de toma de decisiones. Esto permitió proponer un modelo IPD generalizado que puede usado como referencia y adaptarse preliminarmente en el diseño de futuros edificios similares en el contexto chileno. En esta etapa de desarrollo del modelo, el nivel de eficacia en su aplicación dependerá de la complejidad del proyecto. Sin embargo, el modelo permite que a partir de su aplicación pueda seguir evolucionando.

Referencias

- [1] Smyth, M. A Study of the Viability of Cross Laminated Timber for Residential Construction. B, 2018
- [2] AIA California Council: Integrated Project Delivery: A Guide. The American Intitute of Architects, 2007.
- [3] Van Aken, J.E: Management research based on the paradigm of the design sciences: the quest for field-tested and grounded technological rules: paradigm of the design sciences, Journal of Management Studies, 2004.
- [4] Holmström, Jan, Mikko Ketokivi, and Ari Pekka Hameri. Bridging Practice and Theory: A Design Science Approach. Decision Sciences, 2009
- [5] Rosales V., et al: Associativity between SMEs towards mid-rise building timber construction: PymeLab project. World Conference of Timber Structure 2021, Chile, 2021

1063

DISEÑO DE UN SISTEMA DE UNIÓN MADERA-MADERA ADAPTADO A LA FABRICACIÓN DIGITAL Y SU APLICACIÓN EN LA CONSTRUCCIÓN DE UN MÓDULO ESPACIAL “SÓLO MADERA”

Antonio Jesús De Los Aires Solís¹; Francisco González Quintial¹

¹ EHU-UPV

Palabras clave / Palavras-chave:

CNC de 3 ejes, “Spatial Masterkey”, Sostenibilidad, “Copo de nieve”, Fabricación democratizada

Resumen / Resumo:

En este artículo se describe un sistema de unión espacial madera-madera adaptado a la fabricación digital que ha sido denominado “Spatial Masterkey”. La estereotomía en madera de las uniones entre las diferentes piezas que componen este sistema está inspirada en un puzzle tridimensional llamado “copo de nieve”. El proceso de producción utilizado en el sistema “Spatial Masterkey” se puede llevar a cabo utilizando sólo una fresadora CNC de 3 ejes, una herramienta relativamente asequible y de fácil acceso. Al utilizar la fabricación digital para la ejecución de uniones madera-madera se obtienen varios beneficios, entre ellos, un mecanizado más rápido y una mayor precisión y uniformidad de corte en los productos producidos. Estas ventajas hacen que este sistema de unión sea económicamente competitivo y respetuoso con el medio ambiente. La versatilidad de este nudo espacial para adaptarse en su configuración a una amplia casuística de encuentros entre barras permite resolver un innumerable número de tipos estructurales, entre los que se encuentra el que se desarrolla en esta comunicación, esto es, un módulo estructural espacial.

1. Introducción.

Las uniones son los puntos más conflictivos y de especial interés de una estructura de madera al ser los lugares en los que las barras que constituyen dicha estructura, o bien se hacen necesariamente discontinuas, o bien reducen su sección eficaz [1] debido a la mecanización que ha de producirse en las mismas para conformar las uniones madera-madera.

2. Puzzle tridimensional “copo de nieve”.



Figura 1a. Puzzle montado

Figura 1b. Piezas del puzzle

Existen rompecabezas de madera cuya configuración formal y la singular forma de trabar las piezas que los conforman, los hacen susceptibles de convertirse en elementos capaces de generar conjuntos espaciales complejos.

Es el caso de este “copo de nieve” (figuras 1a y 1b), en el que se ha ajustado su diseño a los requerimientos de la fabricación digital para poder crear el sistema de unión de madera “Spatial Masterkey”.

3. Sistema de unión madera-madera “spatial masterkey”

El sistema de unión Spatial Masterkey [2] -en proceso de concesión de patente- está constituido por un nudo “completo” (figura 2) y por las adaptaciones que del mismo sean necesarias realizar para resolver los encuentros de los conjuntos espaciales de los que formen parte (en cuanto al número y posición de las barras que confluyen en cada uno de los nudos de dichos conjuntos). A este respecto cabe indicar que, en la mayoría de las ocasiones, no se necesita el nudo “completo”. La eliminación de barras supone alterar el equilibrio de la figura inicial, lo cual ha llevado a adaptar formalmente algunas de ellas para garantizar la unidad de la unión. Además, la capacidad resistente de este tipo de uniones se ve disminuida como consecuencia de la reducción de su sección eficaz en el mecanizado, por lo que se ha estimado que el rango de uso del citado nudo será en los tipos estructurales de vector activo [3] con bajas solicitaciones y luces medias (como fachadas o cubiertas no transitables).

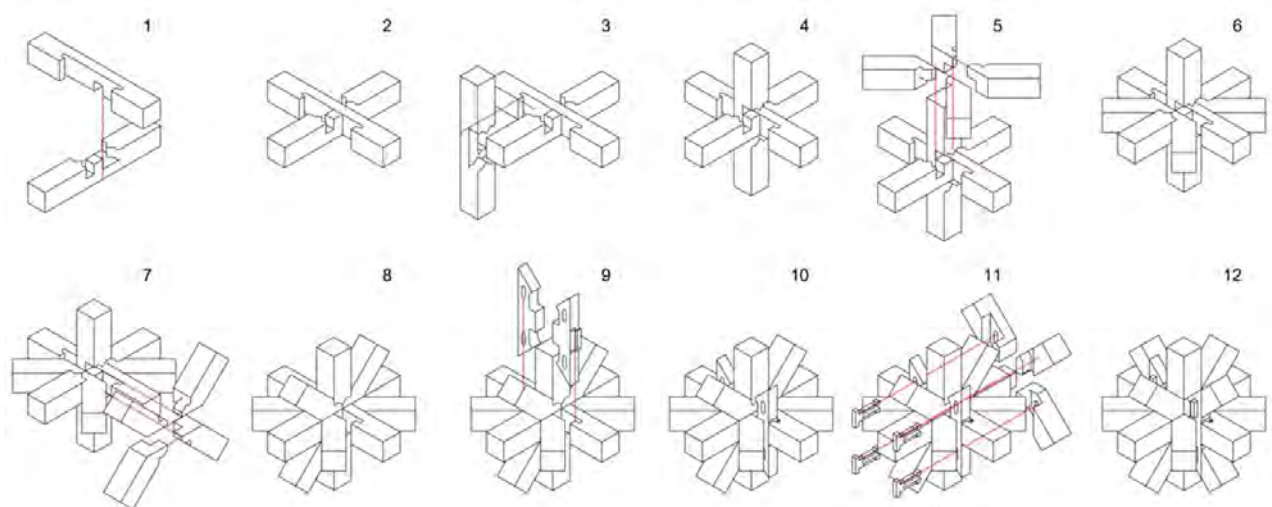


Figura 2. Ensamble paso a paso del sistema “Spatial Masterkey”

4. Consideraciones de diseño para la optimización y para hacer accesible la fabricación del sistema “spatial masterkey”

En el diseño y fabricación del sistema “Spatial Masterkey” se ha seguido un proceso de fabricación digital por los beneficios que aporta en la ejecución de uniones madera-madera (rapidez de mecanización, mayor precisión de corte y uniformidad en los productos producidos).



Figura 3. Trayectorias de corte, proceso de fresado y producto final de una pieza y nudo “completo” del sistema “Spatial Masterkey”

Esto hace que el empleo de este sistema de unión no sólo sea competitivo sino que, también, respetuoso con el medio ambiente ya que las uniones realizadas sólo con madera tienen una huella de carbono muy baja [4]. Para ello se han establecido las siguientes premisas: la primera, emplear medios de fácil acceso a la comunidad tanto por su coste, si se quieren adquirir, como por la facilidad para poder ser fabricadas; en este caso, una fresadora CNC de 3 ejes, y la segunda, diseñar la junta de manera que el mecanizado de cada pieza se realice en una sola operación sin necesidad de suspender el proceso de fabricación para reposicionar las piezas, evitando así posibles imprecisiones y un mayor tiempo de ejecución, lo cual implica que la fresadora CNC de 3 ejes sólo pueda utilizar una única fresa (figura 3).

5. Módulo espacial “sólo madera”

La estructura espacial a realizar a partir del empleo de las adaptaciones del nudo “completo” del sistema “Spatial Masterkey” se va a limitar a un módulo flexible y desmontable, compuesto por piezas de pequeña escuadría -50x50mm- dispuestas en una retícula espacial ortogonal cúbica de 800x800x800mm repetida 3 veces en la dirección de los ejes X e Y y una en la del Z, que se ve complementada por barras diagonales en las 3 direcciones del espacio para arriostar el conjunto y evitar desplazamiento en nudos y barras (buscando la concentración de los vértices de las diagonales en el mínimo número de nudos, ya que con ello se facilita la optimización de los nudos resultantes) (figura 4). Se trataría de una malla espacial coplanaria compuesta por prismas rectangulares con arriostramiento simple en todas las caras de los prismas (sistema estructural de vector activo) [3].

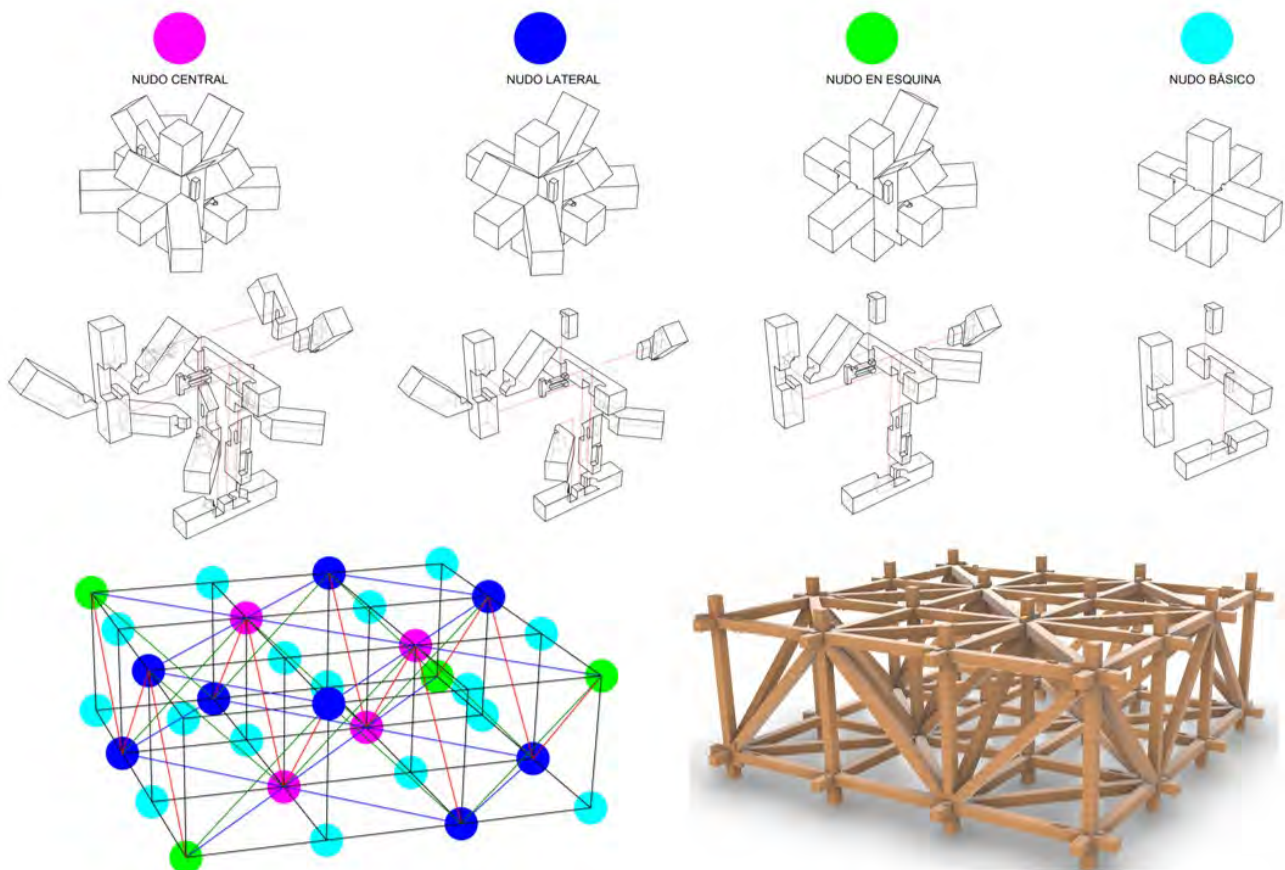


Figura 4. Distintas adaptaciones del nudo “completo” su ubicación en el módulo espacial e imagen renderizada

Referencias

- [1] CTE DB-SE-M (2019). Código Técnico de la Edificación. Documento Básico Seguridad Estructural Madera. Art. 5.2.1
- [2] Antonio Jesús de-los-Aires-Solís, Francisco Gonzalez-Quintial, A wood-wood joining system suitable for digital fabrication and its application in the design of a “wood-only” spatial module, *Frontiers of Architectural Research*, Volume 12, Issue 3, 2023, Pages 523-540, ISSN 2095-2635, <https://doi.org/10.1016/j.foar.2022.12.005>.
- [3] H. Engel, *Sistemas de estructuras. Sistemas estruturais*, Editorial Gustavo Gili, S.L, Barcelona, 2006, p. 157.
- [4] Estadística de CO2 de diferentes materiales.jpg (1685×698), <https://forestaleslatinoamericanos.com/wp-content/uploads/2018/11/estadistica-de-CO2-de-diferentesmateriales.jpg>, (accessed 25 March 2022).

1064

DISEÑO PARA EL DESMONTAJE Y LA ADAPTABILIDAD (DFD Y DFA) EN LA CONSTRUCCIÓN DE MADERA: SITUACIÓN, AVANCES, RETOS Y EJEMPLOS DE APLICACIÓN

David Mañes Navarrete¹; Miguel Redón Santafé²; Ignacio Javier Payá Zaforteza²; Ricardo Candel Gurrea¹; Adrián Sánchez Sevilla¹

¹ Sener Mobility AS

² Universitat Politècnica de Valencia

Palabras clave / Palavras-chave:

Economía circular, Estandarización, Estructuras singulares, Prefabricación, Reutilización, Sostenibilidad

Resumen / Resumo:

El artículo explora la importancia de las estrategias de “Design for Disassembly” (DfD) y “Design for Adaptability” (DfA) en la construcción de madera para promover la sostenibilidad y la economía circular. La construcción es responsable de una parte significativa a nivel mundial de las emisiones de CO₂ y los desechos, lo que hace que la adopción de prácticas de economía circular y reciclaje sea esencial. La economía circular busca extender la vida útil de materiales mientras que el DfD implica planificar la recuperación de materiales durante la demolición o renovación de edificios y el concepto de DfA se centra en evitar la obsolescencia de los edificios y reducir el impacto ambiental y los costos asociados al consumo de recursos y residuos. La madera se presenta como un material sostenible y valioso en la construcción, que por sus propiedades potencia la economía circular, DfD y DfA. Sin embargo, actualmente gran parte de la madera termina en vertederos o incinerada, lo que subraya la importancia de su reutilización y reciclaje. Se resalta la importancia de la normalización y estandarización en estos campos y se discuten las ventajas de la prefabricación en sistemas constructivos de madera. Finalmente, se presentan ejemplos de proyectos de construcción en madera desarrollados en Sener que aplican DfD y DfA, destacando su singularidad y complejidad técnica. Estos proyectos demuestran la viabilidad de aplicar estas estrategias en proyectos reales y avanzar hacia una construcción de madera más sostenible y respetuosa con el medio ambiente.

1. Introducción

El sector de la construcción es responsable de una gran parte de las emisiones de CO₂ a nivel mundial y contribuye significativamente a los vertederos de desechos [1]. La adopción de prácticas de economía circular y el Diseño para el Desmontaje (DfD) son esenciales para reducir el impacto ambiental y promover la sostenibilidad en la construcción. La economía circular busca extender el ciclo

de vida de los materiales y productos a través de la reutilización, reparación, renovación y reciclaje, lo que contrasta con el modelo lineal tradicional. El DfD es un enfoque clave para la economía circular en la construcción, permitiendo la recuperación de productos y materiales durante la demolición o renovación de edificios, minimizando impactos ambientales y maximizando el valor económico. A medida que la madera se destaca como un material más sostenible que el hormigón y el acero, su aplicación en estructuras desmontables diseñadas para la economía circular puede desempeñar un papel crucial en la reducción del impacto ambiental en el sector de la construcción [2]. Sin embargo, actualmente, gran parte de la madera de la construcción y demolición termina siendo incinerada o depositada en vertederos, lo que subraya la importancia de maximizar su reutilización y reciclaje. En este contexto, el DfD se presenta como una estrategia fundamental para la sostenibilidad del sector de la construcción en general, y de la madera en particular.

2. DfD y DfA en estructuras de madera

[3] definió inicialmente el DfD destacando que materiales, componentes y edificios pueden tener varias vidas antes de convertirse en residuos. Propuso cuatro estrategias de reencarnación en el entorno de construcción: reubicación y reutilización de edificios completos, reutilización de componentes en nuevos edificios o en el mismo edificio, reprocesamiento de componentes y materiales en nuevos componentes y reciclaje de materiales en nuevos materiales. Varias investigaciones posteriores han respaldado el marco general de DfD establecido por Crowther y se han centrado en principios de construcción circular aplicados a la construcción de madera. Autores como [4] y [5] han enfatizado la importancia de diseñar para el desmontaje y la adaptabilidad en la construcción circular, mientras que [6] han destacado la relevancia del DfD para la recuperación de componentes reutilizables y [7] sugirieron diseñar edificios con la reutilización en mente para reducir el desperdicio de materiales. En general, aunque el DfD y la construcción circular ofrecen un gran potencial, la aplicación generalizada en la construcción de madera todavía enfrenta desafíos y obstáculos que deben superarse para lograr prácticas de construcción más sostenibles y respetuosas.

El concepto de Diseño para la Adaptabilidad (DfA), introducido por [8], se refiere a una estrategia para evitar la obsolescencia de los edificios y reducir el impacto ambiental y los costos asociados al consumo de recursos y residuos de materiales. El DfA permite que los edificios se transformen y se adapten a diferentes necesidades a lo largo del tiempo, alineándose con la idea de que un edificio verdaderamente sostenible es aquel que permanece en pie y, secundariamente, aquel que puede ser desmontado y reutilizado de manera eficiente. El DfA comparte similitudes estructurales y de diseño con el DfD, ya que ambos implican la planificación de la descomposición de los componentes de un edificio en diferentes etapas de su vida útil. La implementación de estrategias de DfA en edificios existentes que no fueron diseñados con esta filosofía de diseño en mente puede ser un desafío. La transición hacia una economía circular implica la adopción de filosofías como el DfDR y el DfA. Aunque estas filosofías aún no son prácticas comunes, los diseñadores pueden promover la sostenibilidad al diseñar edificios de madera que pueden adaptarse a diversos escenarios futuros. En resumen, la madera, considerada a menudo una alternativa sostenible a materiales como el hormigón y el acero, desempeña un papel fundamental en la consecución de la adaptabilidad en las estructuras.

3. Análisis

La investigación en DfD y DfA ha avanzado gracias a la identificación de principios y guías genéricas aplicables a múltiples enfoques de diseño. Estos principios se han perfeccionado mediante estudios comparativos y revisiones críticas, y se han desarrollado indicadores para evaluar la idoneidad del desmontaje de estructuras. Por ejemplo, [9] compararon criterios de diversas fuentes y concluyeron que los criterios cualitativos para evaluar el DfD no difieren sustancialmente. En conjunto, estas herramientas y enfoques están contribuyendo al avance de los principios de DfD y DfA en proyectos de madera y construcción.

Por otro lado, la prefabricación es un elemento clave en los sistemas constructivos de madera, así como DfD y DfA. La prefabricación ofrece ventajas en términos de reducción de residuos, mejora de la calidad y reducción del tiempo de montaje en el sitio. Además, estas estructuras prefabricadas se prestan bien a los principios de DfD y DfA, lo que facilita la reutilización de componentes y la adaptabilidad de los edificios a lo largo de su ciclo de vida. Sin embargo, existen desafíos, como la automatización y la adaptación a las diferencias regionales en los niveles de prefabricación y los diseños, que requieren soluciones para avanzar en la construcción prefabricada en madera.

En cuanto al tipo de proyectos de madera, queda latente en estudios, como el llevado a cabo por [10], la prevalencia de proyectos residenciales en la construcción de madera, que sigue siendo notable sobre el resto de usos. Se observa una amplia utilización de la madera en proyectos de diferentes programas y alturas, con una tendencia común a utilizar estructuras de madera por encima de la rasante hormigón en la parte subterránea. El uso de sistemas híbridos y la integración de elementos de concreto o acero para mejorar la flexibilidad del diseño son estrategias comunes en proyectos de madera.

Varios autores destacan la importancia de la sostenibilidad y el impacto ambiental en la construcción de madera con enfoque de DfD. [11] enfatizaron la importancia de enfoques holísticos para reducir las emisiones de carbono en edificios residenciales de varios pisos de madera. [12] demostraron la eficacia de estrategias de circularidad y reutilización al resaltar el valor de combinar materiales duraderos reutilizados con enfoques de diseño modular, desmontable y adaptable en proyectos de construcción. Además, [13] estimaron reducciones significativas en la carga ambiental a través de la reutilización de componentes estructurales de madera, especialmente al considerar que la madera es un material neutro en carbono.

La investigación resalta la importancia de la durabilidad en la construcción de madera con un enfoque en el DfD y la economía circular. La durabilidad se define como la capacidad de los componentes para resistir el desmontaje y reutilización repetidos, permitiendo que duren varias vidas útiles de un edificio. Se enfatiza que muchos edificios se demuelen no debido a deficiencias técnicas, sino a problemas de obsolescencia, lo que sugiere una falta de adaptabilidad. También se menciona la importancia de proteger los elementos de madera contra la degradación por organismos como hongos, termitas y otros.

En los últimos años, el potencial de reutilizar madera de estructuras desmontadas ha recibido una atención significativa en la investigación. Aunque la madera recuperada promete ventajas en la construcción, enfrenta desafíos debido a que las normas de calificación y prueba están rezagadas frente a la evolución tecnológica en el ámbito de la madera recuperada. Se requiere con urgencia un marco estandarizado especializado para superar este obstáculo. Diversos estudios han destacado la idoneidad de elementos estructurales de madera recuperada para su reutilización, aunque también se deben abordar desafíos como la detección y el tratamiento de defectos y daños, particularmente en las conexiones desmontables de estructuras de madera recuperada. La investigación resalta la importancia

de estándares de calificación y análisis estructural para madera recuperada, el manejo de propiedades mecánicas y la necesidad de métodos de prueba rápidos y en el sitio para determinar la idoneidad de la madera recuperada. También se ha señalado la importancia de la certificación para promover y adoptar ampliamente la reutilización de materiales en la industria de la construcción de madera.

4. Aplicación en proyectos

Vista esta necesidad y responsabilidad de impulsar la sostenibilidad en la construcción, y dado el potencial tanto desde el punto de vista de huella de carbono como de comportamiento estructural de la madera, se ponen varios ejemplos de estructuras de madera proyectadas desde Sener que permitirían alcanzar estos objetivos.

En primer lugar, uno de los proyectos que tuvo como una de sus premisas el DfD y DfA se trata un centro logístico, con parte de la estructura de madera. Este centro logístico supone uno de los usos no habituales en las construcciones de madera, y que, por ende, constituye algo innovador. En este centro, se planteó una estructura de madera desmontable y adaptable, siendo este uno de los valores añadidos proporcionados al cliente. Cabe destacar que, para conseguir este efecto, se necesitó de una malla estructural regular (8x8m) y una estructura subterránea de hormigón prefabricado también regular. También, se tuvieron que homogeneizar las cimentaciones para adaptarlas a cambios futuros. Además, en este caso, se plantearon sistemas estructurales singulares, mediante sistemas de lámina plegada, que también serían desmontables. La bondad principal de este sistema es que permite utilizar el sistema estructural como acabados de gran calidad. Además, para dicho proyecto, se realizaron comparaciones de distintos sistemas estructurales, en función de las luces, acabados, carbono embebido y precio, presentando valiosas opciones para su elección al cliente.

Otro proyecto digno de mención corresponde a unas oficinas con aspectos singulares en su estructura de madera. En este caso, con el objetivo de concebir estructuras desmontables de madera, aún condicionados por las necesidades de luces relativamente grandes e imposición de cantos reducidos, se llevaron a cabo diseños singulares. Este sistema consiste en una cercha con cordón superior de madera laminada encolada y tirante de acero pretensado, que, además, mediante una unión metálica y articulada con el pilar (pasante), se conseguía una estructura desmontable. Entre dicho cordón inferior y superior se podía realizar el paso de instalaciones. La estructura secundaria se solucionaba mediante paneles de CLT. Para satisfacer las exigencias a vibraciones, se utiliza una capa de compresión también desmontable. Destaca también la cubierta, con forma curva y que también se uniría mediante uniones metálicas y desmontables a los pilares inferiores.

5. Conclusiones

El artículo enfatiza la relevancia de la adopción de estrategias de DfD y DfA en la construcción de madera, mostrando los aspectos más importantes de la situación, avances y retos de estas estrategias y destacando ejemplos concretos de proyectos desarrollados por Sener que aplican estos principios de manera innovadora. Estos proyectos muestran cómo la madera se utiliza de forma eficiente en estructuras desmontables y adaptables, ofreciendo ventajas sostenibles y una huella de carbono reducida. Estos ejemplos concretos demuestran que el DfD y el DfA pueden implementarse exitosamente en proyectos reales y estructuras de madera complejas.

Referencias

- [1] Ahmad, W., Ahmad, A., Ostrowski, K. A., Aslam, F., & Joyklad, P. (2021). A scientometric review of waste material utilization in concrete for sustainable construction. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00683. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00683>
- [2] Fawzy, S., Osman, A. I., Doran, J., & Rooney, D. W. (2020). Strategies for mitigation of climate change: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 18(6), 2069-2094. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01059-w>
- [3] Crowther, P. (1999). DEVELOPING GUIDELINES FOR DESIGNING FOR DECONSTRUCTION.
- [4] Dams, B., Maskell, D., Shea, A., Allen, S., Driesser, M., Kretschmann, T., Walker, P., & Emmitt, S. (2021). A circular construction evaluation framework to promote designing for disassembly and adaptability. *Journal of Cleaner Production*, 316, 128122. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128122>
- [5] Vandamme, E., & Rinke, M. (2023). ADAPTABILITY IN MULTI-STOREY TIMBER BUILDINGS - TOWARDS DIFFERENTIATED DURABILITY LAYERS IN ARCHITECTURE. *World Conference on Timber Engineering (WCTE 2023)*, 3634-3643. <https://doi.org/10.52202/069179-0473>
- [6] Kim, S., & Kim, S.-A. (2023). A design support tool based on building information modeling for design for deconstruction: A graph-based deconstructability assessment approach. *Journal of Cleaner Production*, 383, 135343. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135343>
- [7] Sandin, Y., Mundt-Petersen, O., Linderöth, O., AK-konsult, P., & Sandberg, K. (2022). DIVISION BUILT ENVIRONMENT WOOD CONSTRUCTION TECHNOLOGY.
- [8] Graham, P. (2005), "Design for adaptability – an introduction to the principles and basic strategies", *Environment Design Guide*, pp. 1-9
- [9] Laasonen, S., & Pajunen, S. (2023). Assessment of Load-Bearing Timber Elements for the Design for Disassembly. *Buildings*, 13(7), 1878. <https://doi.org/10.3390/buildings13071878>
- [10] Svatoš-Ražnjević, H., Orozco, L., & Menges, A. (2022). Advanced Timber Construction Industry: A Review of 350 Multi-Storey Timber Projects from 2000–2021. *Buildings*, 12(4), 404. <https://doi.org/10.3390/buildings12040404>
- [11] Morales-Beltran, M., Engür, P., Şişman, Ö. A., & Aykar, G. N. (2023). Redesigning for Disassembly and Carbon Footprint Reduction: Shifting from Reinforced Concrete to Hybrid Timber–Steel Multi-Story Building. *Sustainability*, 15(9), 7273. <https://doi.org/10.3390/su15097273>
- [12] Dams, B., Maskell, D., Shea, A., Allen, S., Driesser, M., Kretschmann, T., Walker, P., & Emmitt, S. (2021). A circular construction evaluation framework to promote designing for disassembly and adaptability. *Journal of Cleaner Production*, 316, 128122. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128122>
- [13] Niu, Y., Rasi, K., Hughes, M., Halme, M., & Fink, G. (2021). Prolonging life cycles of construction materials and combating climate change by cascading: The case of reusing timber in Finland. *Resources, Conservation and Recycling*, 170, 105555. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105555>

1065

DISEÑO Y MODELAMIENTO DE UNA ESTUFA DE BIOMASA VEGETAL PARA MEJORAR LA EFICIENCIA

Miguel David Rojas López¹; Pedro Nel Benjumea Hernández¹; Karem Johana Castro Peláez¹; Helmer Mauricio Foronda Sepulveda¹; Juan Daniel Gereda Amaya¹; Juan David Giraldo Giraldo¹

¹ Universidad Nacional de Colombia

Palabras clave / Palavras-chave:

Eficiencia térmica, Cocina rural, Contaminación, Enfermedades respiratorias

Resumen / Resumo:

Para cocinar alimentos en el sector rural generalmente es usada la estufa de leña, aunque se han desarrollado estufas con nuevas tecnologías como energía y gas, actualmente el uso del recurso maderable como biocombustible se mantiene constante, hasta el punto que la Organización Mundial de la Salud (OMS), afirma que el uso de madera como fuente de calor en estufas tradicionales es de los principales causantes de contaminación atmosférica, causando 3,7 millones de muertes en el 2012 en el mundo, a partir de quemar madera, emitiendo Material Particulado -PM- y gases de efecto invernadero.

Aproximadamente en Colombia, para el año 2013, según DANE -Departamento Administrativo Nacional de Estadística-1,6 millón de familias usaban leña para cocinar, donde 1.4 millones eran familias de zonas rurales y las restantes 200 mil vivían en zonas urbanas. El aporte de PM 2,5 (Material Particulado inferior a 2,5 micras) por parte de la combustión de madera es importante por su impacto a la calidad del aire y el bienestar humano, es decir, son causantes de enfermedades respiratorias como asma, ataques cardíacos no mortales, entre otros, dados a partir de exposición continua de estos materiales.

La propuesta es el diseño de una estufa de menor costo con respecto a las actuales, mejorar el análisis y proponer diferentes alternativas de materiales que se encuentren presentes en el país, además lograr una eficiencia mayor al 20 % realizando un análisis térmico detallado y completo.

1. Introducción

Alrededor de 2.500 millones de personas dependen de diferentes tipos de biomasa como principal combustible utilizados en la calefacción y preparación de alimentos, esto se fundamenta en estudios de la Agencia Internacional de Energía [1]. Las estufas tradicionales carecen de ingeniería de diseño y su ineficiencia representa una mayor demanda de biomasa extraída de los bosques colombianos, emitiendo PM, monóxido de carbono y Alquitrane. Lo anterior genera mortalidad y morbilidad asociadas a enfermedades respiratorias en la población a relacionado a la contaminación del aire en espacios cerrados.

El diseño de estufas eficientes para disminuir el consumo de madera en zonas rurales, viene desarrollando proyectos alrededor del mundo que busca enfrentar esta situación, el uso a creación de estufas eficientes y limpias, como sucede en Perú, México, y otros países de Latinoamérica y el mundo.

2. Marco teórico

En Colombia se realizan diferentes programas y proyectos enfocados en el diseño de estufas de leña eficientes, lo más destacado es en Antioquia, el programa Huellas, quien entrega estufas eficientes y huertos leñeros a campesinos. Según el programa de estufas eficientes, entregó en el año 2014, 18.500 unidades.

Las características de las estufas se definen como son sistemas contruidos con diferentes tipos de ladrillos y herrajes, que tiene paredes internas que no permiten el sobrecalentamiento exterior. Tienen una compuerta por donde se suministra la leña en forma manual, en tamaños de 40 cm., aproximadamente, la cual permanece cerrada durante el proceso de combustión. Además, cuenta con compuertas metálicas para evacuar la ceniza originada en la quema de la leña y el hollín producido por el humo en la chimenea. Tiene un orificio aireador por medio del cual se proporciona el oxígeno requerido para la combustión y se regula de acuerdo con la abertura en la ventanilla metálica, cuenta con un cilindro que hace la función de chimenea, para extraer los gases del interior de la vivienda; además, posee un compartimiento para hornear alimentos, y un recipiente para mantener agua hervida en forma permanente; Las planchas metálicas son las encargadas de soportar los recipientes de cocción que reciben el calor por conducción, con una eficiencia de 12,8% de acuerdo a la Corporación Autónoma regional de los ríos Negro y Nare [2].

2.1.Diseño conceptual

El proceso de diseño base de la estufa, está influenciado directamente por las necesidades reales del usuario final, como el número de puestos, agua caliente, eliminar la contaminación por la quema de madera, humo, entre otras.

Por otra parte, la experiencia compartida del proyecto “Huellas” de Cornare y Corantioquia, y la metodología de diseño AHP-*Analytic Hierarchy Process*, identificar una alternativa de partida “La Institucional cookstoves”, ya que la arquitectura, demuestra uso eficiente de energía.

De lo anterior, y partiendo de la comprensión de los fenómenos físicos de transferencia de energía que ocurren en la estufa, el concepto G10 es modelado por los siguientes parámetros:

- Geometría en forma de L invertida, la cual permite un flujo del aire en serie a los elementos u hornillas.
- La ubicación de hornillas y Contenedor de agua en serie; permiten aprovechar la energía (calor) que el anterior no uso.
- 2 puestos para la cocción de alimento; este planteamiento es base del estudio de campo.

- Contenedor de agua; el cual permite aprovechar el calor excedente de la combustión y resuelve una necesidad identificada para el usuario.
- Fácil acceso para la limpieza del hollín en la chimenea.
- 1 cámara de combustión con acceso independiente.
- Escotillas para el control del aire en el proceso de combustión.
- Ensamble modular, que permita el transporte y fácil instalación en lugares de difícil acceso.
- Estructura ergonómica.
- Ensamble hermético que impida el escape de gases de combustión dentro del domicilio.
- Uso de los fenómenos de transferencia (conducción, convección y radiación) de calor, para construir y realizar un diseño que lleve a una solución eficiente.

2.2.Evaluación social en antioquia

La cocina es el punto de encuentro familiar, significa un vínculo único. Las familias Antioqueñas tradicionalmente usan la cocina como forma de vincular a los integrantes de la familia. [3]. Uno de los objetivos en el diseño de estufas eficientes es evaluar las condiciones sociales que presentan las familias rurales. Con el apoyo de entidades como Cornare y Corantioquia, se analizó las experiencias adquiridas con las diferentes familias en la implementación de las estufas de leña. En general se evidencia un problema base y es que los modelos actuales no se adaptan a las necesidades de la comunidad. Las estufas propuestas tienen un componente ingenieril más profundo si se compara con las tradicionales, pero en algunas familias se detecta que no se usan porque no son eficientes en cuanto al tiempo de encendido, la ergonomía y el mantenimiento de la estufa.

2.3.Norma tecnica

La normativa colombiana en cuanto al diseño de estufas eficientes, se tiene:

NTC-2060: El poder calorífico que debe tener una briqueta para consumo doméstico el cual no puede ser menor a 12,5 MJ/Kg [4]

LEY 697 de 2001 del Congreso de la Republica: Especifica la utilización de la energía, reiterando el uso de esta de la manera más eficiente sin importar la actividad o fin para la cual se disponga [5].

Dado que no existe definición dentro del país que exponga una normativa de una estufa eficiente; se parte de las directivas y especificaciones técnicas estipuladas por la GACC las cuales cubren la Ley 697 como discusión global de la misma.

La GACC clasifica por niveles a una estufa limpia y eficiente [6], así:

- Combustibles que cumplan con el nivel 2 o mayor en eficiencia (Equivalente a una eficiencia térmica mayor o igual al 25%)

- Combustibles con un mínimo de emisiones intradomiciliarias de nivel 3 (Equivalente a $\leq 0,49$ g/min de CO y ≤ 8 g/min de material particulado), se catalogarán como inofensivos para los efectos de la salud.
- Combustibles que para las emisiones globales cumplan como mínimo con el Nivel 3 (Equivalente a ≤ 9 g/MJ de CO y ≤ 168 mg/MJ de material particulado PM 2,5). Las emisiones globales refieren al potencial de impactos ambientales.

2.4. Factores para la estufa de biomasa

Con la prueba de ebullición VITA [7] , para un determinado rango de temperaturas de ebullición de acuerdo a la altura geográfica donde se realiza la prueba. Los parámetros se detallan a continuación y además entre paréntesis se estipula el peso de cada uno de ellos:

- Eficiencia Térmica [%] (0.40): La prueba mencionada, se determina la eficiencia térmica de forma experimental.
- Menor consumo específico [MJ/min/L] (0.25): Con la misma prueba, fue evaluada la cantidad de combustible consumido para llegar al rango de temperaturas de ebullición.
- Capacidad máxima de volumen a calentar [L] (0.10): De acuerdo al diseño y la fabricación se puede disponer de un volumen máximo para los contenedores como las ollas de los alimentos.
- Peso [kg] (0.0833): Nuevamente, con el diseño y la fabricación, cada alternativa tendrá un peso asociado, lo que está directamente relacionado con su portabilidad, es decir, que sea de fácil transporte al lugar de destino.
- Emisiones internas CO [g/min] (0.0833): Esta categoría contempla las emisiones de gases de monóxido de carbono, implícito en la reacción de combustión incompleta, el cual es uno de los gases que afecta la salud humana.
- Emisiones internas PM [mg/min] (0.0833): Para esta categoría fueron medidas las emisiones del material particulado a la salida de la chimenea, generado a partir de la quema del combustible.

2.5. Eficiencia energética

La madera, además de ser un excelente combustible es un asiste al ahorro de energía por sus propiedades como aislante térmico. Sus rasgos higroscópicos, es decir, la capacidad de ajustar la humedad relativa y la temperatura del hábitat forma entornos templados, en los meses cálidos y los fríos. Se calcula que un muro de madera aísla 16 veces más que uno de hormigón.

Estas propiedades permiten que la madera sea un material fundamentalmente apropiado para la construcción de viviendas pasivas, que sigan los principios del modelo *Passivhaus*, el más riguroso y estricto en el ámbito de la eficiencia energética. Para la construcción de tipo de vivienda, cuyo consumo de energía está alrededor de 75 y un 90% menor, es obligatorio, proporcionar un alto nivel de aislamiento en las paredes externas y techo, debido a lo cual la madera es un material optimo [8]

3. Conclusiones

La propuesta para el diseño de la estufa muestra que es viable financieramente, factible técnicamente y socialmente responsable. La Eficiencia térmica alcanzada teóricamente fue del 34%; la reducción de las emisiones intradomiciliarias en más de 95%, e igualmente la Reducción en el consumo de biomasa en un 30% respecto a otros modelos.

La solución a reducir los problemas de salud de la población se puede disminuir significativamente si se logra masificar la implementación del uso de las estufas.

Referencias

- [1] Agencia internacional de Energía -IEA, (2016), visto en: www.iea.org
- [2] Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare “Cornare”, visto en: <https://www.cornare.gov.co>
- [3] Villa, C. y Tobón J. (2017) Categorías asociadas al concepto de familia que construyen los niños y niñas del grado primero de la institución educativa francisco José de caldas sede san Luis Gonzaga, Universidad Tecnológica de Pereira
- [4] Instituto colombiano de normas técnicas-ICONTEC- (2016), visto en: <https://www.icontec.org/>.
- [5] Senado de Colombia (2003), visto en: www.senado.gov.co.
- [6] Clean Cooking Alliance (2016) visto en: <https://cleancooking.org/reports-and-tools/alliance-2016-progress-report>.
- [7] National library of medicine (2016), visto en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8855438>.
- [8] Madera sostenible (2020), visto en: <https://madera-sostenible.com/energia/la-madera-y-la-eficiencia-energetica>.

1066

EDIFICIO TAMANGO: EXPLORACIÓN TIPOLOGICA PARA CONSTRUIR 12 PISOS CON VIVIENDAS DE MADERA EN ZONA SÍSMICA

Gerardo Armanet¹; Juan José Ugarte G²; Sebastián Cárcamo²; Andrés Sierra²; Diego Valdivieso²; Juan José Ugarte A¹.

¹ Tallwood

² Centro Nacional de Excelencia para la Industria de la Madera (CENAMAD), Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile;

Palabras clave / Palavras-chave:

Edificios en altura en madera, Arquitectura en madera, Estructuras híbridas de hormigón y madera

Resumen / Resumo:

El año 2020, Tallwood recibió el encargo de construir un edificio de 12 pisos con un programa mixto -comercial y habitacional- en Coyhaique, que es la puerta de entrada a la Patagonia chilena y uno de los territorios más vírgenes a nivel mundial, pero también una ciudad que tiene uno de los peores índices de contaminación de América Latina y que forma parte de uno de los países con mayor sismicidad del mundo. El presente artículo explica el proceso y la metodología detrás de la solución arquitectónica y estructural para el edificio "Tamango", que hoy cuenta con permiso de obras y se encuentra en la fase final de estudios económicos para iniciar la ejecución de sus 12 pisos de altura y 21.112m², los cuales incluyen 2.806m² para oficinas y comercio en una placa de hormigón armado y 9.528m² para 68 departamentos distribuidos en una estructura híbrida de madera y hormigón armado compuesta de columnas y vigas de LVL, losas compuestas de CLT - hormigón armado y núcleos verticales de hormigón armado.

1. Introducción

Coyhaique es una de las ciudades más australes del mundo, de acuerdo con el censo del año 2017 [1], tiene aproximadamente 57.818 habitantes y está ubicada en la Región de Aysén, donde viven 103.158 personas en 109.024km², lo que resulta en una densidad menor a 1 hab/km², siendo una de las zonas menos pobladas y más prístinas del planeta. Sin embargo, Coyhaique también está dentro de las ciudades más contaminadas de América [2], en junio del 2018 la ciudad alcanzó un índice de 166,8 PM_{2,5}, considerado categoría muy insalubre, esto debido, principalmente a la quema de leña húmeda para calefacción.



Figura 1. Vista aérea de Coyhaique, sin polución en el aire. Fuente: Rakela.

Teniendo en cuenta el contexto antes descrito, dos familias oriundas de la zona contactaron a Tallwood con el interés de dejar un legado en la zona y realizarlo a través de un proyecto inmobiliario sustentable y de construcción eficiente, considerando también el difícil acceso a materiales y mano de obra calificada que hay en la zona.

Las leyes urbanísticas explican algunas decisiones de diseño arquitectónico, por ejemplo: el uso de fachada continua de al menos ocho metros de altura, además de una constructibilidad y altura máximas. La idea de utilizar maderas de ingeniería estuvo desde un comienzo, debiendo lograr valores de obra gruesa competitivos, pero también aprovechando las ventajas de la madera en cuanto a: el uso de un recurso renovable y sustentabilidad, su mayor precisión en la fabricación, su menor peso ($470\text{kg}/\text{m}^3$ vs. $2500\text{kg}/\text{m}^3$) que ayudaría para tener menores fundaciones, mayor velocidad en el montaje en una localidad del extremo sur, y una mayor calidad en las terminaciones.

Así, de acuerdo con el encargo y la altura máxima permitida en el terreno, surgieron las siguientes preguntas y desafíos: ¿Cómo se debe diseñar un edificio de 12 pisos en Coyhaique con estructuras de madera?; ¿Qué tipología estructural es la idónea para este tipo de edificio ubicado en un país sísmico, que albergará viviendas entre los pisos 3 y 12?; ¿cómo se debe diseñar el zócalo o “podio” en hormigón armado o madera, en caso de utilizar estructuras mixtas o híbridas?; ¿Cómo resolver los pisos aéreos compatibilizando hormigón y madera, considerando la normativa sísmica de Chile?

2. Metodología

Para el desarrollo del diseño de arquitectura, ingeniería y gestión del edificio, se conformó un equipo interdisciplinario de profesionales con larga experiencia en el diseño de proyectos en madera y en el desarrollo de políticas públicas, actividades académicas, e industrias del área. Además, se contó con el apoyo de asesores internacionales de clase mundial desde Finlandia, Eslovaquia, Polonia, Alemania y Canadá.

El diseño inicial consideró requisitos programáticos, normativos y económicos, provenientes de un estudio y pre-diseño anterior desarrollado desde la empresa inmobiliaria -el cliente-, que era necesario mantener. Así, previo a la iteración con diferentes modelos que ayudarían a responder las preguntas que planteaba el proyecto, se establecieron parámetros de diseño base, tanto desde arquitectura, como desde ingeniería, que sirvieron de base y se describen a continuación:

2.1. Parámetros de arquitectura

Desde el punto de vista la forma total del edificio, tras determinar el volumen teórico usando la normativa local que establece zócalo, constructibilidad y altura máxima, el proyecto comenzó sobre la base de un edificio rectangular alargado -de solo 4 esquinas- sobre una plaza comercial, sobre el cual se trabajó con los siguientes parámetros: características de la placa comercial; concepto de la torre de seis esquinas; caras superiores inclinadas.

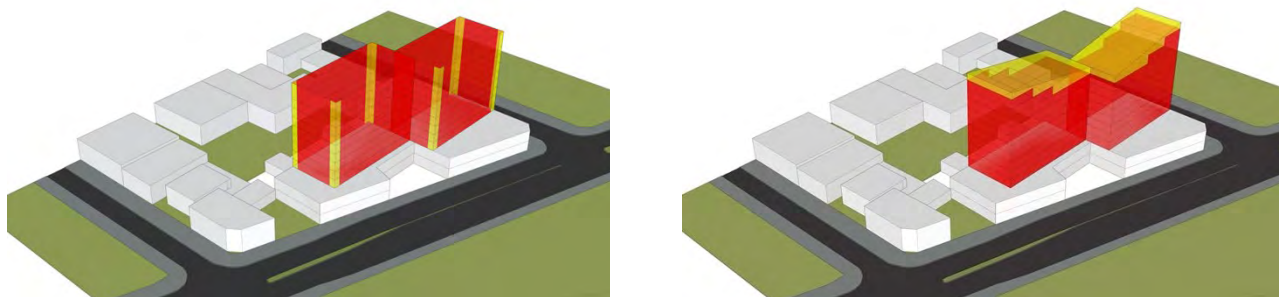


Figura 2. Decisiones de diseño de arquitectura para la torre de 12 pisos de madera. Fuente: Tallwood.

2.2. Parámetros de ingeniería

Tomando en consideración los requisitos indicados en la norma sísmica chilena, basándose en las diferentes tipologías constructivas y estructurales [3] que han sido parte del crecimiento de este tipo de edificios a nivel global [4], fueron adoptados los siguientes criterios generales: Primeros dos pisos de hormigón armado; Núcleos verticales de hormigón armado; Pisos aéreos de postes y vigas de madera y losas compuestas CLT - hormigón armado.

2.3. Parámetros de otras especialidades

De entre las de 30 especialidades involucradas, se utilizaron criterios especiales para lo siguiente: resistencia al Fuego; desempeño acústico y desempeño térmico, que incidieron directamente en la arquitectura y estructura del edificio.

3. Etapas y resultados

Una vez acordados los criterios esenciales antes descritos y habiendo realizado una serie de evaluaciones económicas preliminares, cumpliendo con requisitos inmobiliarios precisos, se inició la fase de diseño que incorporó todas las nuevas necesidades. Se consideró especialmente la recurrencia sísmica de Coyhaique, con un promedio de 7 sismos grado 7 cada 40 años, razón por la cual el desafío del edificio Tamango era único en la combinación de requisitos inmobiliarios preexistentes, con estructuras de madera de ingeniería para edificios altos, en una zona de alto riesgo sísmico. Así, durante el desarrollo del proyecto de hicieron diferentes iteraciones del programa arquitectónico y los elementos estructurales, siendo tres las principales: “Paredes de clt + 2 núcleos de hormigón armado”; “Columnas y vigas de LVL + fachada con diagonales + 2 núcleos de hormigón armado; columnas y vigas lvi + 3 núcleos de hormigón armado + junta de dilatación.



Figura 3. Versiones con núcleo de hormigón (azul), muros de CLT (naranja) y postes-vigas de LVL (rosado). Fuente: Tallwood.

4. Conclusiones

El edificio Tamango, de acuerdo con la versión final de lo entregado para licitación a empresas constructoras y obtención del Permiso de Edificación, tiene las siguientes características:

Tabla 1. Programa arquitectónico y superficies del proyecto.

Programa	Superficie
Superficie total del proyecto, con programa y estructura mixtos.	21.112 m ²
Tres pisos subterráneos, con 220 estacionamientos, 95 bodegas y equipo técnico del edificio.	8.778 m ²
Zócalo de dos pisos, con comercio y oficinas.	2.806m ²
Torre de diez pisos -entre el 3° y 12°-, que alberga 68 departamentos, de entre 90 y 140 m ²	9.528m ²

Considerando el volumen sobre el nivel del terreno natural, la estructura de madera tiene las siguientes características:

Tabla 2. Características del edificio relacionadas con el tema de este artículo.

Material de la Estructura	Superficie
Superficie total del proyecto (100% sobre el nivel natural de terreno).	12.334m ²
Estructura de Madera -CLT, LVL- (60%)	7.272m ²
Estructura de Hormigón Armado (35%)	4.370m ²
Estructura de Acero -terrazas- (5%)	692m ²
Elementos	Cantidad
Elementos de LVL -vigas y columnas-	2.446
Elementos de CLT -losas-	624
Conectores metálicos	6.141
Tornillos	339.417

La experiencia de Tamango también deja muchas posibilidades de mejora para nuevas soluciones constructivas y, al mismo tiempo, puede ayudar a mejorar las normativas locales, incorporando materiales nuevos para Chile.



Figura 4. Imágenes del “gemelo digital” BIM y del render con la vista exterior del edificio. Fuente: Tallwood.

Referencias

- [1] Instituto Nacional de Estadísticas (2017): Resultados definitivos Censo, Santiago de Chile.
- [2] IQAir (2019): New air quality data.
- [3] Robert Foster, Thomas Reynolds and Michael Ramage (2016): Proposal for Defining a Tall Timber Building. *Journal of Structural Engineering*.
- [4] Eduardo Wiegand & Michael Ramage (2022): The impact of policy instruments on the first generation of Tall Wood Buildings, *Building Research & Information*, 50:3, 255-275.

1067

EDIFICIOS DE ENTRAMADO DE MADERA DE MEDIA ALTURA Y SU POTENCIAL PARA REDUCIR LOS GEI EN DIFERENTES CLIMAS: EL CASO CHILENO Y SU OBJETIVO DE CARBONO NEUTRALIDAD PARA 2050

Felipe Victorero¹; Waldo Bustamante¹; Mario Ubilla¹

¹ Pontifical Catholic University of Chile, Chile.; School of Architecture,

Palabras clave / Palavras-chave:

Emisiones GEI, Carbón biogénico, Huella de carbono, ACV, Carbono neutralidad

Resumen / Resumo:

Este escrito presenta el análisis de las emisiones de CO₂eq de un edificio de entramado de madera de 6 pisos de altura, en contraposición con un edificio de hormigón armado, en diferentes ciudades y climas de Chile. El estudio busca ser un primer análisis del potencial de reducción de emisiones de CO₂eq al considerar los materiales de la estructura de un edificio de media altura y los efectos de la envolvente en las demandas de calefacción en diferentes climas. Así, en esta materia, los resultados muestran que existe un potencial de interés para los edificios de madera tanto en climas con bajos requerimientos de calefacción, donde las menores emisiones incorporadas presentan un atractivo; como en los con mayores requerimientos de calefacción, donde el mayor aislamiento térmico de los sistemas de madera presenta una oportunidad. Por último, si bien en climas templados las emisiones por calefacción durante la vida útil de un edificio pueden ser más relevantes que las incorporadas; esto puede invertirse en la medida que las matrices energéticas hacen una transición al uso de energías renovables, como es el caso chileno y su proyección de carbono neutralidad al 2050.

1. Introducción

El sector de la construcción es uno de los principales responsables de la crisis del calentamiento global, asociada a los GEI antropogénicos, con casi el 39% de las emisiones mundiales de CO₂eq. Además, cuando desagregamos este porcentaje, nos damos cuenta de que cerca del 11% de las emisiones mundiales de CO₂eq corresponden a la producción de materiales de construcción, como el acero y el cemento; mientras que el 9% de las emisiones al funcionamiento del edificio, y especialmente a la energía necesaria para la calefacción de los espacios [1]. Asimismo, estudios recientes han presentado evidencia de que en 2020 la masa antropogénica habría llegado a ser equivalente a toda la biomasa del planeta; Siendo, aproximadamente el 70% de esta masa antropogénica hormigón y áridos, convirtiéndose en los materiales fabricados por el hombre más abundante en el mundo y de mayor impacto sobre el planeta [2].

En este sentido, qué materiales utilizamos en nuestro entorno construido es de suma importancia, ya que su producción y efectos en el ciclo de vida de un edificio han sido hasta ahora responsables de buena parte de las emisiones antropogénicas de GEI. Algo que también podría extenderse a otros indicadores medioambientales como el uso de energía, la producción de residuos o la contaminación del agua, entre otros. Por ello, investigaciones anteriores han sugerido que la sustitución del uso de acero y hormigón, por materiales de construcción de base biológica, podría ser una respuesta para el actual problema medioambiental del sector de la construcción. Asimismo, propuestas como las de Churquina [3] presentan un escenario en el que los edificios y ciudades de madera maciza podrían no sólo reducir las emisiones de CO₂eq, sino también ayudar a capturarlo del medio ambiente. Convirtiendo las ciudades en almacenes de carbono a largo plazo y promoviendo un sector forestal más sostenible que podría fomentar procesos de reforestación y forestación en todo el mundo, ayudando también a seguir capturando carbono de la atmósfera y eventualmente incluso devolviéndolo bajo la tierra.

Por otro lado, aunque durante las últimas décadas ha habido intentos de reducir las emisiones de GEI del sector de la construcción, éstos han sido insuficientes y se han caracterizado por ser casi exclusivamente impulsados en países desarrollados. Por otro lado, si estos esfuerzos siguen limitándose a los países desarrollados durante las próximas décadas, estos podrían terminar siendo en vano cuando se midan a nivel mundial; esto ya que, aunque se espera que la población mundial aumente cerca de un 20% para 2050, la necesidad de nuevas construcciones para albergarla no se va a concentrar en los países desarrollados, sino en los países en vías de desarrollo donde existen importantes déficits en la materia. En este sentido, la necesidad de nuevas viviendas e infraestructuras, en regiones como Asia, África y América Latina, van a ser decisivas si queremos disminuir las emisiones antropogénicas de GEI del sector construcción y limitar el aumento de la temperatura global por debajo de los 2°C.

En este sentido, los esfuerzos que los países hagan por alcanzar la carbono neutralidad son de suma importancia para combatir las emisiones de GEI y enfrentar la crisis del calentamiento global. Y cuando estos esfuerzos son llevados a cabo por países en vías de desarrollo son aún más importantes, ya que deben adaptar sus sistemas de crecimiento y economías, a modelos no convencionales que no dependan de combustibles fósiles. Por lo tanto, la meta chilena de carbono neutralidad para el 2050, supone un gran esfuerzo y la necesidad de construcción de nuevos paradigmas, especialmente en el ámbito de la construcción; especialmente cuando para lograr esta meta, el país descansa en que el 50% de sus emisiones serán capturadas por sus bosques, el 17% provendría de un sector de la construcción más sustentable, y el 7% de programas de eficiencia energética.

2. El caso chileno

Chile es un país en vías de desarrollo, líder en la región latinoamericana, con una economía estable y sólidas relaciones internacionales. Como ya se mencionó, el país destaca por su compromiso con la reducción de emisiones de carbono, expresado en su hoja de ruta de carbono neutralidad 2050, y que le ha llevado a convertirse en un ejemplo en la región y para muchos otros países. Sin embargo, a pesar de su éxito en la reducción de emisiones en la generación de energía, a través de la masificación de energías renovables (actualmente el 48% del sistema y se espera que crezca hasta el 70% en 2050); fuentes de emisión como el sector de la construcción representan el 30% de la contribución nacional, con una industria muy resistente al cambio y que depende intensamente de los combustibles fósiles para su funcionamiento.

Por otro lado, las características socioeconómicas, diferentes geografías, variadas condiciones climáticas, recursos naturales, junto a muchos otros atributos del contexto chileno; lo vuelven un caso de estudio ideal para la extrapolación de resultados a otros países en vías de desarrollo o incluso desarrollados. Esto destacando aspectos como las necesidades de infraestructura, con un déficit habitacional que ronda las 700.000 viviendas; altos estándares constructivos asociados especialmente a requerimientos por eventos sísmicos; y normativas que apuntan a mejorar la eficiencia energética de las viviendas, vinculados a una variedad de condiciones geográficas y climáticas que consideran zonas desérticas, subtropicales, templadas y frías.

2.1. Edificios de entramado de madera de media altura

Aunque los edificios de entramado de madera de media-alta, comprendidos entre 4 y 6 pisos, son bastante comunes en los países desarrollados, la mayor parte de la construcción en madera chilena se limita a pequeñas casas de dos pisos. Esto puede explicarse por diferentes brechas culturales, técnicas y económicas; aunque a lo largo de las últimas décadas, la industria de la construcción en madera ha crecido significativamente y ha cambiado de forma significativa su oferta. En este sentido, nuevas fábricas robotizadas de marcos de madera industrializada de alta tecnología se han establecido en diferentes partes del país; ofreciendo sistemas de construcción industrializada en madera de alta calidad y precio accesible, que potencialmente podrían ser utilizados para la masificación de edificios de marcos de madera de mediana altura en diferentes ciudades.

Esta investigación pretende ofrecer una primera aproximación a la comparación de las emisiones de CO₂eq de los edificios de entramado de madera de media-alta con las de los edificios tradicionales de hormigón armado tradicionalmente contruidos en el país. Además, también se incluyen en el análisis un caso híbrido de estructura de entramado de madera y núcleo de hormigón armado, ya que, por razones prácticas y comerciales, la industria chilena ha planteado como más adecuado para los primeros proyectos de transición y altos requerimientos estructurales demandados por una normativa enfocada en características sísmo resistentes. Adicionalmente, con el fin de entender el impacto de las emisiones por calefacción y requerimientos de aislamiento térmico por normativa de eficiencia energética, se considera el análisis de cinco ciudades que representan distintos escenarios climáticos, pasando por condiciones cálido-seco, templado y frío.

En cuanto a la cuantificación de las emisiones de CO₂eq de una edificación, en el contexto chileno aún existen muchas brechas para obtener valores específicos de emisiones asociados a un análisis del ciclo de vida completo. Algunas de las más importantes son la falta de datos de emisiones incorporadas de los materiales de construcción locales y de una base de datos del proceso de construcción. Sin embargo, ya que esta investigación sólo pretende dar una primera idea del potencial de los edificios de estructura de madera para ayudar a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en el caso chileno, se han realizado cuatro supuestos para su desarrollo. El primer supuesto considera que la mayor parte de las emisiones de un edificio, en lo que respecta a la selección de materiales, se concentraría en la producción de materiales (de la cuna a la puerta) y en la calefacción del espacio asociada al aislamiento térmico de la envolvente del edificio (energía de funcionamiento). En segundo lugar, dado que no se dispone de bases de datos locales sobre emisiones de materiales, para el análisis se utiliza la herramienta One Click LCA y una base de datos internacional adaptada al contexto local, a pesar de que esto podría presentar algunas diferencias con las emisiones reales. Asimismo, en tercer lugar, considerando los nuevos estándares australianos y neozelandeses de captura permanente del carbón biogénico bajo un modelo $-1/+1$ [4], se considera que el 99,9% del carbón incorporado de la madera no es liberado al fin de vida del edificio. Y, por último, en cuarto lugar, aunque los sistemas

de calefacción y los combustibles podrían variar significativamente entre las distintas ciudades y segmentos sociales; sólo se considera un sistema de calefacción por estufas de resistencia eléctrica, entendiendo que este sistema sigue la tendencia de la industria inmobiliaria en un avance a edificios denominados “full electric”.

2.2.Resultados

Se cuantificaron los materiales de un edificio representativo de seis plantas, considerando una estimación enfocada principalmente en los materiales relevantes para el estudio, como los elementos estructurales y de envoltente. Asimismo, utilizando la herramienta Design Builder y Energy Plus, se simula la calefacción de todo el edificio, para las cuatro orientaciones posibles, con el fin de obtener un consumo energético anual medio representativo. Además, utilizando las emisiones de CO₂eq incorporadas para cada material y las emisiones de energía de calefacción de espacios para un período de vida útil de 60 años, se estimó una emisión parcial de CO₂eq del ciclo de vida para las ciudades de Antofagasta (Koppen, BWn), Santiago (Koppen, Csb), Concepción (Koppen, Csbn) y Punta Arenas (Koppen, Cfc).

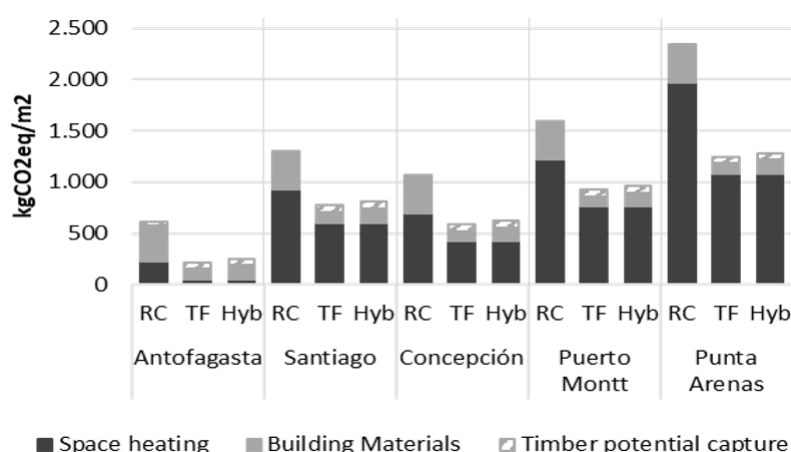


Figura 1. Emisiones de CO₂eq para edificios de hormigón armado, entramado de madera e híbridos de 6 plantas.

3. Conclusiones

Los edificios de entramado de madera tienden a presentar menos emisiones de CO₂eq que los edificios de hormigón armado, esto no sólo es aplicable a los materiales de construcción, sino también a los requisitos de calefacción de espacios asociados a una envoltente térmica más aislada. En este sentido, en climas cálidos como el de Antofagasta, las emisiones generadas por los materiales son más relevantes que la calefacción; mientras que, en climas templados, como Santiago y Concepción, las emisiones generadas por la calefacción tienden a superar las emisiones generadas por los materiales; asimismo, en climas fríos como Punta Arenas, las emisiones generadas por la calefacción son mucho más relevantes.

Lo anterior también significa que, en climas fríos la madera presenta un mayor potencial en la reducción

de emisiones asociadas a la calefacción de espacios. Esto debido a su menor conductividad térmica en comparación a materiales como el hormigón armado y a la posibilidad del sistema constructivo de entramado de incorporar de manera más sencilla aislamiento térmico. Por otra parte, no hay un aumento significativo de las emisiones cuando se comparan los edificios de madera y los edificios híbridos, ya que el núcleo de hormigón armado se limita a una fracción reducida del volumen del edificio y al estar en el interior de este prácticamente no afecta a la calefacción del espacio interior de los departamentos.

Si, es importante destacar que al considerar las emisiones de CO₂eq de calefacción por los 60 años de vida del edificio de manera continua, se está obviando que estas podrían verse reducidas en el tiempo y en la medida que la matriz energética chilena avanza a un 100% de generación renovable. Es más, si sólo consideramos las emisiones de calefacción hasta el año 2050, instancia en la que se espera un 70% a 100% de la matriz eléctrica sea renovable, las emisiones incorporadas de casos templados como el de Santiago y Concepción invierten su tendencia y se vuelven más relevantes que las asociadas a calefacción.

Referencias

- [1] International Energy Agency. (2019). 2019 global status report for buildings and construction.
- [2] Elhacham, E., et al. (2020). Global human-made mass exceeds all living biomass. *Nature* 588, 442–444 (2020).
- [3] Churkina, G., et al. (2020). Buildings as a global carbon sink. *Nature Sustainability*, 3(4), 269-276.
- [4] Ouellet-Plamondon, C., et al. (2023) Carbon footprint assessment of a wood multi-residential building considering biogenic carbon. *Journal of Cleaner Production*.

1068

EFFECTO DE LA PRESENCIA DE HOLGURA EN EL COMPORTAMIENTO AL FUEGO DE UNIONES METÁLICAS OCULTAS PARA ESTRUCTURAS DE MADERA

Laia Haurie Ibarra¹; Sergio Campesino²; Alina Avellaneda¹; Ana Maria Lacasta¹; Pilar Giraldo³

¹ Universitat Politècnica de Catalunya

² Rothoblaas

³ Centre de Ciència i Tecnologia Forestal de Catalunya

Palabras clave / Palavras-chave:

Conexión, Reacción y resistencia al fuego, Carbonización

Resumen / Resumo:

El uso de uniones metálicas en estructuras de madera permite alcanzar elevadas prestaciones mecánicas junto con una ágil puesta en obra. Sin embargo, la presencia de metal puede constituir un punto débil en caso de incendio, debido al rápido calentamiento del metal y la transferencia de calor hacia la madera. Una manera de minimizar el efecto del fuego sobre las conexiones metálicas es protegerlas con madera. Es importante tener en cuenta que durante la ejecución de las conexiones en obra es posible que exista una cierta tolerancia entre las piezas de madera conectadas. En este trabajo se ha realizado un montaje experimental sencillo que permita evaluar el efecto de la temperatura sobre diferentes tipos de uniones de madera. Se han ensayado tres casos del mismo tipo de conexión de viga principal con secundaria con conector metálico oculto, variando la ejecución: en el primer caso se ha preparado una unión protegida con madera sin holgura, en el segundo se ha dejado una holgura de 4 mm y en el tercero se ha añadido una barrera intumescente para cubrir la holgura de 5mm. Los tres tipos de unión se han sometido a la misma fuente de calor y se ha registrado la evolución de las temperaturas con el tiempo. Los resultados del ensayo han puesto de manifiesto la influencia de la holgura en el aumento de temperatura en la conexión metálica y la mayor pérdida de sección de madera.

1. Introducción

Las uniones metálicas para estructuras de madera presentan versatilidad y una elevada capacidad de soportar cargas. Sin embargo, en caso de incendio pueden convertirse en un punto débil ya que el aumento de temperatura del metal provocará variaciones en las propiedades mecánicas del propio elemento metálico, y una transmisión de temperatura a la madera que puede contribuir a aumentar su velocidad de carbonización [1]. Por este motivo una solución habitual es la protección de las conexiones metálicas con madera. Estudios recientes destacan la disminución de la resistencia al fuego que puede producirse en conexiones ocultas si existen holguras a partir de 3 mm [2]. Estos espacios vacíos en la

conexión de dos vigas de madera pueden producirse, por ejemplo, durante la puesta en obra de la estructura. En este estudio se ha diseñado un ensayo de fácil montaje para poder evaluar el efecto de la holgura en el comportamiento frente a la temperatura de una conexión oculta y también si las cintas intumescentes permiten contrarrestar la posible influencia negativa de las holguras.

2. Diseño experimental

Se ha utilizado madera laminada de abeto GL24H para realizar tres casos de conexiones de viga principal con secundaria con conector oculto LockT de la empresa Rothoblaas. En uno de los casos la protección madera-madera no presentaba holgura, en otro se ha ejecutado la conexión con una holgura de 4mm y en el último se ha considerado una holgura de 5mm, pero se ha añadido en el perímetro una cinta intumescente Fire Stripe Graphite de Rothoblaas. La Figura 1 muestra las tres conexiones, a: sin holgura, b: con 4mm de holgura, c: con 5mm de holgura y cinta intumescente.

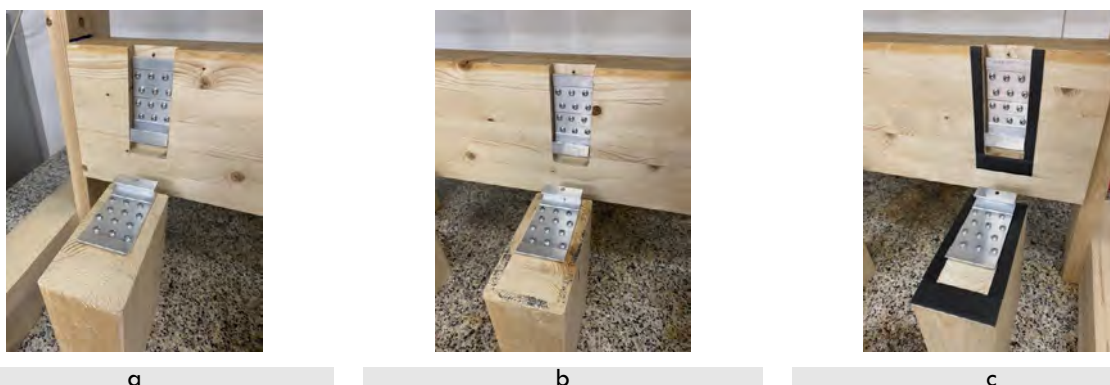


Figura 1. Conexiones antes del ensayo, a: sin holgura, b: 4mm holgura, c: 5 mm holgura y cinta intumescente

El ensayo ha consistido en aplicar una llama directa con un bunsen sobre la zona de unión de las dos vigas y registrar las temperaturas en la llama y en dos puntos de la conexión, en la zona de unión madera-madera y en la zona de la unión metálica. La Figura 2 muestra la posición de los termopares en las conexiones y la Figura 3 el montaje al inicio del ensayo.



Figura 2. Posición de los termopares en la conexión, uno en la zona de madera-madera y otro sobre la placa metálica



Figura 3. Montaje para el ensayo de las conexiones frente a la temperatura

3. Resultados

La temperatura de la llama durante los 40 minutos de ensayo se ha mantenido entre 850 y 1000°C en todos los casos. La Figura 4 muestra, en la imagen izquierda, la evolución de las temperaturas registradas en el termopar en la zona madera-madera de la zona inferior de la conexión. En la imagen derecha de la Figura 4 se presenta el aumento de las temperaturas en la conexión metálica durante el ensayo. La presencia de una holgura de 4 mm sin proteger, en la unión oculta provoca un calentamiento del metal del conector de más de 250 °C en comparación con la unión oculta ejecutada sin tolerancias. Así mismo, la temperatura en la zona madera-madera es superior durante todo el ensayo para la unión con holgura sin proteger. La adición de una banda de protección mediante cinta intumescente Fire Stripe Graphite resulta efectiva para evitar el aumento de temperaturas tanto en la zona madera-madera como en el conector metálico e incluso consigue que la evolución de las temperaturas sea más baja que para la conexión oculta sin holgura, tal y como se observa en la Figura 4.

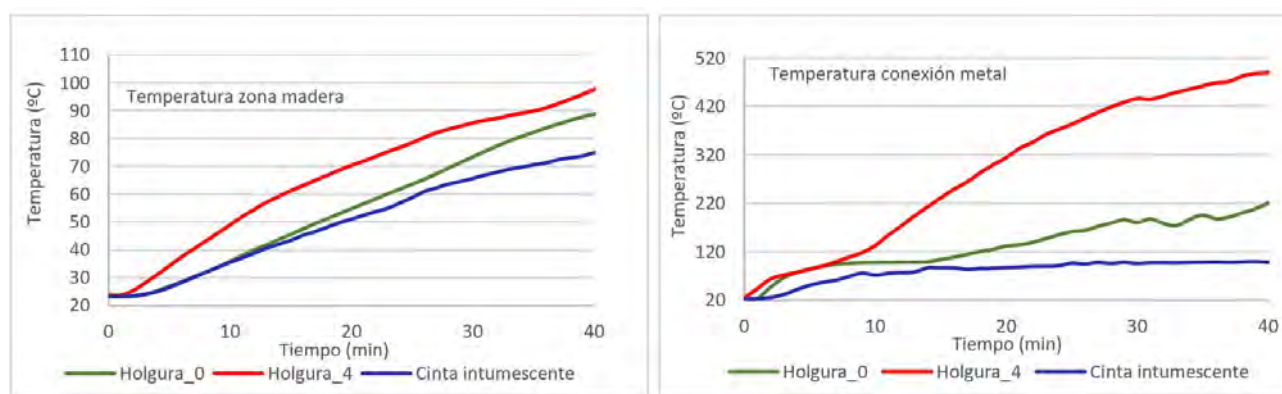


Figura 4. Evolución de las temperaturas durante el ensayo. La imagen izquierda muestra las temperaturas del termopar colocado sobre la madera y la imagen derecha las del termopar colocado sobre el metal de la conexión.

Las imágenes de las Figuras 5 y 6 muestran la afectación de la madera después del ensayo. Se puede observar que en el caso de la unión con holgura sin proteger las llamas han llegado hasta el metal, acelerando la carbonización de la madera y provocando una mayor pérdida de sección. En cambio, en la unión sin holgura o con holgura protegida con banda intumescente el perímetro de madera alrededor del conector metálico se mantiene intacto.

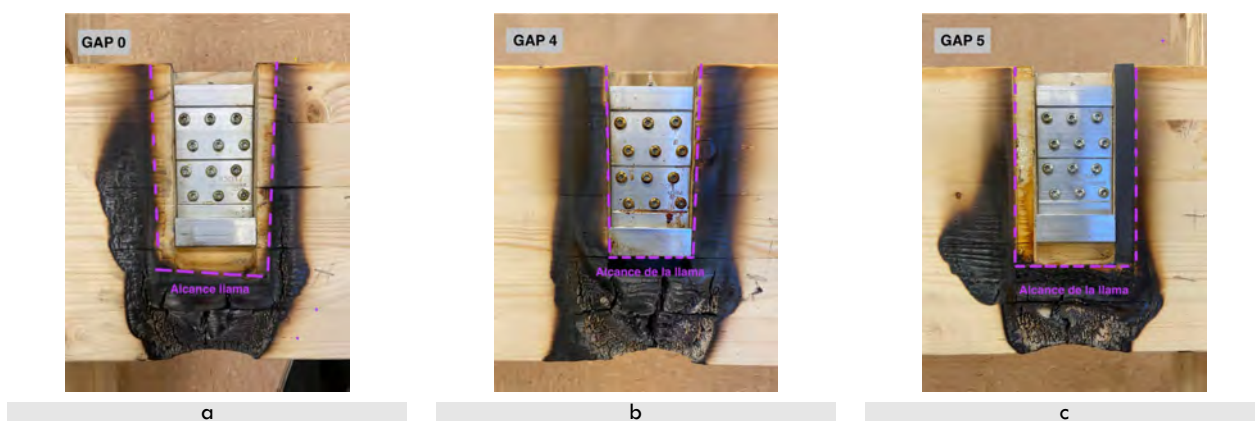


Figura 5. Se observa el alcance de la llama en la viga principal. a: sin holgura, b: holgura 4 mm, c: holgura 5 mm con cinta intumescente.

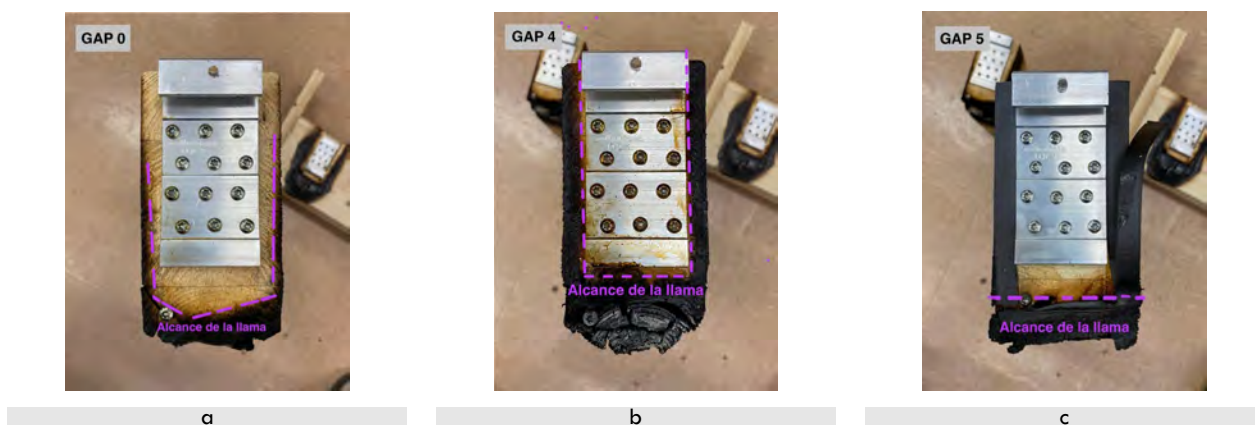


Figura 6. Se observa el alcance de la llama en la viga secundaria. a: sin holgura, b: holgura 4 mm, c: holgura 5 mm con cinta intumescente.

4. Conclusiones

Se ha preparado un montaje experimental sencillo que ha permitido evaluar el efecto de algunos detalles de las uniones metálicas en madera cuando son sometidas a las altas temperaturas características de un incendio. Se han considerado tres variantes para un mismo tipo de unión con conector metálico oculto: unión sin holgura, unión dejando una holgura de 4 mm y unión con holgura protegida por una cinta intumescente. Tras la aplicación de una llama durante 40 minutos, se han observado diferentes grados de afectación en las tres variantes, siendo el caso de unión con holgura no protegida el que presenta una mayor superficie carbonizada y una mayor reducción en su sección. El registro de las temperaturas en diferentes puntos de las uniones a lo largo del ensayo ha permitido confirmar el peor comportamiento del caso con holgura no protegida y distinguir entre los otros dos casos, obteniendo un mejor resultado para el caso de holgura protegida. Por tanto, tras el ensayo realizado puede concluirse que, en caso de holgura, la utilización de una barrera intumescente puede proteger de forma efectiva la unión metálica, llegando a tener un comportamiento al fuego incluso mejor que en un caso sin holgura.

Agradecimientos

Los autores agradecen al MCIN/AEI/10.13039/501100011033 la financiación recibida a través del proyecto PID2020-117530RB-I00.

Referencias

- [1] Peng, L., Hadjisophocleous, G., Mehaffey, J., & Mohammad, M. (2011). Predicting the fire resistance of wood–steel–wood timber connections. *Fire technology*, 47, 1101-1119.
- [2] du Plessis, M., Sulon, D., Streicher, D., & Walls, R. (2023). Experimental testing on timber connections considering the influence of gap size and intumescent sealants. *Fire and Materials*.

1070

EL NUEVO ROL DE LA MADERA ESTRUCTURAL EN EL CONTEXTO DE LA EMERGENCIA CLIMÁTICA. REALIZACIONES RECIENTES EN EDIFICACIÓN

Juan Rey Rey¹; Jacinto Ruiz Carmona²; Flavia Proverbio³

¹ Universidad de A Coruña, / Mecanismo Ingeniería;

² Universidad Politécnica de Madrid / Mecanismo Ingeniería

³ Mecanismo Ingeniería

Palabras clave / Palavras-chave:

Madera laminada, Madera acetilada, CLT, Madera estructural, Huella de carbono

Resumen / Resumo:

La madera es un material natural que se lleva empleando en el mundo de la construcción desde épocas muy antiguas. Junto con las estructuras de fábrica han constituido los principales elementos estructurales de las construcciones humanas durante siglos, existiendo numerosas realizaciones de catedrales, puentes y edificios de todo tipo con estos materiales naturales.

Tras el papel predominante que el acero y el hormigón armado han tenido en los dos siglos pasados, ha sido paradójicamente en este arranque del s. XXI, cuando el rol de la madera en el ámbito de la construcción de edificios ha recobrado un cierto papel protagonista. Esto se ha debido principalmente a dos motivos. Por una parte, a la creciente industrialización del sector, con la aparición de nuevos productos derivados de la madera (madera laminada encolada, madera contralaminada, nuevos herrajes, etc.). Por otra, debido a la imperiosa necesidad de hacer frente a la emergencia climática, reduciendo la huella de carbono de las nuevas estructuras que construimos, dado que éstas suponen aproximadamente el 40% del total de emisiones anuales de CO₂.

Ante este cambio de paradigma, surge la necesidad de que la madera se adapte a la nueva realidad constructiva, ampliando su campo de actuación de la rehabilitación y de las construcciones de pequeña escala al ámbito de los edificios públicos, las construcciones en altura, las grandes luces, las geometrías complejas, etc.

En el presente artículo se recogen algunos aspectos relevantes relativos al uso de productos derivados de la madera como elementos principales de la estructura de varios edificios en los que Mecanismo Ingeniería ha intervenido como consultor de estructuras en los últimos años.

1. Introducción

La madera es un material natural que se lleva empleando en el mundo de la construcción desde épocas muy antiguas. Junto con las estructuras de fábrica han constituido los principales elementos estructurales de las construcciones humanas durante siglos, habiéndose construido numerosas catedrales, puentes y edificios de todo tipo con estos materiales naturales.

En el s. XIX, la revolución industrial supuso la introducción de nuevos materiales (la fundición, el hierro y, posteriormente, el acero) que fueron relegando paulatinamente el uso de la madera en el ámbito de la construcción. Posteriormente, en el s. XX, la invención del hormigón armado propició una verdadera revolución en el ámbito de la construcción, imponiéndose rápidamente como el principal material empleado en las estructuras de todo tipo de edificaciones. [1]

Paradójicamente, ha sido recientemente, en el s. XXI, cuando el papel de la madera en el ámbito de la construcción de edificios ha recobrado un cierto papel protagonista, debido principalmente a dos motivos fundamentales: la creciente industrialización del sector, con la aparición de nuevos productos derivados de la madera (madera laminada encolada, madera contralaminada, nuevos herrajes, etc.) junto con la imperiosa necesidad de hacer frente a la emergencia climática reduciendo la huella de carbono de las nuevas estructuras que construimos.

2. El rol de la madera en el contexto de emergencia climática

2.1.La emergencia climática

Actualmente se estima que el sector de la construcción es el responsable del 40% de las emisiones de CO₂. Asimismo, genera el 30% de los residuos sólidos y el 20% de la contaminación de las aguas. En particular, sólo la industria del cemento produce el 8% de las emisiones totales de CO₂. [2]

Esta situación ha ido generando una cada vez mayor concienciación dentro del sector acerca de la necesidad de buscar alternativas menos contaminantes, apostando por materiales con menor huella de carbono (total de gases de efecto invernadero que estos generan, ya sea directa o indirectamente, durante su ciclo de vida), materiales locales para reducir emisiones durante el transporte, así como mejorando la gestión de residuos durante el ciclo de vida del edificio. El rumbo que la arquitectura sostenible y bioclimática está tomando hacia la neutralidad climática es una corriente imparable en el que la madera tiene un papel protagonista.

2.2.La madera en el ámbito de la construcción de estructuras de edificación

Tal y como se ha indicado, la emergencia climática ha puesto en el foco la necesidad de minimizar la huella de carbono de nuestras construcciones, máxime cuando el sector de la construcción supone un porcentaje tan elevado del total de emisiones anuales a nivel global.

La baja huella de carbono de la madera, su origen natural, junto con el carbono que secuestra durante su crecimiento, han propiciado que se haya situado en el foco de atención principal de diseñadores e ingenieros, empezando a desplazar a los materiales que han tenido un mayor protagonismo en las pasadas décadas: el hormigón armado y el acero. [3]

Esta tendencia se está viendo reforzada además por una incipiente legislación a distintas escalas, bien primando de forma indirecta, a través de topes a la huella de carbono en los nuevos edificios (por ejemplo, en Francia) o bien de forma directa, estableciendo cuotas mínimas en la construcción en madera de los nuevos edificios públicos (por ejemplo, en Galicia, España).

En este contexto, la madera estructural está volviendo a ocupar de forma progresiva un espacio central en la construcción de edificios. En este nuevo escenario, surge la necesidad de que la madera se adapte a la nueva realidad constructiva, ampliando su campo de actuación del campo de la rehabilitación y de las construcciones de pequeña escala al ámbito de los edificios públicos, las construcciones en altura, las grandes luces, las geometrías complejas, etc. Así, un material asociado a la construcción tradicional debe actualizarse ante los nuevos desafíos que impone la sociedad actual.

Esta transición lleva aparejada importantes retos: por una parte, la maduración y mayor desarrollo de nuevos productos derivados de la madera como el CLT, por otra, la resolución de ciertos problemas clásicos que la construcción en madera lleva aparejados (vibraciones, acústica, incendio) y finalmente su integración de forma armónica con el resto de materiales habituales en la construcción de estructuras de edificación, constituyendo estructuras híbridas o mixtas, tanto acero-madera, como madera-hormigón, o incluso acero-madera-hormigón.

3. Realizaciones recientes

En el presente artículo se recogen algunos aspectos relevantes relativos al uso de productos derivados de la madera como elementos principales de la estructura de varios edificios en los que Mecanismo Ingeniería ha intervenido como consultores de estructuras en los últimos años. Los ejemplos recogidos tratan de barrer distintas tipologías, usos, productos derivados de la madera y escalas. En el artículo se analizan aquellos puntos diferenciadores del diseño estructural en madera, comparándolos con soluciones alternativas en acero y/o hormigón.

El primer caso de estudio es el Mirador da Cova de Adegas Moure en la Ribeira Sacra, obra de Arrokae Arquitectos (Fig. 1 a) y que destaca por el empleo de madera acetilada en unas condiciones de muy alta exposición a la intemperie. [4] El segundo ejemplo es la ampliación del restaurante Martín Berasategui en Orio, obra de Mecanismo Arquitectura (Fig. 1 b) que se caracteriza por la compleja geometría formada por vigas de madera laminada encolada de doble curvatura.



Figura 1. 1a) Mirador da Cova (arriba-izqda.); 1b) Ampliación restaurante Martín Berasategui (arriba-dcha.)

Posteriormente se analizan las peculiaridades de la ampliación de la bodega Viña Mein en Ourense, obra de MOL Arquitectura (Fig. 2a), en el que se diseñaron tanto estructuras de madera contralaminada como pórticos con madera aserrada de castaño. Por su parte, la vivienda M1 en Oregón, USA, obra de FRPO (Fig. 2b), se caracteriza por una estructura de forjados formada por vigas de madera laminada encolada materializando grandes voladizos.

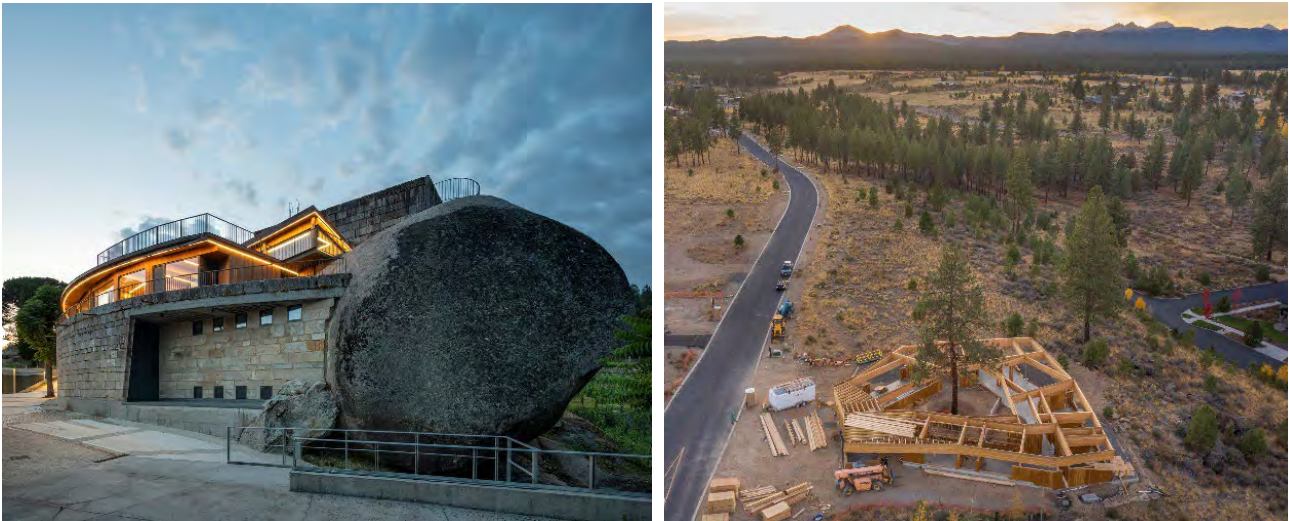


Figura 2. 2a) Ampliación Viña Mein (abajo-izqda.) y 2b) Vivienda M1 en Oregón (abajo-dcha.)

Finalmente se exponen dos edificios proyectados fundamentalmente con madera contralaminada: el centro de salud en Abegondo, obra de Ábalo-Alonso (Fig. 3a) y un edificio de viviendas en la calle Marqués de Viana de Madrid, obra de FRPO (Fig. 3c).



Figura 3. 3a) Centro de Salud en Abegondo (abajo-izqda.) y 3b) Edificio de viviendas en c/ Marqués de Viana (abajo-dcha.)

4. Conclusiones

Tras un periodo prolongado de varios siglos en los que debido a la aparición de nuevos materiales de construcción la madera había sido relegada a un papel secundario en el campo de las estructuras de edificación, la emergencia climática junto con el desarrollo industrial de nuevos productos derivados de la madera como CLT han propiciado una nueva vigencia de este material. Este nuevo paradigma requiere no obstante de una adaptación de las técnicas constructivas tradicionales en madera a un nuevo contexto en el que las exigencias de las estructuras de edificación son mucho mayores. A través de varios casos de estudio desarrollados por Mecanismo Ingeniería en los últimos años se analizan las particularidades del empleo de estructuras de madera en diferentes edificios.

Referencias

- [1] Rey-Rey, J. (2014) The impact of the evolution of structural analysis methods on built forms. 37th IABSE Symposium on Engineering for Progress, Nature and People; Madrid. Pages 499-506
- [2] Nuri Cihat Onat, Murat Kucukvar. (2020). Carbon footprint of construction industry: A global review and supply chain analysis. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volume 124. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109783>
- [3] Jim Hart, Bernardino D'Amico, Francesco Pomponi. (2021). Whole-life embodied carbon in multistory buildings. Steel, concrete and timber structures. Journal of industrial Ecology. Wiley. DOI:10.1111/jiec.13139
- [4] Rey-Rey, J., Ruiz Carmona, J., & Vegas González, P. (2020). Lo pequeño es bello: algunos ejemplos de estructuras de pequeña escala. Hormigón Y Acero. <https://doi.org/10.33586/hya.2020.281>

1071

EL PUENTE PEATONAL DE MADERA SOBRE EL RÍO GUADALHORCE EN MÁLAGA: UNA REVOLUCIÓN SOSTENIBLE

Julio Vivas¹; Juan Carlos Santos¹; Francisco Santos¹

¹ MEDIA MADERA

Palabras clave / Palavras-chave:

Puente peatonal, Construcción sostenible, Madera en ingeniería civil, Dinámica estructural, Innovación en infraestructuras

Resumen / Resumo:

Desde su inauguración en octubre de 2020, el puente peatonal sobre el río Guadalhorce se ha erigido como un nuevo hito y un símbolo de innovación en la ciudad de Málaga. Con una longitud total de 270 metros y un vano central de 70 metros, este puente de madera se postula como uno de los más grandes de Europa.

Este proyecto destaca no solo por su impresionante tamaño, sino también por su importancia en el impulso de la construcción sostenible y el uso inteligente de la madera en ingeniería civil.

1. El puente de madera como atracción turística

Desde su apertura, el puente ha atraído a miles de visitantes, peatones y ciclistas, convirtiéndose en un punto de referencia en la ciudad. Las redes sociales se han inundado con imágenes de esta imponente estructura, elevando la reputación de Málaga como un destino moderno y sostenible.

Este proyecto es un testimonio de las posibilidades que ofrece la madera como material de construcción, creando no solo una infraestructura funcional sino también visualmente impactante.



Figura 1. Pasarela sobre el río Guadalhorce

2. Construcción sostenible frente al cambio climático

En un mundo cada vez más consciente del cambio climático, la construcción sostenible se vuelve esencial. La madera destaca como material de construcción sostenible, contribuyendo a la reducción de la huella de carbono del sector de la construcción. Aunque la madera ha sido desplazada por el hormigón y el acero, su resistencia, durabilidad y belleza demuestran que puede competir de manera efectiva con los materiales convencionales.

Los puentes de madera, como el del Guadalhorce, son parte integral de la próxima generación de construcciones sostenibles de alto desarrollo tecnológico. Si bien el acero y el hormigón son fantásticos materiales que seguirán siendo fundamentales en el futuro, no podemos obviar su alto coste energético y su elevada huella de carbono. De la misma forma que es previsible un cambio de los combustibles fósiles hacia fuentes de energía renovables, el cambio de los materiales de construcción basados en materiales más sostenibles como es el caso de la madera también será inevitable en el futuro de la construcción.



Figura 2. Realización de ensayos dinámicos sobre la pasarela previos a su inauguración

3. Un puente con propósito

Ubicada en el paraje natural protegido de la desembocadura del río Guadalhorce, la pasarela no solo sirve como una conexión peatonal y ciclista, sino que también respeta y realza el entorno ecológico. El diseño orgánico del puente y su construcción con madera subrayan la importancia de utilizar materiales renovables y respetuosos con el medio ambiente.

La pasarela, construida con madera laminada encolada, destaca por su estructura multi-arco, logrando un equilibrio estático vital. La prefabricación en taller permitió un control de calidad exhaustivo, facilitando el montaje en obra y minimizando el impacto ambiental en el entorno natural.

El uso de madera tratada en profundidad garantiza la durabilidad del puente, cumpliendo con los estándares de la Clase de Uso 4. Esta elección no solo cumple con las normativas de infraestructuras, sino que también resalta la capacidad de la madera para rivalizar con el hormigón y el acero en términos de durabilidad y resistencia.

4. Algunos datos

La pasarela tiene una longitud total de 273 metros lineales y un ancho de paso útil de 3 metros. Está formada por siete tramos de configuración simétrica de luz creciente, siendo la luz del tramo central, el que salva la rama del río Guadalhorce de casi 70 metros, el mayor, seguido de 55 metros para los vanos contiguos, y de 31 metros y 15 metros respectivamente en los vanos sucesivos.



Figura 3. Montaje del tramo central

La estructura multi-arco opera de manera integrada, preservando la geometría de todos los elementos durante la construcción, un aspect crucial para alcanzar el equilibrio estático de la pasarela.

La geometría inicial propuesta contemplaba el inicio de los arcos prácticamente a nivel del suelo. Después de realizar el estudio hidrológico, se descubrió que durante el período de retorno de 500 años, una buena parte de la estructura permanecería sumergida. Por tanto, la superestructura debía quedar por encima de la línea de la lámina de agua para ese período de retorno (Q500), exactamente a 7,1 metros sobre el nivel del mar. Este cambio de altura implicó una reducción de la curvatura de los arcos.

Toda la pasarela ha sido prefabricada en taller, pudiendo tener un alto control de la calidad. Los módulos, que fueron transportados ya pre-ensamblados para su montaje en obra, han sido diseñados teniendo en cuenta las limitaciones de transporte, acceso y montaje en obra. Esta ventaja constructiva logró facilitar las labores en obra, minimizando los problemas y logrando la máxima reducción del impacto de la obra en el medio natural donde se ubica.

5. Un futuro más sostenible

El puente peatonal sobre el río Guadalhorce no solo es una avanzada obra de ingeniería, sino también un hito en la búsqueda de soluciones sostenibles en la construcción civil. Este proyecto demuestra que la madera no solo es una opción viable, sino necesaria, en la construcción de infraestructuras modernas y sostenibles que respeten nuestro entorno y construyan un futuro más sostenible. En un mundo que demanda soluciones ecoamigables, el Puente del Guadalhorce se alza como un faro de cambio hacia un futuro más verde y sostenible en la ingeniería civil.

1072

EL TALLER EXPERIMENTAL DE CARPINTERÍA DE ARMAR. DÉCADA 2013-2023

Miguel C. Cabo Fernández¹

¹ ETS Arquitectura / UPM

Palabras clave / Palavras-chave:

Innovación educativa, Taller experimental, Construcción de modelos, Estructuras ligeras, Madera

Resumen / Resumo:

El presente trabajo recoge la experiencia de un taller experimental que surgió como una innovación educativa en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Universidad Politécnica de Madrid. El taller recibe el nombre de Taller de Carpintería de Armar y su objetivo es la fabricación de modelos a escala de diferentes estructuras ligeras de madera realizadas por los propios alumnos. Se cumplen diez años de actividad ininterrumpida del taller y la intención de esta ponencia es presentar esta experiencia a otras universidades o instituciones de enseñanza, con la idea de animarlos a implementar estas actividades experimentales en sus programas. La experiencia transmitida por los alumnos que han pasado por este taller ha sido altamente positiva, pues la enseñanza mayoritariamente teórica es la actualmente dominante. Los profesionales dedicados a la didáctica reconocen la necesidad de incrementar los trabajos manuales por la mejora del desarrollo de las capacidades del hipocampo en lo que se refiere a la comprensión de la realidad tridimensional. Los comienzos del taller estuvieron relacionados con la tradición de la carpintería histórica española como las armaduras de par y nudillo y los trazados de lazo islámico. A lo largo de los años la actividad ha ido girando hacia la modelización de diversas configuraciones de estructuras ligeras de madera, y especialmente estos últimos años a las estructuras recíprocas y las estructuras espaciales relacionadas con las derivaciones de los poliedros regulares y la triangulación de casquetes de geodas. Las herramientas utilizadas han sido mayoritariamente manuales, para evitar el riesgo de accidentes.

1. Preámbulo

El que no experimenta no sabe

Jalaluddin Rumi (s XIII)

Aprender haciendo

Andrés Manjón y Manjón, (1846-1923)

Learning by doing

John Dewey (circa 1930)

La cita de Jalaluddin Rumi [1], poeta místico sufí tiene sentido por cuanto es aplicable a nuestro contexto del aprendizaje a través de la experiencia (1). En nuestra propia herencia histórica de la didáctica recordamos también al no tan conocido Andrés Manjón, sacerdote y pedagogo (2), defensor del aprendizaje a través de la experiencia.

En este trabajo se presenta un análisis sobre la importancia histórica y la vigencia contemporánea que ha tenido la teoría de la experiencia formulada por John Dewey (3) en el marco de la pedagogía de los Estados Unidos. Se analiza el contexto en el cual Dewey desarrolló su producción teórica y en particular con quién discutía y oponía su propuesta educativa basada sobre el concepto de aprender haciendo («learning by doing»). Se encuadra su filosofía de la educación dentro del pragmatismo y de la corriente a la que Dewey adhirió y nutrió: el instrumentalismo. Se destaca la trascendencia y significación histórica para la pedagogía de los conceptos propugnados por Dewey: actividad y experiencia, así como las implicancias para la educación institucionalizada. Por último, se discuten algunos de los temas discutidos en el marco del debate pedagógico contemporáneo y que se derivan de las premisas de la teoría de la experiencia (Gibbs 1998) [2].

La necesidad de una didáctica basada en estos principios experimentales está siendo asumida en los distintos niveles educativos, si bien, en la Universidad española, se detecta aún una fuerte resistencia a implementar estos métodos ampliamente asumidos en los países desarrollados occidentales. Esta ponencia trata de llamar la atención sobre la necesidad de adaptarnos a esta línea de educación en la Universidad.

2. Introducción

2.1. El taller experimental de carpintería de armar

El Taller Experimental de Carpintería de Armar fue creado por mi iniciativa en el curso 2012-2013 en la Escuela Superior de Arquitectura, Universidad Politécnica de Madrid. La idea inicial era recrear modelos de la carpintería de armar tradicional española, utilizando casi exclusivamente herramientas manuales, tales como serrucho, formón, mazo, sargentos, gramiles, reglas y cartabones [3] [4]. El alumno debía enfrentarse a procedimientos similares a los utilizados por un carpintero del siglo XVI. Igualmente tratábamos de utilizar lo menos posible las ayudas de los programas CAD. Aprendimos que cuando a los alumnos se les deja solos antes herramientas manuales, un simple plano dibujado a mano, y útiles tan simples como reglas y cartabones, la sensación de abandono ante la realidad constructiva era evidente.

Primeramente, tenían que ser introducidos en el uso de las herramientas manuales tradicionales de corte y trazado, no solo por su seguridad sino para conseguir la destreza y precisión necesarias. El Taller se dirigía a alumnos de cuarto curso de arquitectura y toda la experiencia con la que contaban era de carácter teórico dirigido específicamente al ejercicio del diseño arquitectónico, pero sin ningún tipo de experiencia en la fabricación o construcción. El curso duraba un cuatrimestre y hacia finales del curso era notable la adquisición de pericia en el manejo de herramientas de corte y trazado. Para la mayoría de los alumnos fue una experiencia totalmente nueva y gratificante.

El taller nos ha permitido constatar la poca cultura que existe en España en cuanto al trabajo con las manos y la autoconstrucción en madera, que contrasta con la dedicación que se dedica en otros países como Estados Unidos y Canadá a la divulgación de la construcción en madera [5].

2.2. La mano y el cerebro

2.2.1. Feito a mao

Los nombres y apellidos de los autores deben consignarse en tamaño de fuente 10 pt y en negrita, dejando una línea en El órgano visual, el ojo, no es un sentido 3D. La visión del ojo es un sistema básicamente 2D. Los rayos de luz inciden sobre la retina, que, aunque tiene una cierta curvatura, funciona como un plano donde se alojan unos bastoncillos que envían impulsos electromagnéticos a receptores superficiales en el cerebro. La visión binocular funciona con ajuste de enfoque para evaluar la distancia y es algo que se aprende de modo experimental. Un niño no logra el ajuste experimental adecuado hasta uno dos años. Resumiendo, los ojos no son un sistema de percepción 3D propiamente dicho. En realidad, nuestro único sentido que logra transmitirnos esa percepción tridimensional está en la piel. Es el tacto. Si cerramos los ojos y posamos las manos sobre un objeto como un ciego, empezamos a usar un sistema de percepción realmente 3D. En el Taller invitamos a nuestros alumnos a que practiquen el uso del tacto para una mejor relación con las piezas y objetos de madera. Hay determinadas soluciones espaciales que se aprecian mucho mejor cuando podemos tocarlas.

El hecho de fabricar cosas con el uso de las manos y herramientas manuales de corte y trazado ayudan de manera importante a conectar directamente el cerebro con la percepción espacial tridimensional real. No es lo mismo rotar una estructura de barras a través de una pantalla de ordenador, que poderlo hacer directamente tocándolo con las manos. Los alumnos de 4º curso de arquitectura están habituados a dibujar en su ordenador soluciones espaciales más o menos complejas, pero les resulta extremadamente difícil, construir realmente ese objeto. Nuestro taller trata de salvar esta distancia y ayudar al alumno a entrar en el mundo real de la percepción y manejo espacial de las tres dimensiones [6].

3. 10 años de taller

3.1. Resumen de imágenes de las realizaciones del taller

En este apartado recogemos algunas imágenes de los modelos a escala producidos en el Taller de Carpintería a lo largo de 10 años de desarrollo en la década 2013-2023 (Fig. 1).



Figura 1. Diversas imágenes de los trabajos del Taller 2013-2023.

4. Conclusiones

En España la enseñanza de la arquitectura tiene un carácter esencialmente teórico y donde se cultiva la memoria como un bien en sí mismo. Aunque existen otros talleres y asignatura con un cierto componente práctico, no es habitual el uso directo de las manos para trabajar o resolver problemas. No necesito aquí explicar la relación que tiene el uso de las manos con la adquisición de conocimientos. Los profesionales de la Didáctica saben muy bien a que me estoy refiriendo y está científicamente estudiado. También es cierto que los expertos en Didáctica reconocen que la Universidad en España es reacia a la aplicación de esta disciplina en sus enseñanzas.

Agradecimientos

Agradecemos especialmente la colaboración de los numerosos alumnos de arquitectura que han participado en este taller a lo largo de los años entre 2013 y 2023, que no incorporamos explícitamente por la gran extensión de texto necesaria, pero que de alguna manera han tenido parte activa en los resultados del taller.

Notas

- (1) Jalal ad-Din Muhammad Rumi. Místico sufí (1207-1273) Jalal ad-Din Rumi.
- (2) Andrés Manjón y Manjón, (1846-1923), sacerdote y didáctico conocido por su lema “aprender haciendo”.
- (3) John Dewey, (*La teoría de la experiencia*, circa 1930) promotor del lema *Learning by doing*,

Referencias

- [1] Lewis, F. D. (2008). Rumi: Past and Present, East and West: The life, Teaching and poetry of Jalal Al-Din Rumi. Oneworld Publication.
- [2] Gibbs, G. (1998) *Learning by Doing: A Guide to Teaching and Learning Methods*. Oxford Brooks University, Oxford.
- [3] Fernández Cabo, M.C. (1977); *Armaduras de cubierta*. Ambito Ediciones, Valladolid.
- [4] Nuere, E. (1989). *La Carpintería de Armar española*. Madrid: Instituto de Conservación y Restauración de Bienes Culturales.
- [5] American Institute of Timber Construction (2005). *Timber Construction Manual*. 5th ed. Hoboken: John Wiley & Sons.
- [6] Ruiz, G. (2013). La teoría de la experiencia de John Dewey. *Foro de Educación* ISSN 1698-7799, ISSN-e 1698-7802, nº 15.

1073

EL TROJE PURÉPECHA, HERENCIA EN MADERA

Rene Navarrete Padilla¹

¹ Universidad de Guanajuato. México

Palabras clave / Palavras-chave:

Arquitectura, Estructura, Historia, Legado, Patrimonio

Resumen / Resumo:

Los trojes purépechas son estructuras de madera tradicionales utilizadas por la civilización purépecha, también conocida como tarasca, que habitaba la región occidental de México, específicamente en el estado de Michoacán. Estas construcciones, que datan de tiempos prehispánicos, poseen una gran importancia histórica y técnica, no solo fueron un medio de almacenamiento para granos y maíz, sino también un reflejo de la destreza constructiva y la conexión simbólica que los purépechas tenían con su entorno. A través de la exploración de su importancia histórica, técnica, de su vigencia y trascendencia en la arquitectura en madera contemporánea, podemos apreciar la herencia duradera y el impacto significativo de los trojes purépechas en el mundo moderno y como su legado perdura hasta el día de hoy, influenciando la arquitectura en madera actual.

Su importancia histórica y técnica es considerable, pues son testimonio de la maestría de los artesanos purépechas en la construcción con madera. Las estructuras están construidas principalmente con troncos de pino oyamel (*abies religiosa*), en combinación con el pino blanco (*pinus pseudostrobus*), pino lacio (*pinus michoacana*) y el pino canis (*pinus maximinoi*), que se ensamblan sin el uso de clavos ni tornillos, siendo un sistema constructivo muy muy eficiente y resistentes a las inclemencias del tiempo.

Su paulatina desaparición por la pérdida del conocimiento constructivo, la escasez de la madera adecuada y los costos de otros materiales pone en riesgo la pérdida de un patrimonio cultural invaluable. Su registro y conocimiento es un primer paso para su conservación.

1. Contexto geográfico

Estas edificaciones que denominamos trojes, las encontramos principalmente en la región de la sierra o meseta purépecha como también se le identifica, que se localiza en la parte central-oeste del estado y está integrada por 11 municipios y abarca una superficie de 3,805.56 km², que representa una extensión territorial de 6% del total del estado de Michoacán, su territorio es aprovechable principalmente en las actividades agrícolas y ganaderas.

El relieve de la región está conformado por pequeños accidentes orográficos constituidos por el eje Neovolcánico transversal que cruza el estado de Michoacán de noroeste a sureste, y su altitud es elevada pues existen prominencias que van desde los 2500 metros sobre el nivel del mar, hasta los 3000 m s.n.m., aunque encontramos algunos relieves de valles y planicies entre los cerros y mesetas. Su clima es generalmente frío y con alto índice de lluvias de alrededor de 1100 mm de lluvia anual.

En esta altitudes encontramos zonas boscosas de coníferas que permitieron el uso de la madera como material primordial para la edificación de sus viviendas, los principales tipos de pinos usados son el oyamel, el pino blanco, el pino lacio y el pino canis. Y con este material se edificó lo que hoy representa la vivienda purépecha tradicional y que distingue la arquitectura tradicional del estado de Michoacán.

Contexto arquitectónico-espacial

La vivienda purépecha se distribuye en un terreno o solar como se le denomina en la región donde aparecen el troje, motivo de este documento, y de manera independiente os espacios complementarios como la cocina, la letrina, establos, huerta, área de siembra u otras, como se muestra en la Figura 1. Esta distribución es muy propia de la forma de vida del habitante del lugar, donde el espacio abierto es el principal articulador de la dinámica familiar.

El troje, el espacio habitacional que nos ocupa se compone arquitectónicamente de un complejo de corredor-habitación y granero. El corredor, como en el lugar se le denomina es el portal que antecede a la habitación, mientras que el granero se encuentra en la parte alta de ambos espacios y que podemos observar en la Figura 2.; desde dicho corredor se accede a la parte superior de éste y de la habitación donde encontramos el tapanco que servía de granero y en la parte central de este la puerta de acceso a la habitación.

En la figura 3, es posible apreciar cada uno de los componentes espaciales comentados, el corredor como espacio de recepción, transición y trabajo, el cuarto con uso de habitación, lugar de nacimiento de los hijos y al mismo tiempo de velación de los fallecidos de la familia y el tapanco en la parte superior como depósito de granos para la subsistencia de los que ahí habitaran.

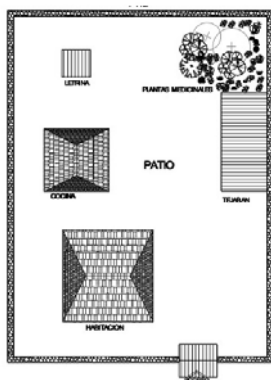


Figura 1. Esquema de distribución. Bedolla et al. 2011



Figura 2. Portal. Archivo personal. 2021



Figura 3. Troje. Dibujo de Miguel Zavala Amezola. 2021

2. Contexto técnico-constructivo

Estas edificaciones tradicionales se materializan con el material abundante en su momento en la región: la madera. No es difícil comprender el uso de la madera dadas las condiciones geográficas donde se desarrollan árboles maderables de grandes escuadrías, lo que provocó el desarrollo de un sistema constructivo típico de la zona, que si bien, al mirarlo con una mirada contemporánea, no presenta innovación, resulta relevante para la época y zona donde se desarrolló.

El troje pues se conforma en su totalidad con madera: tablones de 8-12 cm de espesor y de 40-80 cm de ancho y largos desde 3 m hasta 12 m, dispuestos de manera horizontal para piso y techo de habitación y verticales para paredes, pilares, arrastres y cerramientos de secciones mínimas de 15 cm x 15 cm y estructura cubierta con secciones menores, finalizando por encima de todo con tejamaniles, que es una tablilla delgada (2-3 mm) cortada en sentido radial y de largo de un metro aproximadamente.

La estructura completa se asienta en una cimentación de mampostería seca de regular manufactura como se observa en la Figura 4, que eleva la construcción por encima del nivel natural del terreno, desligando la madera de mismo y generando un espacio ventilado por debajo que mantiene el troje seco y en buen estado.

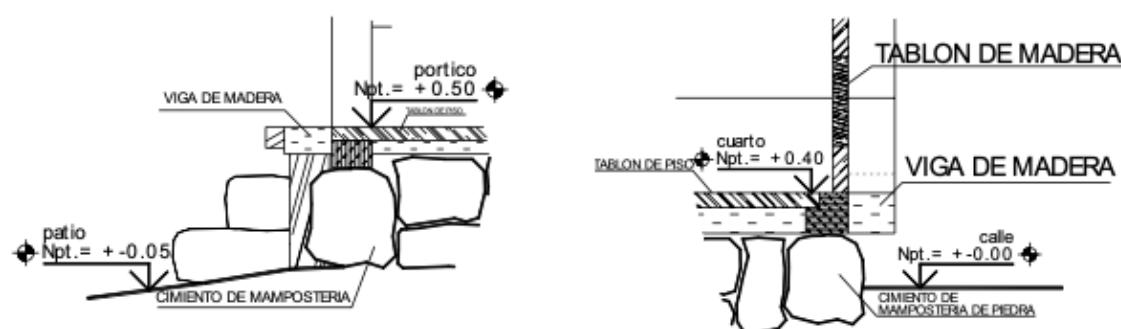


Figura 4. Detalles de cimentación. Bedolla et al. 2011

Los muros encontramos los tablones en sentido vertical con los tablones mencionados y que se ensamblan en los cruces de las esquinas con ensambles a media madera, conformando una caja perfectamente estructurada, a pesar de carecer de cualquier elemento de unión física o mecánica. El primer tablón inferior se fija a los arrastres de desplante con tarugos insertos, lo que le otorga la suficiente rigidez para evitar desplazamientos horizontales y la caja completa termina de rigidizarse al ensamblar las vigas de cerramiento, el entablado de techo de la habitación, que es al mismo tiempo el piso del tapanco y la estructura de cubierta final.

Los pilares que soportan la viga del corredor se sientan directamente en basas pétreas de desplante con ensambles de caja y espiga, y con el mismo sistema en la parte superior como se observa en la Figura 5.

La estructura de cubierta se arma generalmente a cuatro aguas, en un sistema de pares con correas y se apoya perimetralmente, lo que se muestra en la Figura 6.



Figura 5. Pilastras de corredor. Archivo personal. 2022.



Figura 6. Estructura de cubierta. Dibujo de Miguel Zavala Amezola. 2021

Conclusiones

El troje, la vivienda tradicional purépecha por antonomasia se extingue rápidamente, sus atributos arquitectónicos, técnicos, estéticos y patrimonial están amenazados. Su registro, estudio, presentación, conocimiento y reconocimiento permitiría la permanencia del trabajo de construcción en madera, además de la identidad que representa esta arquitectura en madera, reforzando el arraigo a la misma, como respuesta a los cambios por los nuevos materiales.

Referencias

- [1] Bedolla, J.A. et al (2011) la troje michoacana, una herencia constructiva purhépecha. En actas del 2° Congreso Iberoamericano y X Jornada “Técnicas de Restauración y Conservación del Patrimonio”. 14 a 16 septiembre. La Plata, Argentina.

1074

EMPLEO DE BIOADHESIVO PARA LA ELABORACIÓN DE PANELES DE MADERA MICROLAMINADA DE CHOPO: FABRICACIÓN Y PROPIEDADES MECÁNICAS

Francisco J. Rescalvo¹; Yaiza Fuentes García¹; Carlos Cruz Rodríguez¹; Louis Denaud²; Rafael Bravo Pareja¹; Antolino Gallego Molina¹

¹ Universidad de Granada;

² Arts et Métiers - Sciences et Technologies

Palabras clave / Palavras-chave:

Bioadhesivo, Compresión, Cortante, Ecopaneles, LVL

Resumen / Resumo:

En este trabajo se recogen los resultados de fabricación y propiedades mecánicas a cortante y compresión de nuevos paneles de madera microlaminada estructural 100% ecológica hecha de chapa de chopo y adhesivo biológico y libre de formaldehídos procedente de la lignina de eucalipto. Se recoge un estudio de fabricación así como resultados sobre su comportamiento mecánico a cortante y compresión paralela a la fibra.

1. Introducción

Según Architecture2030.org, los edificios generan alrededor del 40% de las emisiones de gases de efecto invernadero (30% en España, con 6,6 t CO₂ / hab.), una cuarta parte de las cuales son consecuencia de la producción, transporte y uso de materiales de construcción. Dada la creciente población mundial y la consecuente demanda de edificios, es imprescindible implantar un nuevo paradigma en la construcción que permita cumplir con los objetivos de descarbonización del Acuerdo de París para 2050. El uso de la madera, considerado el material del siglo XXI, es una forma eficiente de reducir estas emisiones. A diferencia de otros materiales, la madera no emite CO₂ a la atmósfera (Figura 1), sino que lo absorbe para producir oxígeno. Además, la madera es un material renovable que ejemplifica múltiples ventajas medioambientales, encajando perfectamente en el concepto de bioeconomía circular como recurso natural con alto potencial para la sostenibilidad y la eficiencia energética [1].

Una apuesta ambiciosa en sistemas estructurales con madera es la madera contralaminada (CLT), muy valorada por aunar cerramiento y estructura en una envolvente hermética. Como ejemplo muy reciente, cabe citar el edificio Impulso Verde del proyecto LIFE Lugo +Biodinámico [2]. Con una superficie total de 681 m², si se construyese en hormigón armado y acero, emitiría unas 470 t de CO₂, pero al utilizarse CLT, se emitirán 50 t, pero se secuestrarán 280 t. Sin embargo, este producto es un alto consumidor de recurso, llegando a denominar un producto de madera masiva.

Frente a esta situación de limitados recursos forestales, el sector está planteando el uso de otras alternativas, como puede ser la madera microlaminada o LVL. Esta madera técnica se elabora en tableros de chapa de madera blanda obtenida por desenrollo con espesores en torno a 3 mm encoladas con resinas fenólicas o de poliuretano orientadas principalmente en el sentido de la fibra, de manera que la multiplicidad de las chapas ayuda a aleatorizar la presencia de los defectos propios de la madera, resultando un producto con alta resistencia y estabilidad dimensional [3]. Como la chapa se obtiene por desenrollo del tronco, los niveles de aprochamiento son mucho mayores que con el aserrado de la madera (70-80%), permitiendo también usar trozas más finas, incluso desde 18 cm. Actualmente son dos las limitaciones de la madera microlaminada en España:

- No se elabora en nuestro país, sino que se elabora con maderas no locales en países nórdicos (Finlandia es el país pionero con el LVL de abeto nórdico) o centroeuropeos, aumentando su huella de carbono con el transporte y no fomentando el desarrollo rural en nuestro país.
- Para su elaboración se usa mucho adhesivo, un 6% en peso frente al 3,5% de la madera laminada. Al no usarse adhesivos ecológicos, su impacto en la huella ecológica del producto es muy alto [4].
- Teniendo en cuenta estos aspectos, se plantea el uso de un bioadhesivo que sustituya el adhesivo químico empleado actualmente. En concreto, se ha usado un adhesivo desarrollado en colaboración con la empresa Betanzos HB, mezcla de lignina de eucalipto y agua. En este trabajo se recogen los resultados de fabricación y comportamiento mecánico a cortante y compresión paralela a la fibra de paneles de madera microlaminada elaborados con bioadhesivo y comparados con adhesivo de poliuretano.

2. Materiales y métodos

2.1.Chapa de chopo

Para la elaboración de los paneles microlaminados, se empleó madera de chopo del clon I-214 de la Vega de Granada, comúnmente utilizado en la industria del contrachapado. Toda la madera se extrajo de la misma plantación, desenrollándose con un espesor de chapa de 2.8 mm y un largo de 900 mm. El desenrollo fue llevado a cabo en el laboratorio del grupo de LaBoMaP en la universidad de Arts et Métiers – Sciences et Technologies en Cluny (Francia). Toda la chapa fue secada en una cámara de secado bajo control de temperatura y humedad. Posteriormente se envió a la Unidad de Ingeniería de la Madera de Andalucía en Granada (España), donde se lleva a cabo la elaboración de paneles de madera microlaminada.

2.2.Bioadhesivo

El bioadhesivo empleado en la elaboración de paneles 100% ecológicos proviene de un residuo de la empresa Betanzos HB, la lignina. La lignina es un polímero orgánico que forma parte de la pared celular del tejido vascular de las plantas y las provee de rigidez estructural. Durante la evolución de estos organismos, la lignina fue la promotora de que las plantas alcanzaran altura, alejándose del suelo. Deja por tanto patente su importancia a nivel estructural y de adherencia en plantas y árboles.

Durante el proceso de densificación de sus tableros de eucalipto, se produce un excedente de lignina, la cual actualmente carece de valor comercial. Por ello, mezclando lignina con agua en ciertas proporciones se puede obtener un compuesto viscoso que puede ser aplicado como adhesivo 100% natural.

2.3. Adhesivo químico

Como adhesivo de control, se ha empleado un adhesivo químico de poliuretano estructural. En concreto, se ha usado el adhesivo PURBOND HB S709 de Loctite®. El rendimiento empleado ha sido de 180 g/m².

2.4. Elaboración de paneles microlaminados

La lignina ha presentado dos retos fundamentales en la elaboración de paneles microlaminados: 1) la variación de su viscosidad con respecto de su temperatura; 2) alta dependencia de la humedad de la lignina.

Respecto de 1), se ha llevado a cabo un control exhaustivo de la temperatura del adhesivo en la elaboración de paneles mediante un baño termostático (Figura 1). Respecto de 2) se ha llevado a cabo un estudio detallado de la relación entre humedad de la lignina y capacidad adherente tanto durante el estudio de fabricación de paneles, así como en su relación con las propiedades mecánicas que se incluyen en el presente trabajo.

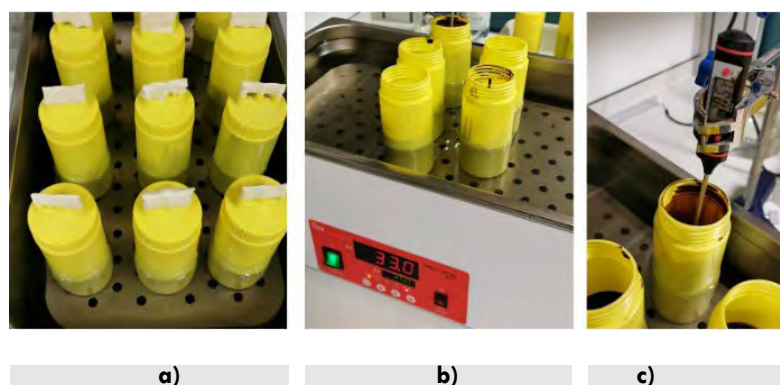


Figura 1. Control de temperatura de aplicación de la lignina mediante un baño termostático. a) Dosificadores de lignina: b) control de la temperatura del agua: c) control con termómetro digital de la temperatura real de la lignina.

En concreto, el estudio de elaboración empleando lignina ha incluido los siguientes aspectos: 1) Trabajabilidad y aplicabilidad; 2) rendimiento o consumo (g/m²); 3) tiempo de prensado; 4) temperatura de prensado; 5) tiempo de curado; y 6) consumo energético.

Para ambos adhesivos, se han elaborado paneles de 15 capas con un espesor total de 42 mm. Las dimensiones de panel han sido de 260 mm de ancho y 1100 mm de largo. Para el prensado se ha empleado una prensa de platos calientes de 6 cilindros ORMA MACHINE® NPC.

3. Resultados

En primer lugar se presenta el estudio de calidad del proceso de elaboración, para el cual se han estudiado los parámetros descritos en el Apartado 2.4. La Figura 2 muestra el análisis de contenido de humedad sobre un panel con los parámetros de fabricación descritos en la Tabla 1. Además, se recoge un ejemplo de fabricación con adhesivo tradicional.

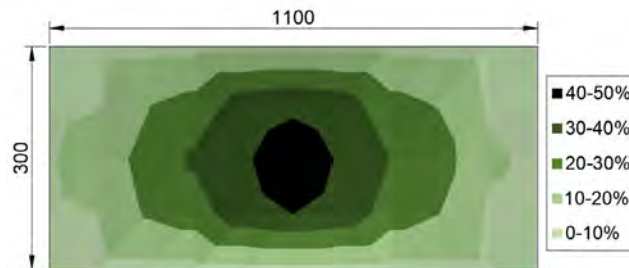


Figura 2. Valores de humedad del panel descrito en la Tabla 1 (1 día de curado).
Medidas tomadas cada 100 mm en largo y ancho y en el centro de la sección. Dimensiones en mm

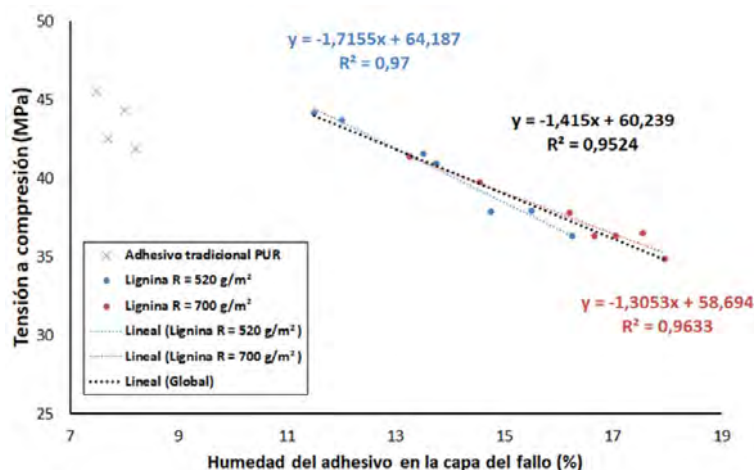
Tabla 1. Parámetros de fabricación de un panel con lignina frente al adhesivo tradicional

Tipo de adhesivo	Número de capas	Consumo (g/m ²)	Temperatura de aplicación (°C)	Temperatura de prensado (°C)	Tiempo de prensado (h)	Tiempo de curado (días)
Lignina	15	700	35	105	48	1
Tradicional	15	200	T. ambiente	T. ambiente	4	1

Se ha comprobado que la lignina adquiere capacidad adherente por debajo del 18% de humedad. La Figura 1 muestra sin lugar a dudas como únicamente las partes externas del panel se encuentran bajo dicho valor. Esto conlleva a una deslaminación del panel durante su mecanizado. Este estudio ha permitido establecer el tiempo de curado óptimo para que todo el panel se encuentre por debajo del citado 18% de humedad.

Tras ello, se han realizado ensayos de adherencia siguiendo la norma UNE-EN 14374 [5] observando que el adhesivo de poliuretano presenta dos fases en su comportamiento mecánico: Fase 1: comportamiento lineal hasta un valor medio de 3.2 MPa, dónde se inicia una elevada deformación a cortante en el plano de cola; Fase 2: Rotura de la madera a un valor medio de 5 MPa. En el caso de la lignina, únicamente se observa la Fase 1, alcanzando un valor de resistencia medio de 3 MPa.

Por último, la Figura 3 muestra los resultados de resistencia a compresión de madera microlaminada elaborada con adhesivo de poliuretano y con lignina a diferentes contenidos de humedad (siempre por debajo del 18%). En el caso de la lignina, se observa una excelente relación entre humedad y resistencia, alcanzado valores medios similares al adhesivo tradicional cuando su contenido de humedad se encuentra por debajo del 12%.



a)

b)

Figura 3. a) Resistencia a compresión frente al contenido de humedad del adhesivo en la capa de fallo. b) ejemplo de fallo a compresión

4. Conclusiones

Se ha constatado que la lignina de eucalipto puede ser empleada como adhesivo en productos de madera microlaminada, alcanzando valores de propiedades mecánicas como la resistencia a compresión similares al adhesivo de poliuretano tradicional. Sin embargo, queda patente que el proceso de elaboración y curado son claves para conseguir que la lignina pueda adquirir dicha capacidad adherente.

Agradecimientos

Proyecto realizado con la Beca Leonardo a Investigadores y Creadores Culturales 2022 de la Fundación BBVA. Eco-LVL (LEO22-2-2941)

5. Referencias

- [1] Beyer, B. et al. Frente al Cambio Climático: Utiliza Madera. 2019. CEI-Bois
- [2] https://www.lavozdeg Galicia.es/noticia/lugo/lugo/2021/02/21/edificio-crece-puzle/0003_202102L21C2993.htm
- [3] Tableros contrachapados y LVL. AITIM. Vol: 330 Julio-Agosto 2022
- [4] LVL Handbook. Europe. Finnish Woodworking Industries. 2019
- [5] UNE-EN 14374:2005. Estructuras de madera. Madera microlaminada (LVL). Requisitos.

1075

ESTIMACIÓN DE DENSIDAD DE LA MADERA DE ARBOLADO URBANO MEDIANTE MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS

Guadalupe Olvera-Licona¹; Gabriel Humberto Virgen-Cobos²; Miguel Esteban²

¹ Instituto nacional de investigaciones forestales, agrícolas y pecuarias

² Universidad politécnica de madrid

Palabras clave / Palavras-chave:

Propiedades mecánicas, Resistencia, Taladro de Pressler

Resumen / Resumo:

La importancia del conocimiento de la densidad de una madera durante la fase de inspección y diagnóstico radica en que la densidad es una propiedad física de la madera que interviene directamente sobre sus propiedades mecánicas. En el presente trabajo, se determinó la densidad verde de la madera de seis ejemplares de las especies: *Robinia pseudoacacia* L. (acacia), *Platanus x hybrida* Brot. (plátano), *Ulmus pumila* L. (olmo) y *Populus alba* L. (chopo) procedentes del arbolado urbano de la ciudad de Madrid. Se tomaron muestras con un taladro de Pressler a dos distintas alturas del fuste. Posteriormente en la misma zona de obtención de muestras, se realizaron pruebas de resistencia a la perforación con el taladro de inspección IML RESI F-400S. A partir de los perfiles de resistencia a la perforación se obtuvo el valor de resistencia media (RM), dichos valores fueron calculados a partir de la energía consumida durante el proceso de perforación del tronco y cuantificada mediante el área del perfil de resistencia. Los resultados obtenidos de las muestras y ensayos permitieron establecer las correlaciones entre la densidad de la madera (ρ) y las medidas de resistencia con el taladro de inspección, obteniendo coeficientes de determinación de 0,57 para los ejemplares de maderas blanda y 0,97 para los ejemplares de madera dura.

1. Introducción

La densidad se correlaciona con las propiedades de resistencia y su valor esta determinado por la proporción entre la pared celular y el lumen de la célula, que a su vez es función de la proporción relativa de los diferentes tipos de células presentes en las maderas de coníferas y frondosas. La barrena de Pressler es la herramienta manual de extracción de muestras de madera en pie más utilizada, mediante esta herramienta se extrae un cilindro en dirección radial al tronco de aproximadamente 5 mm de diámetro, además esta herramienta permite determinar la edad del árbol, el grosor de los anillos de crecimiento, distintas características anatómicas e incluso detectar anomalías en el interior del tronco [1]. Este método de extracción de muestras se ha caracterizado como un método invasivo, con posibilidad de convertirse en un vector de patógenos entre los árboles muestreados, sin embargo, también se ha utilizado para la estimación de la densidad básica de la madera en pie permitiendo un mejor análisis de factores tales como el contenido de humedad de la madera.

En cuanto a la estimación de la densidad de la madera se han llevado a cabo numerosas investigaciones con muy buenas correlaciones, obteniendo valores comparables a la estimación mediante rayos X [2]. Mariño et al. [3] realizaron ensayos en *Pinus sylvestris* L. obteniendo coeficientes de determinación del 0,85, utilizando la media ponderada de la amplitud del perfil del resistógrafo. Acuña et al. [4] obtuvieron coeficientes de determinación de 0,82 para un conjunto de tres especies de coníferas y tres de frondosas, utilizando como variable el valor medio del perfil resistográfico. Por su parte Rinn [5] realizó ensayos en maderas con densidades comprendidas entre 350 a 850 kg/m³ también utilizando el valor medio del perfil resistográfico obteniendo coeficientes de determinación de 0,94.

2. Materiales y métodos

2.1. Muestras

El muestreo utilizado en esta investigación consistió en un ejemplar de *Robinia pseudoacacia* L. (acacia), uno de *Platanus x hybrida* Brot. (plátano), tres de *Ulmus pumila* L. (olmo) y un ejemplar de *Populus alba* L. (chopo) procedentes del arbolado urbano de la ciudad de Madrid. Los ejemplares bajo estudio fueron seleccionados para ser apeados debido a que visualmente presentaban alguna herida externa o bien por encontrarse inclinados, lo que se consideró un riesgo potencial de caída o fallo de los ejemplares.

2.2. Densidad verde en el árbol en pie

De cada ejemplar en pie se tomaron muestras con un taladro de Pressler a dos distintas alturas del fuste: 1,20 m (sección A) y 2,10 m (sección B) dichos puntos de muestra fueron coincidentes con el norte geográfico. Las muestras de 5 mm de diámetro y 15 cm de largo se seccionaron en tres partes iguales e inmediatamente se obtuvo el peso verde de cada sección con una balanza digital portátil (0,01 g de precisión). Así mismo, con un calibre con aproximación de 0,01 mm se determinaron el largo y diámetro, para posteriormente determinar el volumen considerando cada muestra como un cilindro perfecto [6]. Las muestras se llevaron a laboratorio para ser introducidas en la estufa de secado a $103 \pm 2^\circ \text{C}$ y obtener el peso anhidro para calcular el contenido de humedad.

Se estimó la densidad verde (ρ_v), con el volumen y peso verdes (V_v y P_v) determinados en las muestras, mediante la Ecuación 1.

$$\rho_v = \frac{P_v}{V_v} \quad (1)$$

2.3. Ensayos de resistencia a la perforación

El ensayo se realizó con un taladro de inspección marca IML RESI F-400S, el cual tiene una broca que avanza generando una perforación de aproximadamente 2 mm de diámetro y tiene una profundidad máxima de penetración de 40 cm. La velocidad de avance de las mediciones fue de 30 cm/min. El taladro de inspección cuenta con una unidad electrónica que registra en formato digital y las mediciones también quedan registradas automáticamente gracias a que el aparato cuenta con un espacio diseñado para que una aguja dibuje sobre papel cera la gráfica de esfuerzos según los va presentando la broca al penetrar. El equipo cuenta con dos configuraciones de ensayo: madera blanda (1) y madera dura (2).

A partir de los perfiles de resistencia a la perforación se obtuvo el valor de las medidas de resistencia media (RM). Dichos valores son calculados a partir de la energía consumida durante el proceso de perforación del tronco y cuantificada mediante el área del perfil de resistencia de acuerdo con la Ecuación 2 [7]:

$$RM = \frac{\int_0^1 \dot{A}rea}{l} \quad (2)$$

Donde:

RM = consumo medio del equipo por milímetro penetrado

$\int_0^1 \dot{A}rea$ = integral que representa el área bajo la curva en mm²

l = longitud total penetrada en mm

Se obtuvo el valor RM de los perfiles de resistencia en cada una de las secciones (A y B) de los ejemplares, correspondientes a la zona donde se obtuvieron las muestras (barrenas) para determinación de humedad y densidad de la madera. Los resultados obtenidos de los ensayos permitieron establecer las correlaciones entre la densidad de la madera (ρ) y las medidas de resistencia con el taladro de inspección.

3. Analisis y discusión de resultados

3.1.Densidad verde de la madera

Con las muestras obtenidas mediante el taladro de Pressler, se determinaron el contenido de humedad y la densidad verdes de cada ejemplar estudiado. En la Tabla 1 se muestran los valores obtenidos para estos parámetros, así como información sobre la edad relativa, diámetro normal (DAP), estado principal del árbol y tipo de superficie donde se ubicaba cada ejemplar.

Tabla 1. Características dendrométricas, contenido de humedad en pie y densidad verde.

Especie	Edad relativa	DAP (cm)	Estado principal	Tipo superficie	Contenido de humedad en pie (%)	Densidad verde (kg/m ³)
<i>Robinia pseudoacacia</i>	Maduro	27,0	Inclinado	Alcorque	46,5	842,2
<i>Platanus x hybrida</i>	Maduro	41,1	Inclinado	Alcorque	95,2	951,0
<i>Ulmus pumila</i> 1	Maduro	44,2	Inclinado	Alcorque	111,6	908,8
<i>Ulmus pumila</i> 2	Maduro	39,7	Pudrición basal	Alcorque	137,4	1019,9
<i>Ulmus pumila</i> 3	Maduro	33,4	Inclinado	Alcorque	128,4	1024,5
<i>Populus alba</i> L	Maduro	55,5	Pudriciones tronco en	Césped	143,2	865,0

DAP: Diámetro normal

3.2. Cálculo de resistencia media (rm)

Se obtuvo el valor RM de los perfiles radiales de resistencia de cada una de las secciones de los ejemplares, correspondientes a la zona donde se obtuvieron las muestras (barrenas) para determinación de humedad y densidad de la madera (Tabla 2).

Tabla 2. Cálculo de la resistencia media en los perfiles.

Especie	Sección	Configuración ¹	Área (mm ²)	Resistencia media (RM)	Densidad verde (ρ_v) kg/m ³
<i>Platanus x hybrida</i> Brot.	SA	1	5588	37,25	945,9
	SB	1	5860	39,10	935,9
<i>Ulmus pumila</i> L., 1	SA	2	496,7	3,31	928,2
	SB	2	665,9	4,43	899,2
<i>Ulmus pumila</i> L., 2	SA	2	551,8	3,67	968,7
	SB	2	586,1	3,90	986,1
<i>Ulmus pumila</i> L., 3	SA	2	1225,4	8,17	1038,6
	SB	2	908,5	6,58	1017,9
<i>Populus alba</i> L.	SA	1	3087	20,58	851,2

Es importante destacar que la columna configuración, hace referencia a la configuración del tipo de madera. De acuerdo con el Manual de usuario del equipo, 1 corresponde a especies de madera blanda (soft) y 2 corresponde a la configuración para madera dura (hard), la diferencia entre dichas configuraciones es la amplitud del gráfico generado. En ejemplares con la configuración 1 el área bajo la curva será muy superior a la de los ejemplares con la configuración 2. Los perfiles de resistencia a la perforación se interpretan en términos de variación de densidad dentro de una misma sección. De este modo, en una sección es posible distinguir la variabilidad entre las densidades de la madera de primavera y la madera de verano e incluso anchura de los anillos de crecimiento. Por tanto, se origina la posibilidad de establecer una correlación entre el valor medio del perfil de resistencia de una sección (RM) y la densidad media de la madera que compone dicha sección. La ecuación de la regresión obtenida para los perfiles con la configuración 1 y 2, con un coeficiente de determinación (R^2) de 57% y 96% respectivamente, fueron:

$$\text{Densidad (1)} = 5,012 (RM1) + 749,07$$

$$\text{Densidad (2)} = 20,74 (RM2) + 869,20$$

4. Conclusiones

La técnica del taladro de inspección es muy precisa y sensible, moderadamente rápida de ejecutar y ampliamente utilizada no solo en arbolado en pie, sino también en estructuras de madera existentes. Su carácter puntual, junto con la dificultad de conocer el valor real de la densidad a partir de la salida gráfica, sumado el precio del equipo, pueden suponer su mayor limitación de uso, sin desfavorecer las ventajas que tiene respecto al taladro de Pressler que genera un orificio mucho mayor para obtención de muestra y además generalmente implica el traslado de muestras a un laboratorio.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la empresa Ferrovial S.A. por facilitarnos los árboles muestreados. También agradecen al Laboratorio de la Madera del Centro de Investigaciones Forestales (INIA-CSIC) y el Laboratorio de Industrias de Productos Forestales (Universidad Politécnica de Madrid) por facilitar sus instalaciones para realizar las pruebas.

Referencias

- [1] López, R. D. M. (2016). Métodos no destructivos de estimación de la densidad de la madera. Tesis doctoral, Universidad de Santiago de Compostela. España. 210 p.
- [2] Rinn, F.; Schweingruber, F.H.; Schar, E. (1996). Resistograph and X- ray density charts of wood: comparative evaluation of drill resistance profiles and X- ray density charts of different wood species. *Holzforschung*. 50: 303-311. doi.org/10.1515/hfsg.1996.50.4.303
- [3] Mariño, R.; Fernandez, M^a. E.; Fernández, C. (2002). Análisis comparativo de la densidad de la madera de *Pinus sylvestris* L. mediante la utilización del resistógrafo, *Revista CIS Madera*. 9: 60-70.
- [4] Acuña, L.; Basterra, A.; Casado, M^a M.; López, G.; Ramón-Cueto, G.; Relea, E.; Martínez, C.; González, A. (2011). Application of resistograph to obtain the density and to differentiate wood species. *Materiales de Construcción*. 61: 451-464. doi.org /10.3989/mc.2010.57610
- [5] Rinn, F. (2012). Basics of typical resistance-drilling profiles. *Western Arborist Winter*. 17: 30–36.
- [6] Virgen-Cobos, G. H.; Olvera-Licona, G.; Hermoso, E.; Esteban, M. (2022). Nondestructive Techniques for Determination of Wood Mechanical Properties of Urban Trees in Madrid. *Forests*, 13(9): 1381. doi.org/10.3390/f13091381
- [7] Morales-Conde, M. J. (2012). Estudio y revisión de técnicas no destructivas (termografía, ultrasonidos y resistógrafo) aplicadas a la inspección e intervención de forjados de madera. Tesis doctoral, Universidad de Sevilla. España. 664 p.

1076

ESTRATÉGIAS SUSTENTÁVEIS NA CONSTRUÇÃO DE INSTITUIÇÕES EDUCACIONAIS: ANÁLISE DA EVOLUÇÃO DOS SISTEMAS CONSTRUTIVOS EM ESCOLAS E CRECHES EM SÃO PAULO

Aline Schmid¹; Erica Shiose¹; João Dantas¹

¹ Fundação para o Desenvolvimento da Educação; FDE

Palabras clave / Palavras-chave:

Brasil, Edifício escolar, FDE, Mass timber, Pré-fabricação

Resumen / Resumo:

No Brasil, embora não esteja consolidada a utilização de *Mass Timber*, há iniciativas que demonstram uma tendência de abertura para a adoção de técnicas construtivas alternativas. Aborda-se nesse artigo o cenário de evolução dos sistemas construtivos em instituições escolares no Estado de São Paulo, especialmente sob a perspectiva da atuação desempenhada pela Fundação para o Desenvolvimento da Educação do Estado de São Paulo, responsável pela construção de escolas públicas no mais populoso estado brasileiro. O estudo de caso da intervenção na Escola Estadual Plínio Gonçalves de Oliveira Santos aponta que, no âmbito das construções públicas brasileiras, já há o reconhecimento da capacidade do sistema construtivo em madeira engenheirada, enquanto alternativa sustentável para atendimento da população diante de uma situação emergencial. Há, ainda, inúmeros outros benefícios tangíveis e palpáveis que têm sido aventadas para fundamentar a sua consolidação na construção de instituições de ensino brasileiras. Essas vantagens podem ser divididas em duas categorias: funcional e desempenho, com os benefícios de desempenho sendo mais diretamente relacionados com as escolas em particular. A justificativa da utilização de sistemas construtivos em madeira no âmbito da construção de edifícios escolares ainda encontra, no entanto, desafios a serem superados destacando-se: (i) a necessidade de compatibilização da demanda por construções com esses sistemas construtivos com o nível de maturidade do mercado nacional responsável pela sua oferta; (ii) a superação da lógica de a contratação pública ser pautada pela busca do menor preço, em detrimento de uma avaliação mais profunda sobre a qualidade do objeto da contratação.

1. Introdução - contextualização do cenário da construção brasileira

Embora a utilização de técnicas construtivas alternativas, como o *Mass Timber*, seja uma realidade consolidada em diversos países mais desenvolvidos, esse fenômeno ainda não está completamente presente em países em desenvolvimento, como o Brasil, onde ainda impera, com algumas raras exceções, uma “tradição construtiva” da adoção de materiais como a argamassa e o concreto armado, que impede maior avanço tecnológico [1]. É possível sentir uma certa resistência daqueles que optam por técnicas construtivas em relação aos avanços tecnológicos, que muitas vezes decorre de um desconhecimento técnico, gerando receios infundados como o risco de incêndio e a “fragilidade” do material.

2. Pré-fabricados em edifícios escolares em são paulo: a experiência da fde

Essa realidade, contudo, vem paulatinamente se transformando. No âmbito do Estado de São Paulo já há, por exemplo, vasta produção normativa que justifica e incentiva a utilização de materiais sustentáveis na construção de obras públicas [2]. Mais especificamente no campo da construção de edifícios escolares, a Fundação para o Desenvolvimento da Educação já experimenta, desde o início dos anos 2000, uma introdução à industrialização dos materiais construtivos a partir da adoção parcial de estruturas pré-fabricadas como método de racionalização do atendimento à vertiginosa demanda populacional [3]. A preocupação, que inicialmente se voltava para a produção de resíduos na etapa construtiva, agora se soma à atenção ao impacto ambiental causado ao longo de todo o ciclo produtivo [4]. Recentemente, a abertura para novas tecnologias tem ganhado proeminência, em especial diante da consciência de sua obrigatoriedade como forma de atender ao apelo da sustentabilidade.

3. Aplicação prática em situação emergencial: estudo de caso de escola do litoral paulista

Um caso interessante que demonstra a atual relação da burocracia estatal brasileira com a utilização de novas tecnologias é a reconstrução da Escola Estadual Plínio Gonçalves de Oliveira Santos. Essa instituição, fundada há 42 anos, está localizada em região do litoral de São Paulo que, em fevereiro de 2023, foi atingido por fortes chuvas. Em razão desse evento climático, a escola sofreu severos impactos. Para reabilitar a Escola, O Governo do Estado de São Paulo optou por um projeto arquitetônico inovador e sustentável, com obras de alvenaria para instalação de espaços modulares e pré-fabricados em madeira engenheirada. Esse estudo de caso demonstra a capacidade de atendimento do sistema construtivo em madeira engenheirada, enquanto alternativa sustentável para atendimento da população diante de uma situação emergencial.

Além da possibilidade de ação rápida diante de casos emergenciais, dada a velocidade de construção, existem outras duas grandes oportunidades para a adoção do uso de madeira engenheirada nas escolas: para novos edifícios escolares e para ampliações de unidades já existentes. A adoção do sistema pré-fabricado em madeira engenheirada tem o potencial de gerar uma produção em larga escala, o que por si só já ajudaria a reduzir o custo inicial diante da demanda da Fundação.

4. Benefícios da madeira engenheirada em instituições de ensino

Se o impacto do tempo já é um benefício percebido enquanto apto a justificar a utilização da madeira enquanto sistema construtivo, há, ainda, inúmeros outras vantagens que têm sido aventadas para fundamentar a sua consolidação na construção de instituições de ensino brasileiras. De fato, parece haver um reconhecimento de que a busca por alternativas que gerem menor impacto ambiental, ou até mesmo que sejam benéficas sob a perspectiva socioambiental, é imperativa.

Estudos sobre o uso de madeiras destacam os aspectos sociais, econômicos, políticos, além, é claro, as razões ambientais para o uso de madeira engenheirada como um sistema dentro da produção da construção civil como um todo. Existem benefícios específicos tangíveis e palpáveis para a utilização de madeira em edifícios escolares. Esses benefícios podem ser divididos em duas grandes categorias: funcional e desempenho, com os benefícios de desempenho sendo mais diretamente relacionados com as escolas em particular [5].

Especificamente sobre o desempenho, diversas pesquisas têm mostrado que a resistência e a versatilidade da madeira a tornam um material de construção muito indicado para escolas e outros programas, ajudando a criar ambientes seguros, saudáveis e inspiradores. Ademais, designs que empregam a madeira como acabamento auxiliam na construção de um ambiente biofílico, bastante propício para a saúde e bem-estar de um ambiente de ensino [6].

Alam-se a esses benefícios, a justificar seu emprego para essa finalidade específica, outros mais gerais como o desempenho deste material (i.e., resistência e durabilidade) [7], seus impactos ambientais (i.e., sequestro de carbono, redução das emissões de gases de efeito estufa), bem como aspectos sociais (i.e., desenvolvimento da economia, capacitação de mão de obra, criação de empregos).

Em geral, algumas vantagens que já podem ser percebidas na utilização desse sistema construtivo em obras em geral, ganham especial relevância para a construção de unidades educacionais, considerando a própria dinâmica que acontece em um espaço público de atendimento à população.

5. Desafios a serem superados

Apesar das inúmeras vantagens, já utilizadas ou não como justificativa para o emprego da madeira na construção de instituições de ensino, há também desafios a serem superados.

O primeiro deles diz respeito à dinâmica a ser aperfeiçoada e consolidada entre o desenvolvimento do mercado nacional (i.e., oferta) [7] e o amadurecimento da demanda pela madeira para a construção de obras públicas, mais especificamente de instituições educacionais. Nessa dinâmica, há uma série de aspectos a serem endereçados tais como a necessária tropicalização da madeira e a parametrização de requisitos e exigências de desempenho do material no contexto da homologação de produtos. Em outras palavras, é necessária a busca por uma simbiose entre o desenvolvimento do mercado nacional e a segurança da existência de demanda para o material.

O segundo desafio, consiste na superação da lógica da contratação pública enquanto busca por um menor preço, pouco atenta para questões de qualidade (i.e., durabilidade, manutenção etc). Ainda se mostra necessária a inclusão de outros critérios e práticas na contratação pública que possam garantir melhor resultado. Nesse contexto, o processo de contratação precisa levar em consideração, não apenas o menor preço no momento da contratação de uma obra, mas também itens relevantes como a eficiência pós implantação (a partir de plano de manutenção e durabilidade da edificação), atendimento a população em menor tempo e com maior controle tecnológico, além da manutenção da vida no planeta e o bem-estar social.

Para superar esses desafios, a urgência ambiental parece ser o principal combustível [8]. De fato, o momento é mais do que propício para aflorar estratégias sustentáveis na construção de obras públicas, inclusive de instituições educacionais.

O que se observa é que os países que utilizam o poder do estado de fomentar uma iniciativa “verde” conseguem impulsionar o mercado nesse sentido, provocando impactos diretos ao setor produtivo em uma espécie de “efeito dominó”. Para o estímulo de práticas positivas, governos de várias esferas adotam critérios sociais e ambientais nas licitações de serviços gerais, obras e compras de materiais. Ao se engajar em uma proposta de desenvolvimento sustentável, o poder público deve interceder para transformar padrões produtivos e as formas de comprar e consumir.

6. Conclusão

A madeira, enquanto sistema construtivo, apresenta, além de benefícios gerais, vantagens específicas e relevantes na sua aplicação para construção e ampliação de instituições escolares. No âmbito da FDE, há recente caso de utilização da madeira que demonstra a sua pertinência, enquanto alternativa sustentável para atendimento da população diante de uma situação emergencial. Atualmente, utilização desse sistema construtivo se encontra em um momento importante, de reconhecimento das suas inúmeras vantagens. Há, contudo, desafios importantes a serem superados para que seja possível atingir um estado de ampliação, maior maturidade e consolidação da madeira enquanto estratégia sustentável na construção de instituições educacionais. A superação desses desafios é premente, dado o reconhecimento de que a busca por alternativas que gerem menor impacto ambiental, ou até mesmo que sejam benéficas sob a perspectiva socioambiental, é imperativa.

Agradecimentos

Gostaríamos de agradecer à FDE pela experiência e conhecimento adquiridos, especialmente no campo de projeto e construção de instituições escolares, bem como pelo posicionamento institucional de abertura a novos sistemas construtivos. Ademais, agradecemos especialmente a todos os integrantes da Gerência de Inovação e Tecnologias para a Edificação da FDE pela energia despendida para encontrar e aplicar soluções mais aderentes aos novos tempos, bem como para manter a contínua atualização com as melhores práticas de construção.

REFERÊNCIAS

- [1] Farah, M.F.S (1996) Processo de trabalho na Construção Civil: Tradição e Mudança. Anablume. São Paulo.
- [2] Cardelli, R. A. A. (2015) Licitações sustentáveis em obras públicas. Trabalho final de curso de pós-graduação em projetos sustentáveis. Universidade do Paraná. Pp. 3-8.
- [3] Francisco Ferreira, A. (org.) et al. (2006) Arquitetura escolar paulista: estruturas pré-fabricadas. Fundação para o desenvolvimento da Educação do Estado de São Paulo - FDE.
- [4] Blumenschein, R.N. (2004) A sustentabilidade na cadeia construtiva da indústria da construção. Tese de Doutorado. Centro de Desenvolvimento Sustentável. Universidade de Brasília.
- [5] Thinkspace. Fast+Epp (2022) Wood use in British Columbia Schools – A practical report for school districts, administrators and design professionals. Forestry Innovation Investment Ltd.
- [6] Lowe, G (2020). Wood, Well-being and Performance: The Human and Organizational Benefits of Wood Buildings. Disponível em: https://www.naturallywood.com/wp-content/uploads/wood-well-being-and-performance_report_graham-low.pdf. Acesso em 03.12.2023
- [7] Lotufo, G. (2018) Cross Laminated Timber (CLT) no Brasil: processo construtivo e desempenho. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Universidade de São Paulo. São Paulo. Pp. 21-30.
- [8] Edenhofer, O. et al (2014). IPCC, Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change, Contribution of Working Group to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press

1077

ESTUDIO COMPARATIVO DE LA CONSTRUCCIÓN DE LOS ENTRAMADOS DE MADERA EN LA ARQUITECTURA DE LOS NÚCLEOS URBANOS DE MADRID Y MÁLAGA

Sonsoles González Rodrigo¹; Beatriz González Rodrigo¹; M^a Victoria Sierra Ramos²; Gregorio García López De La Osa¹

¹ Universidad Politécnica de Madrid

² OLCASA OBRAS Y CONSTRUCCIONES S.L.

Palabras clave / Palavras-chave:

Edificaciones del s. XIX; Rehabilitación; Arquitectura tradicional; Casas corredor

Resumen / Resumo:

Durante el s. XIX los núcleos urbanos experimentaron un notable desarrollo impulsados por sucesos relevantes tales como la Revolución Industrial, la desamortización y las exigencias de la burguesía. Ciudades como Madrid y Málaga, por sus implicaciones políticas y geográficas, fueron ejemplos representativos de este auge. En la actualidad, la gentrificación está forzando el traslado de los antiguos moradores, dando paso a nuevos usuarios que buscan una modernización en el acondicionamiento de las viviendas, sin perder la esencia de la tradición del patrimonio construido. En ocasiones, la falta regulación y una escasa base documental, han propiciado que algunas de estas intervenciones sean poco conservacionistas y hayan provocado la sustitución de gran parte de sus elementos históricos. El objeto de este trabajo es recoger y comparar los sistemas de entramados tradicionales de las edificaciones destinadas a arquitectura doméstica y construcciones durante el siglo XIX y principios del XX, enfocando el estudio una tipología habitual en los centros urbanos como son las casas corredor, llamadas *corralas* en la construcción madrileña y *corralones* en la malagueña.

1. Introducción

Los cambios sociales y económicos que vienen experimentando los cascos de las grandes urbes en las primeras décadas del s. XIX, han favorecido el incremento de las intervenciones para la rehabilitación de sus inmuebles, por lo que parece un momento adecuado para analizar las características de sus sistemas constructivos, a fin abordar de forma respetuosa cualquier trabajo y prescribir instrucciones precisas para su protección [1]. Fue durante el s. XIX y principios del s. XX surge la necesidad de alojar a una clase obrera procedente de los alrededores y que llega a las grandes ciudades en busca de trabajo, apareciendo entonces la mayoría de los corralones o corralas, así como bloques en altura destinados a ser viviendas en alquiler. A fin de agilizar los tiempos de construcción, que permitían reducir costes, se aplicaron los conocimientos y técnicas heredadas de la arquitectura vernácula, de sobra conocidos, empleando para ello materiales nobles como la madera. De esta forma las estructuras entramadas de madera se desarrollaron en los edificios en altura de las grandes ciudades,

siendo Madrid y Málaga dos de ellas [2, 3, 4]. Las necesidades de modernización de estos inmuebles a lo largo del tiempo, así como su inevitable deterioro, han repercutido en la pérdida parcial, o incluso completa de la estructura original, sufriendo estos últimos una demolición completa o vaciado del edificio, manteniéndose únicamente la fachada (y la escalera), como elemento protegido. En cualquier caso, estas rehabilitaciones no fueron documentadas, desfavoreciendo el conocimiento de las estructuras y dando lugar a una falta de bibliografía, estudios y análisis de las edificaciones pasadas, que se recogen en algunos tratados [5]. Los procedimientos antaño empleados para la solicitud de licencias de construcción exigían un alzado de fachada y una somera representación en planta de la distribución, por lo que ha sido necesario para esta investigación buscar un enfoque teórico apoyado el trabajo de reconocimiento de diversas edificaciones, en ambos núcleos urbanos, lo que ha permitido ampliar la documentación de los sistemas constructivos empleados. A pesar de su interés, hay una gran ausencia de estudios de investigación que aborden las distintas tipologías de forma comparada y el estudio detallado de los sistemas constructivos, encontrando, sin embargo, un enfoque más historicista [6].

2. Metodología

Con el fin de establecer una base necesaria para este trabajo, se ha realizado un estudio exhaustivo de la bibliografía existente sobre la construcción entramada española, contextualizando como incidieron las variables geográficas, históricas y sociales en su establecimiento y evolución. Así mismo, se ha llevado a cabo un trabajo de campo de inspección y análisis de diversas construcciones existentes en la Península Ibérica, enfocándose fundamentalmente en la construcción de entramados de madera, analizando también los lugares de suministro de la materia prima de cada una de las regiones, así como las especies más utilizadas y las variables que influyeron a la hora de trabajar con los materiales del lugar. Paralelamente, ha sido necesario la búsqueda de información en los Archivos Municipales y Provinciales de las localidades estudiadas, así como los encontrados en la Gerencia Municipal de Urbanismo. Finalmente se han realizado números vistas personales con Arquitectos y Técnicos involucrados en el restudio, investigación y/o recuperación del patrimonio construido en ambas ciudades, destacando la colaboración de Enrique Nuere Matauco [1] .



Figura 1. Izqda. Corralón de Santa Sofía. C/Montes de Oca 6 c/v a C/ Estébanez Calderón (Málaga). Dcha. Corrala en c/ Mesón de paredes c/v a c/Sombretere y c/ Tribulete. (Madrid). Fuente: M^a Victoria Sierra Ramos (2021).

3. Resultados y discusión

Las fachadas de las edificaciones estudiadas en la ciudad de Madrid están mayoritariamente formadas por una base de granito o sillería con en su planta baja, para posteriormente continuar con fábrica de ladrillo visto, que puede estar total o parcialmente revestido, o muro entramado de madera cuajado

hasta las plantas. En Málaga, por el contrario, aunque en su mayoría, la base arranca con un zócalo de piedra no se han encontrado evidencias de muros compuestos con madera, siendo en su gran mayoría fábrica de ladrillo revocado en su parte exterior o fábricas mixtas de mampostería. Los muros medianeros, muros de patio y las particiones interiores en la capital están fundamentalmente ejecutadas con estructura entramada, mientras que en Málaga se han resuelto con muro de fábrica o mampostería ordinaria, con espesor adecuado a la función que desempeñan.



Figura 2. Parición interior. Izqda. Vivienda en C/ Serrano 72 (Madrid). Dcha. Vivienda en C/ Nosquera 9 (Málaga). Fuente: M^a Victoria Sierra Ramos (2021).

En relación a los entrepisos, la casuística es variada, presentando ambas ciudades, no obstante, claras diferencias en su configuración. En Madrid, se han localizado gran cantidad de suelos de madera con una separación o intereje de “hueco por macizo”, presentando viguetas escuadradas sustentadas en los muros entramados principales o bien sobre vigas cargaderos dispuestos perpendicularmente. Su relleno es variado, encontrado cascotes, yesones, y piezas cerámicas varias, destacando los botes como elemento de aligeramiento. Por el contrario en Málaga, la mayoría de sus entramados horizontales son entablados, con viguetas normalmente escuadradas sobre las que se apoyan los tableros superiores que servirán de base para el solado del piso.

Por otro lado, en la ciudad de Málaga se han identificado que las carreras, que forman parte de la estructura principal están formadas por dos o tres piezas de pequeña escuadría acopladas entre sí, formando una sección cuadrada mayor. Situación similar a la que ocurre con los pies derechos. En Madrid, sin embargo, estos elementos se componen de una única pieza de madera con la escuadría necesaria según su función.



Figura 3. Muro Medianero. Izqda. Posada del Dragón, Cava Baja (Madrid). Fuente: Sonsoles González Rodrigo (2009). Dcha. Vivienda en C/ Nosquera 9 (Málaga). Fuente: M^a Victoria Sierra Ramos (2021).

4. Conclusiones

Las estructuras de entramado las edificaciones del s.XIX y principios del XX de las ciudades de Madrid y Málaga, aunque tengan una morfología funcional de similar, presentan numerosas diferencias. En Madrid la solución constructiva del conjunto de las edificaciones se resuelve con estructura entramada tanto en forjados, particiones y cubiertas, empleando elementos resistentes de madera en todo su conjunto, mientras que, en Málaga, la madera se emplean los entrepisos y los elementos de cubierta, siendo minoritarios los edificios en los que aparecen los muros de entramados de madera como elemento portante. En esta ciudad mediterránea, es más habitual el uso de la piedra, la tierra o la arcilla frente a la madera. Además, debido a su proximidad a la costa, son pocos los edificios que presentan sus entramados vistos, que se protegen recurriendo a revocos exteriores, frente a las edificaciones con fábrica de ladrillo que hay en la ciudad de Madrid. En cuanto al origen de la materia prima, aunque ambas edificaciones recurrieron al pino, son los pinares de Valsaín, en Segovia y las Navas del Marqués en Ávila los que abastecieron de madera a la capital, mientras hay indicios de que la empleada en Málaga pudiese provenir del Norte de Europa y de América, Este acceso marítimo, justificaría el hecho de que en la provincia andaluza los elementos estructurales más importantes, como pies derechos, cargaderos y vigas, estuviesen formadas por el acoplamiento de dos o tres elementos de menor escuadría en yuxtaposición, mientras que en Madrid, la cercanía a los aserraderos permitiría escuadrías a medida, observándose secciones estructurales de una sola pieza y de mayor área.

Referencias

- [1] Nuere, E. y Cabeza, P., (2021). Rehabilitación, madera en la edificación. S.I.: Madrid: AITIM. ISBN 978-84-87381-54-6..
- [2] Santa Cruz-Astorqui, J. y del Río M., 2014. Modelo de comportamiento estructural de muros entramados de madera en el siglo XIX en España. *Informes de la Construcción*, vol. 66, no. 536. ISSN 19883234. DOI 10.3989/ic.14.030.
- [3] González-Redondo, E., (2020). Las “casas a la malicia” en Madrid y su transformación en edificios de entramado de madera “modernos” (1656-1868): construcciones originales vs. estructuras añadidas. *Informes de la Construcción*, vol. 72, no. 559, pp. 358. ISSN 0020-0883. DOI 10.3989/ic.74057.
- [4] García Gómez, F., (2017). Rosario Camacho y la arquitectura malagueña del XIX. *Boletín de Arte*, no. 34, pp. 382-384. ISSN 0211-8483. DOI 10.24310/bolarte.2013.v0i34.3547.
- [5] Ger Y Lobe, F., (1898). *Tratado de Construcción civil*. Est. Tip. Badajoz: s.n.
- [6] Fernández Martín, R., Santa Cruz Astorqui, J., Arbaiza Blanco-Soler, S. y del Río Merino, M., (2016). Caracterización tipológica del espacio edificado de las casas de corredor. El caso de las ciudadelas del casco histórico de La Habana y las corralas madrileñas. *Informes de la Construcción*, vol. 68, no. 541. ISSN 19883234. DOI 10.3989/ic.15.0367.

1078

ESTUDIO COMPARATIVO DE PANELES DE MADERA LAMINADA MASIVA UNIDOS CON DISTINTOS TIPOS DE CLAVIJAS

Gastón Bruzzone González¹; Stephany Arrejuría De Giuda²; Sebastián Quagliotti Estradé³; Daniel Godoy Machado⁴; Silvia Böthig Gargiulo²; Laura Moya⁵

¹ Facultad de Agronomía, Universidad de la República;

² Fundación Latitud, Laboratorio Tecnológico del Uruguay

³ Departamento de Productos Forestales, Laboratorio Tecnológico del Uruguay

⁴ Facultad de Ingeniería, Universidad de la República

⁵ Facultad de Arquitectura, Universidad ORT

Palabras clave / Palavras-chave:

DLT, NLT, WNLT, Clavijas de madera, Madera masiva, Pino uruguayo

Resumen / Resumo:

Este artículo presenta los resultados experimentales de paneles de madera laminada masiva contruidos con tablas de pino uruguayo de rápido crecimiento. La fabricación se realizó con tablas de madera C14 y la unión entre ellas mediante tarugos de madera de 20 mm de diámetro, clavos de madera y clavos de acero colocados neumáticamente, de 5,3 y 3,2 mm de diámetro, respectivamente. Así se generaron paneles laminados tarugados (DLT), laminados clavados con clavos de madera (WNLT) y laminados clavados con clavos de acero (NLT). Se construyeron seis series de paneles de tamaño estructural, cada una compuesta por tres unidades, considerando además del tipo de clavija, dos patrones de clavado, en línea recta horizontal y zigzag, y dos espaciamientos entre conexiones, 300 y 150 mm. Los paneles se ensayaron a flexión en 4 puntos de acuerdo a EN 408 para obtener las propiedades de flexión. Los resultados indicaron que la resistencia (16,8 – 29,9 kN/mm²) y la rigidez (6,76 – 8,08 kN/mm²) de los paneles DLT, WNLT y NLT no mostraron diferencias significativas. En general, en todos los casos la falla fue en tracción debido a desviaciones pronunciadas de las fibras y presencia de nudosidades cerca de la aplicación de carga. Estos resultados sugieren que paneles de madera masiva contruidos con pinos de Uruguay son una alternativa viable para entresijos sometidos a cargas habituales en viviendas.

1. Introducción

En las últimas décadas la industria de la madera ha evolucionado gracias al desarrollo de nuevas tecnologías que permiten su uso intensivo en la arquitectura y obras civiles [1]. Los sistemas constructivos de madera masiva comprenden una familia de productos caracterizada por tablas de madera unidas mediante adhesivos, clavijas de acero o de madera que, según su diseño, pueden funcionar estructuralmente como vigas, columnas, losas y muros [2]. Estos productos han ampliado la oferta de madera estructural y son adoptados cada vez más por arquitectos e ingenieros, debido a que su empleo permite una gran rapidez y facilidad en la ejecución de obras, además de las propiedades estructurales (resistencia y rigidez), el atractivo estético y los beneficios que su empleo conlleva para el

medioambiente [3]. Estimaciones realizadas por el Ministerio de Vivienda y Ordenamiento Territorial (MVOT) indican que en Uruguay existe un déficit habitacional de 105.545 viviendas [4]. Las políticas gubernamentales están impulsando el uso de sistemas constructivos no tradicionales, particularmente en madera, para la producción de viviendas de interés social. El objetivo principal de este trabajo es evaluar y comparar el comportamiento en flexión de paneles de madera masiva (DLT, WNLT y NLT) fabricados con madera de pino de rápido crecimiento, y clavijas de madera y de acero.

2. Materiales y métodos

El diseño experimental consistió en fabricar y analizar el comportamiento de tres series de paneles de madera aserrada de tamaño estructural contruidos con distintos tipos de clavijas: pasadores de madera, de aquí en adelante denominados “tarugos”, clavos de madera y clavos de acero. La denominación de los paneles, tipo de clavija, patrón de clavado, separación entre elementos de conexión y cantidad de muestras se indican en la Tabla 1.

Tabla 1. Descripción de paneles laminados macizos.

Denominación	Tipo de clavija	Patrón de clavado	Distancia entre clavijas	Número de muestras
DLT	Tarugos	en línea recta	300 mm	3
WNLT	Clavos de madera	zig-zag	150 mm	3
NLT	Clavos de acero	zig-zag	150 mm	3

2.1. Materiales

La madera utilizada en este estudio fue suministrada por un aserradero nacional dedicado al procesamiento de madera de *Pinus taeda*. Se seleccionaron 128 tablas clasificadas C14, de 36 x 147 x 2850 mm³ provenientes de un aserradero nacional. Todas las tablas se equilibraron a un CH del 16% ($\pm 1\%$). Se utilizaron tres tipos de clavijas: a) pasadores, de aquí en adelante denominados “tarugos”, de madera de *Eucalyptus grandis* de origen nacional de 20 mm de diámetro y 350 mm de longitud, b) clavos de madera densificada de *Fagus sylvatica* L. de 5,3 mm de diámetro y 9 mm de longitud, marca LIGNOLOC, y c) clavos de acero espiralados de 3,1 mm de diámetro y 100 mm de longitud, Los tarugos se almacenaron en cámara climatizada hasta alcanzar 7% (± 1) de CH.

Cada panel compuesto de siete láminas conectadas por clavijas de madera o de acero. Las dimensiones finales de los paneles fueron 147 x 252 x 2850 mm³.

2.2. Procedimiento experimental

Previo a la fabricación de los paneles, todas las láminas se sometieron a ensayos no destructivos (NDT) para evaluar el módulo de elasticidad dinámico (Ed) mediante el método de onda de impacto y utilizando equipo Fakopp (Microsecond Timer). Se realizaron ensayos de flexión en cuatro puntos en los paneles para obtener la resistencia a la flexión (fm), el módulo de elasticidad local (Em,l) y el módulo de elasticidad global (Em,g) de acuerdo a EN 408 [5]. Los paneles se orientaron de forma tal de representar el comportamiento de una losa de piso y las dos cargas fueron aplicadas en todo el

ancho del panel hasta generar la rotura. La configuración del ensayo se muestra en la Figura 1. Para cada panel, cerca de la zona donde se produjo el fallo, se extrajo una probeta de 25 mm de longitud y de todo el ancho del panel, para determinar el contenido de humedad (CH) y la densidad de cada una de las láminas, de acuerdo a EN 13183-1 [6].

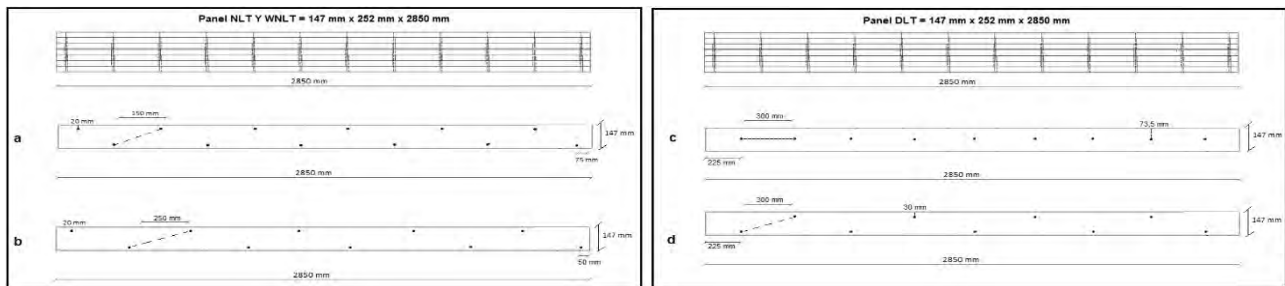


Figura 1. Configuración de paneles con: a) clavos de madera ó acero y b) tarugos de madera.

El análisis estadístico incluyó test de normalidad y análisis de varianza (ANOVA) para determinar diferencias significativas de resistencia y rigidez de los paneles DLT, WNLT y NLT. Adicionalmente, se realizaron pruebas t-student para evaluar los efectos del tipo de clavija y/o espaciamiento i.e., tarugo vs clavo de madera y clavo de madera vs clavo de acero.

3. Resultados

Los valores promedio de E_d y densidad de las 128 láminas evaluadas por NDT fueron de 10,70 kN/mm² (COV=12%) y 450 kg/m³ (COV=9%), respectivamente. La configuración de cada panel incluyó siete láminas, una de las cuales seleccionada del grupo 4, i.e., con los mayores valores de E_d (7,22-14,89 kN/mm²) se ubicó en el centro de la sección transversal. Los resultados de los ensayos de flexión de los paneles se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2. Propiedades de flexión de paneles DLT, WNLT y NLT. Valores medios y DE.

Series	DLT	WNLT	NLT
n	3	3	3
MOR [N/mm ²]	23,3 (6,55)	22,6 (4,06)	24,9 (1,06)
MOE global [N/mm ²]	7,75 (0,44)	7,30 (0,27)	7,03 (0,29)
MOE local [N/mm ²]	8,13 (0,46)	7,65 (0,29)	7,37 (0,30)

En el gráfico carga-deformación los paneles DLT, WNLT y NLT presentaron un comportamiento lineal hasta el límite de proporcionalidad, seguido por un tramo no lineal hasta alcanzar la carga máxima.

El patrón de falla fue similar en las tres series, roturas sucesivas de las láminas, seguido por una recuperación de carga hasta lograr la falla completa del panel. Se infiere que este comportamiento se debió a la configuración del panel donde se mezclaron láminas con propiedades elásticas de diferentes rangos y probablemente de diferentes resistencias, donde la tensión se transfiere entre láminas contiguas mediante las clavijas, y al agotarse la capacidad resistente de una lámina, la clavija la transfiere a la contigua hasta fallar, y así sucesivamente. El comportamiento para las tres series se visualiza en la Figura 2.

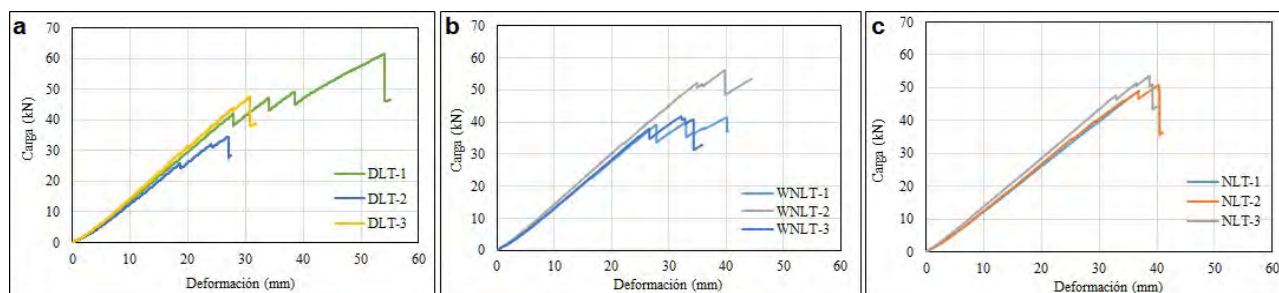


Figura 2. Gráficos carga-deformación de paneles de tamaño estructural. a. Panel DLT. b. Panel WNLT. c. Panel NLT.

El Análisis de Varianza (ANOVA) de las series de paneles DLT, WNLT y NLT indicó que los valores de las propiedades de flexión fueron similares entre series ($\alpha = 0,05$). Los resultados de las pruebas t-student indicaron que los paneles WNLT y NLT no mostraron diferencias significativas ($\alpha = 0,05$) con respecto a la resistencia y rigidez, sugiriendo que el material del clavo de madera o acero no influyó en la capacidad portante del panel. Asimismo, no se observaron disparidades significativas entre las series DLT y WNLT, lo que sugiere que el tipo y espaciado de clavijas de madera no influyeron en las propiedades estructurales en flexión. El patrón de falla de los paneles fue similar en las tres series. Se observó de manera secuencial en el lado de tracción del panel, atribuible a nudos o desviación de la veta. En los paneles WNLT se observó deslaminación y rotura de los clavos de madera al alcanzar la falla total. En los paneles DLT se visualizó que la mayor parte de las rupturas se propagaron a lo largo de la línea de la conexión tarugada. No se registraron fracturas en los tarugos a simple vista. Se muestra un fallo típico de paneles DLT, WNLT y NLT en flexión en la Figura 3.



Figura 3. Patrón de falla en paneles de tamaño estructural en flexión. a. Panel DLT. b. Panel WNLT. c. Panel NLT

4. Conclusiones

Las propiedades de flexión de los paneles DLT, WNLT y NLT no presentaron diferencias significativas. Los modos de rotura de los paneles se debieron a fallas por tracción, originados mayormente por desviaciones pronunciadas de las fibras y por desviaciones debidas a la presencia de nudos principalmente en la zona central de carga. Los hallazgos preliminares de este estudio sugieren que los paneles DLT y WNLT fabricados con pino de origen nacional son una alternativa válida para ser usados en pisos de viviendas.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Agencia Nacional de Investigación e Innovación, ANII por los fondos para este proyecto (PR_FMV_2019_1_156162), y a la empresa Enkel Group por la colaboración en la fabricación de los paneles WNLT de tamaño.

Referencias

- [1] Rajendra, B. (2020) Development of a cost prediction model for mass timber gravity frame construction. Thesis Master of Science. Michigan State University, United States. 140 p. <https://doi.org/doi:10.25335/sdt9-7064>
- [2] Hernández, C. (2018) Construcción con madera masiva: propuesta para construir vivienda vertical sustentable en Zapopan. Tesis Mag. en Proyectos y Edificación Sustentables. Universidad Jesuita de Guadalajara, México. 177 p. <http://hdl.handle.net/11117/5399>
- [3] Ahmed, S. (2021) Evaluating the feasibility of mass timber as a mainstream building material in the U.S. construction market: industry perception, cost competitiveness, and environmental performance analysis. Thesis Doctor of Civil Engineering. Oregon State University, United States. 187 p. DOI: 10.13140/RG.2.2.21991.16809.
- [4] Ugarte, J.; Sierra, A.; Codriansky, K. (2022) Hoja de ruta para la construcción de vivienda social en madera en Uruguay. Ministerio de Vivienda y Ordenamiento Territorial, Uruguay. 193 p.
- [5] European standard (2019) EN 408:2011+A1:2012. Timber Structures. Structural Timber and Glued Laminated Timber. Determination of Some Physical and Mechanical Properties. European Committee of Standardization (CEN), Brussels, Belgium.
- [6] European standard (2002) EN 13183-1. Moisture Content of a Piece of Sawn Timber-Part 1: Determination by Oven Dry Method. European Committee of Standardization (CEN), Brussels, Belgium.

1079

ESTUDIO DE LA CARPINTERÍA DE MADERA EN EDIFICIOS PROTEGIDOS. IGLESIA DE NUESTRA SEÑORA DE MONTSERRAT (MADRID)

Esther Moreno Fernández¹; Javier Pinilla Melo¹; Francisco González Yunta¹; Jose Ramón Aira Zunzunegui¹

¹ Universidad Politécnica de Madrid

Palabras clave / Palavras-chave:

Iglesia de Montserrat, Pedro Ribera, BIC, Portón, Restauración madera, Recubrimientos

Resumen / Resumo:

La iglesia de Nuestra Señora de Montserrat en Madrid se comenzó a construir en 1668. En 1716 se hizo cargo de las obras el arquitecto Pedro Ribera, discípulo de José Benito de Churriguera, máximo representante del Barroco exaltado en Madrid. Durante las obras de restauración de la fachada principal se realizó una revisión histórica incluyendo las diferentes intervenciones realizadas. Con el objeto de restaurar el monumento con el criterio de la mínima intervención, y para utilizar materiales y técnicas compatibles, se decidió realizar un estudio de la madera y de los recubrimientos del portón de la fachada que, al estar expuesta a la intemperie, se encontraba muy deteriorada con alteraciones de origen antrópico y desprendimientos de pintura. La aplicación de diferentes técnicas de forma combinada (MOP, SEM, EDX, FRX) resultó eficaz para identificar las especies de madera del portón, así como la composición y morfología de los estratos en los que se dividen sus recubrimientos. Los datos obtenidos muestran un grave deterioro de todas las capas de recubrimiento, evidenciado en forma de irregularidades, grietas, desprendimientos, acumulación de residuos y falta de continuidad. Todo ello es consecuencia del paso del tiempo y la exposición del portón a la intemperie, pero también de repintados sucesivos, inapropiados o poco compatibles. Mediante este trabajo de investigación se pone de manifiesto la importancia de los estudios sobre carpintería de madera en edificios históricos, no sólo como complemento de la documentación histórica sino también como herramienta para tomar decisiones de cara a su conservación futura.

1. Introducción

La madera es un material orgánico muy utilizado a lo largo de la historia para la elaboración de elementos de carpintería. Sin embargo, la humedad puede afectar muy negativamente a su durabilidad ya que cuando el contenido de humedad es suficientemente elevado, por encima del 17%, aumentan las probabilidades de sufrir ataques de hongos o insectos xilófagos [1–2]. Para proteger la madera de la humedad y de la radiación ultravioleta es habitual aplicar pinturas y barnices. Estas capas de protección también tienen una vida limitada y, tras su deterioro, es necesario aplicar nuevas capas, normalmente sobre las antiguas, eliminando únicamente las zonas con pérdida de adherencia.

El acceso a la iglesia de Nuestra Señora de Montserrat se realiza a través de un gran portón de madera sobre el que no había documentación histórica relativa a la especie o especies que lo conforman, ni tampoco sobre los recubrimientos aplicados en las diferentes intervenciones que ha sufrido a lo largo del tiempo.

Los antecedentes históricos revelaban numerosas actuaciones sobre la fachada y el portón de madera de la iglesia por lo que planteó, como objetivo de esta investigación, realizar un estudio taxonómico y estratigráfico para identificar las especies de madera del portón y los cuarterones, determinar los elementos de cubrición originales, los repintes y el estado de los mismos para contribuir a completar el archivo histórico de la iglesia y ayudar en la toma de decisiones sobre su restauración.

2. Materiales y métodos

La Figura 1 presenta una vista general de la parte superior del portón y la localización de la toma de muestras. La primera muestra, designada #1, se tomó en un cuarterón de la parte superior de la hoja izquierda del portón; la segunda muestra, designada #2, del marco de la hoja derecha; y la tercera muestra, #3, del filo de la hoja derecha. Las muestras se extrajeron directamente con un taladro y una pequeña corona acoplada. Se procuró obtener cilindros con la menor longitud posible.

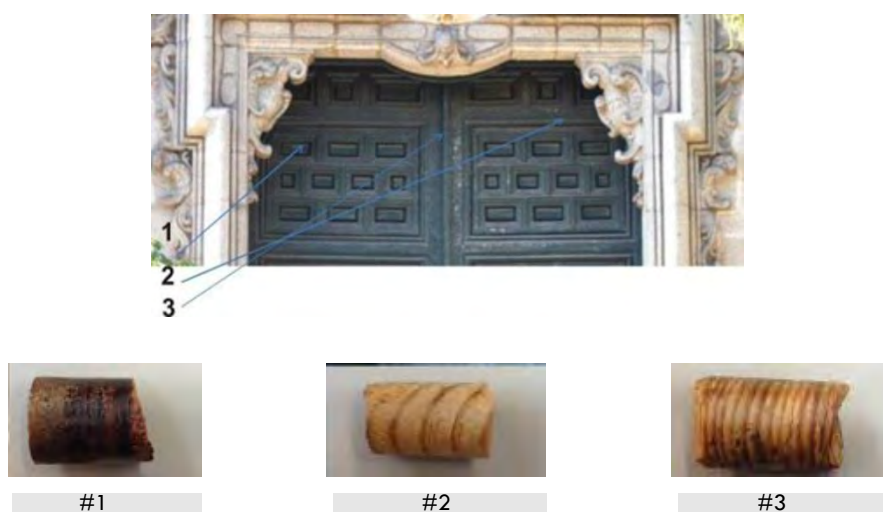


Figura. 1. Localización de la toma de muestras #1, #2 y #3.

Las muestras de madera se examinaron en un microscopio de luz incidente Leica DM 4000M (50x/100x/200x/500x) en sus secciones de ortotropía: transversal, radial y tangencial. La identificación de la especie se realizó mediante la comparación de las características anatómicas con la colección de referencia de maderas modernas del laboratorio de Arqueobotánica del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, y mediante consulta de los atlas de anatomía de la madera de Schweingruber [3–4], Hather [5], Vernet et al. [6] y García et al. [7]. Para apoyar las identificaciones se realizaron micrografías en un Microscopio Electrónico de Barrido de presión variable Hitachi 3400n, Type II.

Para realizar el estudio estratigráfico y de caracterización de las capas de pintura aplicadas sobre la madera, así como la posible identificación de los pigmentos, se utilizaron las técnicas de Microscopía Óptica (MO), Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) y Fluorescencia de Rayos X (FRX).

3. Resultados y discusión

Se identificaron dos especies de madera distintas que conformaban el portón. La muestra #1 pertenece a la especie *Juglans regia* L., conocida comúnmente como nogal, estaba presente en los cuarterones superiores. Las muestras #2 y #3, pertenecen a la especie *Pinus sylvestris* L., conocida como pino silvestre, estaba presente en el resto del portón.

La Figura 2 muestra la micrografía de las secciones de nogal. En la sección transversal se observa la madera de poro difuso a semianular, en la sección tangencial se aprecian los radios leñosos con anchura de 4-5 células, y en la sección radial se distinguen perfectamente todos los elementos anatómicos presentes en los campos de cruce.

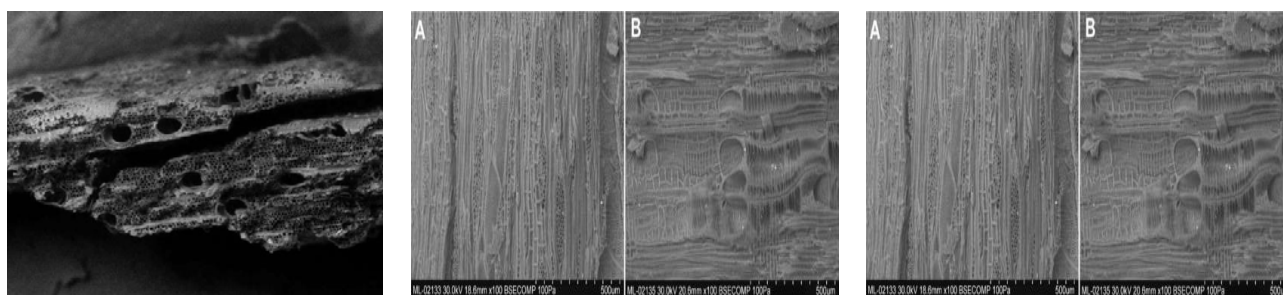


Figura 2. Micrografías de MBE. Sección transversal (izda.), tangencial (ctro.) y radial (dcha.) de nogal

En la Figura 3 se muestran las secciones transversal y tangencial de pino silvestre. En la sección transversal se observa como la transición de la madera temprana a la tardía se realiza de forma abrupta y los canales de resina están rodeados de células gruesas epiteliales, mientras que en la sección radial se aprecia como las traqueidas longitudinales generalmente tienen punteaduras uniseriadas, radios heterocelulares y las traqueidas de los radios tienen paredes dentadas.

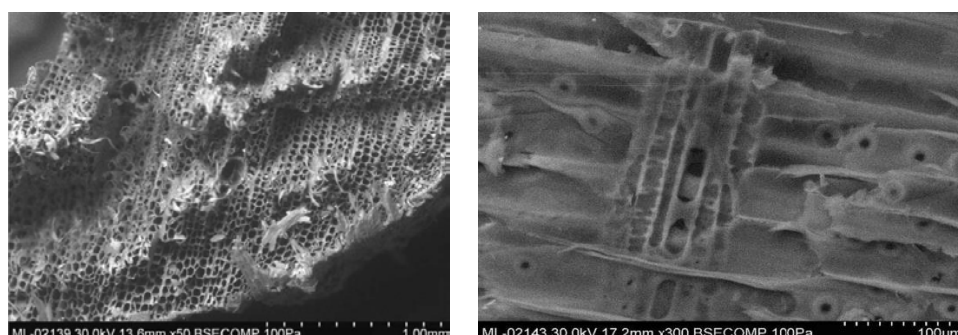


Figura 3. Micrografías de MEB. Sección transversal (izda.) y radial (dcha.) del pino silvestre

Sobre la madera se encontraron secuencias de policromía y tramas diferentes en los recubrimientos, con textura y morfología diferentes. Por ello, se diferenciaron agrupándolas por tipologías similares según: capas que por su morfología porosa y discontinua se denominaron “estuco”, nombradas con la letra E y distinguidas, a su vez, de dos tipos diferentes designadas como E1 y E2; y revestimientos continuos o “pinturas”, nombradas con la letra P y distinguiendo dos clases diferentes designadas como P1 y P2, Figura 4.

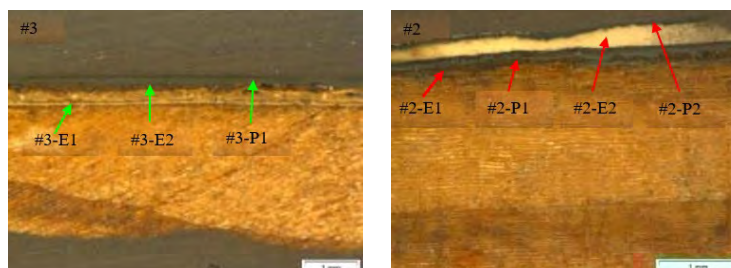


Figura 4. Micrografía de MO de la muestra #3 (izda.) y de la muestra #2 (dcha.)

La microscopía electrónica hizo visibles capas que no se distinguían con el microscopio óptico. Así, en la figura 5 se observa cómo la capa de pintura externa, de la muestra #3, denominada #3-P1, ahora aparece dividida en dos, #3-P1a y #3-P1b. Del mismo modo, la muestra #2 se divide en una primera capa de estuco, #2-E1, y dos capas de pintura, #2-P1a y #2-P1b, seguidas de una segunda capa de estuco #2-E2 (bastante deteriorado) y por último una capa de pintura #2-P2.

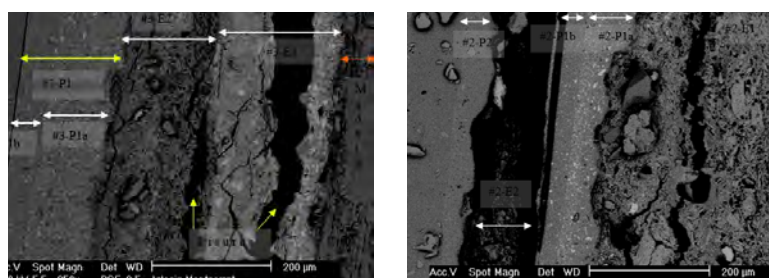


Figura 5. Micrografía MEB de la muestra #3 (izda.) y #2 (dcha.).

4. Conclusiones

Los resultados muestran un grave deterioro de todas las capas de recubrimiento, manifestado en irregularidades, grietas, desprendimientos, acumulación de residuos y falta de continuidad. Todo ello es consecuencia del paso del tiempo y la exposición del portón a la intemperie, pero también de repintados sucesivos, inapropiados o poco compatibles.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la empresa PROIESCON S.L la financiación de este trabajo de investigación, a Mónica Ruíz Alonso del CCHS su colaboración en el estudio taxonómico y a la Dra. Susana Guzmán Fernández de la UC3M su apoyo en la caracterización de los pigmentos.

Referencias

- [1] Pinilla, J.; Laheras, R.; Moreno,E;; González, F.; Las Heras, F. (2017) Actas del 10º Congreso Nacional y 2º Congreso Internacional Hispanoamericano de Historia de la Construcción. Donostia-San Sebastián. 3-7 octubre.
- [2] Aira-Zunzunegui J.R.; Sánchez-Aparicio M.; Sánchez-Aparicio L.J.; Pinilla-Melo J.; García-Morales S. (2022) Determination of Wood moisture content with terrestrial laser scanner. Construction and Building Materials, 350, 128834. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128834
- [3] Schweingruber, F.H. (1978). Mikroskopische Holzanatomie. Swiss Federal Institute of Forestry Research, Birmensdorf.
- [4] Schweingruber, F.H. (1990). Anatomie europäischer Hölzer: ein Atlas zur Bestimmung europäischer Baum-, Strauch-und Zwergstrauchhölzer. Verlag P. Haupt, Bern.
- [5] Hather, J.G. (2000). The Identification of the Northern European Woods. A Guide for Archaeologists and Conservators. Archetype Publications, London.
- [6] Vernet, J.L.; Ogereau, P.; Figueiral, I.; Machado, C.; Uzquiano, P. (2001). Guide d'identification des charbons de bois préhistoriques et récents. Sud-Ouest de l'Europe: France, Péninsule Ibérique et Îles Canaries. CNRS Éditions, Paris.
- [7] García, L.; Guindeo, A.; Peraza, C.; De Palacios, P. (2003). La madera y su anatomía. Fundación Conde del Valle de Salazar. Escuela Superior de Ingenieros de Montes.

1080

ESTUDIO DE LA MEJORA DE AISLAMIENTO A RUIDO DE IMPACTO DE SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS MIXTAS CLT / HORMIGÓN + NEUMÁTICO FUERA DE USO EN PROBETAS DE TAMAÑO REDUCIDO

José Antonio Balmori¹; Marta Herráez²; Alberto Gutierrez²; Milagros Casado Sanz¹; Maria Machimbarrena³

¹GIR Estructuras y tecnología de la madera de la Universidad de Valladolid

²Ingeniería Mecánica CMelM la Escuela Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid

³GIR AVISA. Acústica y Vibraciones Aplicadas de la Universidad de Valladolid

Palabras clave / Palavras-chave:

Madera Contralaminada (CLT), Construcción con madera, Aislamiento acústico, Neumático fuera de uso (NFU), Sostenibilidad

Resumen / Resumo:

La madera contralaminada (CLT) es un producto industrializado de madera que ha incrementado exponencialmente su uso en la industria de la construcción debido a su eficiencia estructural, su ligereza, su carácter sostenible y su competitividad económica. Así, en los últimos años, se está utilizando este producto para la construcción de edificación colectiva (edificación en altura) en toda Europa, desarrollando un nuevo sistema estructural y constructivo eficiente y de alta calidad. Sin embargo, el uso de estos sistemas constructivos ligeros empleando CLT, en comparación con los sistemas pesados tradicionales, no presentan un buen comportamiento de aislamiento al ruido de impacto en los suelos de sus construcciones colectivas. Para alcanzar aislamientos similares a los sistemas tradicionales, es necesario introducir en el diseño de las estructuras de madera nuevos materiales elastómeros, la mayoría con un coste elevado, en colaboración con materiales de mayor densidad (mortero/hormigón) o multicapa (aislantes acústicos específicos). Una potencial alternativa para mejorar el comportamiento acústico de estas construcciones ligeras es la introducción de materiales elásticos fabricados a partir de neumáticos fuera de uso (NFU), con propiedades elásticas semejantes a los elastómeros actuales. La introducción de estos materiales (NFU) en la industria de la construcción como aislantes acústicos permitiría reutilizar, de forma controlada, un material que actualmente genera graves problemas medioambientales por su incontrolado almacenamiento y escaso volumen reciclado. Complementando las limitaciones acústicas de los productos derivados de la madera, como el CLT, e incrementando las ventajas de sostenibilidad de estos sistemas constructivos de madera.

1. Introducción

Las normativas de edificación europeas actuales demandan a la industria de la construcción sistemas más eficientes energéticamente, más sostenibles, más confortables (con mayores requerimientos de

aislamiento acústico), y que incorporen en su fabricación materiales reciclados. Dentro de estas nuevas demandas, la construcción colectiva con productos industrializados derivados de la madera (como el CLT) ha tomado ventaja frente a los sistemas tradicionales por sus ventajas de sostenibilidad, bajo impacto y competitividad económica [1-2]. Sin embargo, la relativa baja densidad y bajo módulo elástico de la madera, en comparación con los sistemas tradicionales de construcción pesada, limitan las prestaciones de aislamiento acústico al ruido de impacto, siendo este aspecto uno de sus puntos débiles en su uso en edificación colectiva. Por ello, las mejoras del aislamiento acústico de los sistemas constructivos con madera continúan siendo un reto a analizar y ensayar, para alcanzar diseños más eficientes [3]. Una de las estrategias de diseño para mejorar el aislamiento al ruido de impacto es la utilización de elementos pesados (losas mortero/hormigón) y el desacople de capas mediante la colocación de materiales elastoméricos (bandas o mantas elásticas). Dentro de estas estrategias se abre una línea de investigación reciente, como es la incorporación de material reciclado proveniente de los neumáticos fuera de uso (NFU) para mejorar el comportamiento frente al ruido de impacto. Los neumáticos fuera de uso generan graves problemas medioambientales debido a que son no-biodegradable, tienen una vida útil muy corta y su reciclado es un proceso complejo y caro. Por ello, simplemente se acumulan en instalaciones a cielo abierto, con el riesgo de alta toxicidad en caso de incendio [4]. No obstante, con un proceso industrial sencillo (triturado) puede emplearse en construcción como banda/manta elástica [5], o como un agregado (granalla/gránulos) incorporados en porcentajes bajos en la dosificación de morteros u hormigones con el fin de mejorar sus propiedades elásticas [6]. Esta investigación se centra en las mejoras de aislamiento acústico al ruido de impacto de soluciones constructivas mixtas CLT con hormigón, utilizando productos derivados de neumático fuera de uso (NFU).

2. Metodología

Los ensayos se realizan de acuerdo con la norma UNE-EN ISO 16251-1 [7], que permite la determinación de la mejora del aislamiento al ruido de impacto empleando muestras de tamaño reducido, adaptando esta normativa específica a las singularidades de estructuras ligeras de madera. Como soporte base se toma un panel de CLT (tricapa) de dimensiones 1200x800mm y espesor 60mm, sobre el que se coloca una losa (no conectada) de hormigón en dos variantes. Una losa (LOSA A) de espesor 50mm de hormigón estándar (H-25); y otra losa (LOSA B) de espesor 50mm hormigón con dosificación experimental que incluye gránulos de Neumático Fuera de Uso (NFU) de diámetro 2,5-4mm. Estas losas de hormigón se montan y desmontan sobre el panel de CLT (soporte base), generando dos especímenes (Figura 1) sobre los que se modificarán 3 tipos de aislamiento acústico de NFU, de distinto espesor. En concreto, se ensaya la losa desnuda y con las 3 mantas de NFU de espesores 4/10/20mm. Esta muestra de forjado tipo se coloca sobre una estructura soporte que está aislada de las vibraciones provenientes del suelo mediante elastómeros (Sylomer SR42 bajo CLT, y Sylomer SR450 en suelo).

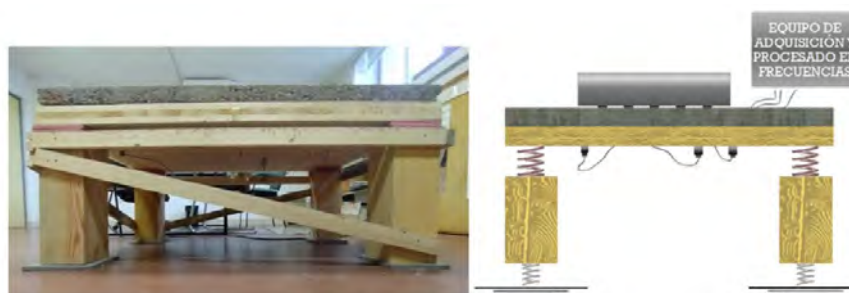


Figura 1. Estructura soporte junto a una de las maquetas instalada encima (izquierda) e ilustración del sistema (derecha).

La medición de vibraciones se realiza con 3 acelerómetros piezoeléctricos uniaxiales BK 4508-B-003, que se colocan en puntos concretos y constantes, aleatoriamente distribuidos fijados con cera en la cara inferior del panel de CLT. El equipo de adquisición de datos utilizado es un SIRIUS mini de 4 canales, controlando toda la instrumentación y toma de datos con el software DEWEsoftX3. La excitación de la estructura se realiza, sin registrar entrada, empleando una máquina de impacto normalizada de la marca Look Line Acoustic modelo EM-050.

3. Resultados

Se han ensayados dos tipos de probetas previamente definidas, partiendo del mismo panel de CLT base, sobre el que se ha colocado. en un caso, una losa de hormigón estándar y, en el otro caso, una losa de hormigón con granalla de NFU. Con estas dos probetas, se han ensayado a su vez diversos recubrimientos de NFU (mantas de 4/10/20mm) para evaluar la mejora a ruido de impacto de cada una de las variantes. Si bien en ambas probetas el uso de mantas de NFU mejora el aislamiento acústico al ruido de impacto (Figuras 2 y 3), los resultados experimentales evidencian que la probeta cuya losa de hormigón incluye la granalla de NFU en su composición, presenta mejores prestaciones de aislamiento al ruido de impacto en un rango de frecuencias de interés más amplio. Así mismo, se observan mejores prestaciones con un revestimiento de 10mm que con uno de 20mm, lo cual puede ser debido a las distintas densidades es de las muestras.

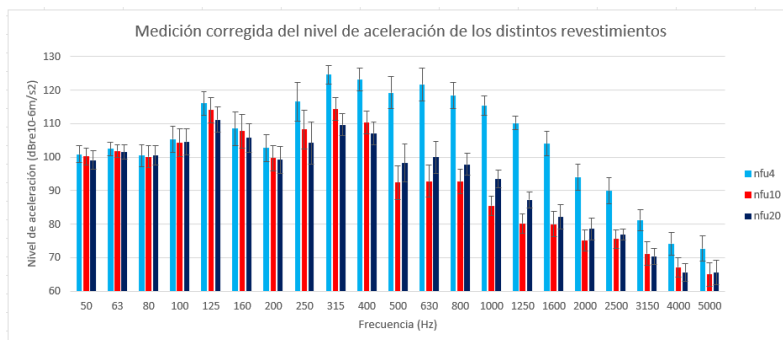


Figura 2. Comparativa del espectro del nivel de aceleración alcanzado usando los distintos revestimientos de NFU en el forjado de hormigón estándar con CLT, por tercios de octava en frecuencia.

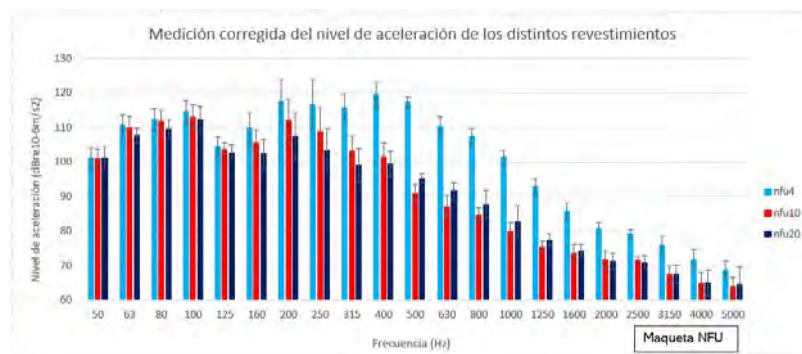


Figura 3. Comparativa del espectro del nivel de aceleración alcanzado usando los distintos aislantes de NFU en el forjado de hormigón con NFU con CLT, por tercios de octava en frecuencia.

En la Figura 4 se ha evaluado, a partir de los niveles de aceleración, la mejora de aislamiento al ruido de impacto (ΔL) para cada una de las bandas de frecuencia, comparando los valores iniciales con los medidos tras la colocación de mantas NFU en cada caso. Se comparan en el mismo gráfico las mejoras (ΔL) para cada espesor de aislante NFU con losa de hormigón estándar y losa de hormigón con gránulos de NFU. Se pueden distinguir, principalmente, dos intervalos de frecuencia: hasta los 200Hz, el nivel de aceleración alcanzado en las cuatro situaciones es muy similar (variaciones del orden de 2,2dB- 4,8dB como máximo); y, a partir de los 250Hz, es cuando comienza a haber unas diferencias claras, sobre todo entre los niveles alcanzados por la maqueta desnuda y por las maquetas con los revestimientos NFU (llegando a encontrarse una diferencia de hasta 74,6dB entre sin0 y NFU10), y con la capa de NFU de espesor 4mm y las capas con espesores mayores (llegando a encontrarse diferencias de hasta 30,7dB entre NFU4 y NFU10).

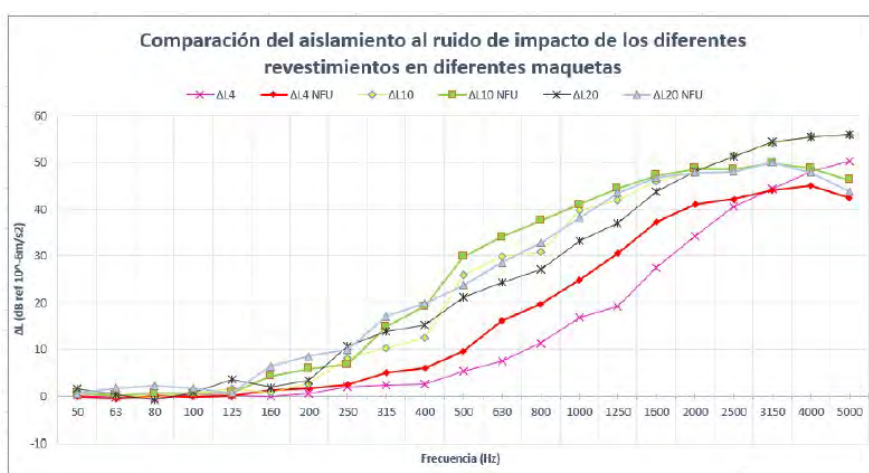


Figura 4. Mejora del Aislamiento al ruido de impacto (DL) conseguido con las distintas muestras, con respecto al hormigón estándar y al hormigón con NFU (NFU) sin ningún aislante, para el rango de 50-5kHz, en tercios de octava

4. Conclusiones

Las principales conclusiones alcanzadas son:

- Es potencialmente viable, al menos desde el punto de vista técnico y de prestaciones acústicas, el uso de materiales reciclados procedentes de neumático fuera de uso (NFU) en edificación como aislantes acústicos. Su aplicación directa en formato de mantas de pequeño espesor (<20mm) muestra unas mejoras significativas ($\Delta L > 40\text{dB}$ en franjas de frecuencia >1kHz) en el aislamiento a ruido de impacto.
- El uso de materiales de NFU, también puede aplicarse de forma directa sobre los actuales procesos constructivos. Sustituir parcialmente (<15%) árido por granalla de NFU ($\phi < 4\text{mm}$) de las mezclas de hormigones y morteros empleados en rellenos de suelos, mejora significativamente el comportamiento acústico al ruido de impacto de estos elementos, reduciendo su peso (entorno a un 10%).

Agradecimientos

Investigación desarrollada con los fondos del Tercer Premio del Concurso Desafío Universidad-Empresa (edición 2021) financiado por la Junta de Castilla y León. Agradecer la colaboración y apoyo de la empresa Medgón Contratas y Servicios S.L.

Referencias

- [1] Brandner, R.; Flatscher, G.; Ringhofer, A.; Schickhofer, G.; Thiel, A. (2016) Cross laminated timber (CLT): overview and development. *Eur. J. Wood Wood Prod.* 74: 331–351, doi:10.1007/s00107-015-0999-5.
- [2] Harte, A.M. (2017) Mass timber – the emergence of a modern construction material. *J. Struct. Integr. Maint.* 2: 121–132, doi:10.1080/24705314.2017.1354156.
- [3] Caniato, M.; Marzi, A.; Monteiro da Silva, S.; Gasparella, A. (2021) A review of the thermal and acoustic properties of materials for timber building construction. *J. Build. Eng.* 43: 103066, doi:10.1016/j.jobe.2021.103066.
- [4] Mohajerani, A.; Burnett, L.; Smith, J. V.; Markovski, S.; Rodwell, G.; Rahman, M.T.; Kurmus, H.; Mirzababaei, M.; Arulrajah, A.; Horpibulsuk, S.; et al. (2020) Recycling waste rubber tyres in construction materials and associated environmental considerations: A review. *Resour. Conserv. Recycl.* 155: 104679, doi:10.1016/j.resconrec.2020.104679.
- [5] Aliabdo, A.A.; Abd Elmoaty, A.E.M.; AbdElbaset, M.M. (2015) Utilization of waste rubber in non-structural applications. *Constr. Build. Mater.* 91: 195–207, doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.05.080.
- [6] Bu, C.; Zhu, D.; Lu, X.; Liu, L.; Sun, Y.; Yu, L.; Xiao, T.; Zhang, W. (2022) Modification of Rubberized Concrete: A Review. *Buildings.* 12: 999, doi:10.3390/buildings12070999.
- [7] European standard (2015) UNE-EN ISO 16251-1:2015 Acústica. Medición en laboratorio de la reducción de la transmisión del ruido de impacto por revestimientos de suelo sobre un suelo de pequeñas dimensiones. Parte 1: Suelos pesados. (ISO 16251-1:2014). European Committee of Standardization (CEN), Brussels, Belgium.

1081

ESTUDIO PRELIMINAR DE TROZAS DE *Acacia dealbata* Link PARA USO EN CONTRUCCIÓN: CARACTERIZACIÓN VISUAL Y ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

Manuel Suazo Uribe¹; Alexander Opazo Vega²; Dante Marranzini³; Beatrice Faggiano³; José L. Louzada⁴; Jorge M. Branco¹; Montero Claudio²

¹ ISISE, DECivil, University of Minho, Guimarães, Portugal

² University of Bío Bío, Concepción, Chile

³ University of Naples Federico II, Naples, Italy;

⁴ CITAB, University of Trás-os-Montes and Alto Douro, Vila Real, Portugal

Palabras clave / Palavras-chave:

Longitudinal stress wave, Small-diameter logs, Transverse vibration

Resumen / Resumo:

Se presentan los primeros resultados de un estudio más amplio, destinado a la determinación de propiedades mecánicas de trozas de pequeño diámetro y mínimo procesamiento de la especie invasiva *Acacia dealbata* Link. Cuarenta y cinco especímenes se caracterizaron visualmente con longitudes de 2.0 y 2.4 m y diámetros de 90 a 143 mm, y un contenido de humedad medio de 29.49 % (desviación standard, $ds=10.97$ %). Posteriormente, se realizaron ensayos no destructivos de referencia: ondas acústicas longitudinales y vibración transversal. Los valores de Módulo de Elasticidad inferidos son comparables con otros estudios, 15.8 GPa ($ds=3.53$) y 12.3 GPa ($ds=3.62$), respectivamente. A pesar de la alta dispersión del contenido de humedad, se observaron correlaciones moderadas ($r = 0.57$) entre ensayos no destructivos.

1. Introducción

La *Acacia dealbata* Link, conocida como Mimosa en Portugal, es una especie invasiva de las denominadas frondosas, que amenaza los bosques nativos del norte ibérico con una agresiva colonización debido a su alta resiliencia y capacidad de adaptación [1]. Podemos encontrarla en rodales jóvenes (10-20 años), densos, muchas veces en pendiente y desarrollando fustes y secciones irregulares (Figura 1-a). Para su control, se ha desarrollado investigación aplicada orientada a su valorización: pulpa para papel o biomasa, citando la experiencia portuguesa. Si bien su forma y pequeño diámetro, reduce su rendimiento maderable, algunos autores han demostrado que trozas de pequeño diámetro como material en construcción, pueden tener desempeños estructurales admisibles (Figura 1-b). Más aún, su bajo nivel de procesamiento reduce pérdida del material resistente exterior y no debilita la zona circundante a los nudos [2].



Figura 1. (a) Típico rodal y trozas de Mimosa; (b) Aplicación en estructuras de trozas de madera de pequeño diámetro [2]

Para la caracterización mecánica, además de los procedimientos destructivos (EN 14251: 2003 [3]), existen actualmente varias técnicas no-destructivas con resultados consistentes en cuanto a previsibilidad del desempeño mecánico. Una de ellas, la medición de ondas acústicas, es una accesible y consolidada técnica no destructiva para determinar propiedades de rigidez en tablas de madera [4]. En troncos de *Castanea sativa* de diámetro constante, Vega [5] determinó coeficiente de determinación entre Módulo de Elasticidad (MOE) estático/dinámico de $R^2=0,64$, y por su parte, para trozas de varias especies de frondosas de Irlanda, Llana [6], incorporando otras variables como densidad, diámetro (DAP) o el número de anillos anual, determinó un $R^2=0.58$, sobre parámetros equivalentes. Otra técnica no destructiva, aunque de implementación más demandante, es la medición de vibraciones transversales capturando la frecuencia del primer modo de vibración. En trozas de *Corymbia citriodora*, y usando condiciones de borde libre, Carreira [7] determinó valores de $R^2=0.92$ entre MOE estático/dinámico.

Este trabajo se circunscribe en uno más amplio, cuyo objetivo es la caracterización mecánica de trozas de pequeño diámetro (100-150 mm) de Mimosa, para valorizarla como residuo del manejo forestal. El objetivo específico, es el de exponer resultados preliminares de un conjunto de muestras con contenidos de humedad variables, todos superiores al 12 % de referencia.

2. Materiales y metodos

Sesenta y cuatro árboles jóvenes de Mimosa de entre 100 y 150 mm de diámetro, fueron talados en 2 turnos de 34 y 31, provenientes del Parque Nacional da Peneda Gerês, norte de Portugal. En los laboratorios de la Universidad de Minho, Portugal, se realizó su caracterización visual y ensayos no-destructivos, seleccionando cuarenta y cinco trozas, 17 de 2.0 m y 28 de 2.4 m, de entre 90 y 143 mm de diámetro (desviación standard, $ds=10.53$). Los especímenes seleccionados fueron los de menor desalineación y menor cantidad de defectos. No se les realizó ningún procesamiento de ajuste manteniendo su fuste irregular natural y al menos para esta primera etapa, no se descortezaron.

2.1.Determinacion del contenido de humedad

Un higrómetro de resistencia eléctrico se usó para la medición del contenido de humedad (CH). Para calibrarlo se extrajeron rodajas de 30 mm aproximadamente de la parte inferior de 34 especímenes. Luego de saturadas en agua, fueron almacenadas en cámara climática y aquí se realizaron mediciones regulares de masa y de contenido de humedad con higrómetro, hasta alcanzar una masa constante. De acuerdo a la norma ISO-3130: 1975 [8], con el peso seco se determinó el CH para cada medición, y luego se correlacionó con cada medición del higrómetro ($R^2=0.89$).

2.2. Caracterización visual

Se realizó en base a la EN 14251: 2003 [3] que define los siguientes términos: Ovalidad (%), es la relación entre el diámetro mayor y menor de una sección específica; Conicidad (mm/m), indica la reducción de la sección sobre el largo de la troza desde el diámetro promedio inferior al superior. Otros indicadores también se incluyeron: Desalineación (mm/2 m) que describe el nivel de desalineación en relación a una recta de referencia en 2 m; y Nudosidad (%), que es el cociente entre ancho de nudo sobre el diámetro, medido sobre toda la pieza y sobre el tercio central.

2.3. Ensayos no destructivos

La Figura 2 presenta los ensayos no destructivos, de medición de Ondas acústicas longitudinales, Oal (Figura 2-a), y de Vibración transversal, Vt (Figura 2-b), realizados para CH de 29.49 % de valor medio ($d_s=10.97$ %). Paralelo a cada ensayo, la troza fue pesada y con higrómetro, se midió el CH sobre 3 puntos ubicados a un cuarto, un medio y tres cuartos del largo. Con la media de estos puntos, se determinó un CH global, y de acuerdo al procedimiento descrito en 2.1, se infirió un CH_{d-otl} para Ondas acústicas longitudinal y un CH_{d-vt} para vibración transversal.



Figura 2. Ensayos de medición de Ondas acústicas longitudinal-Oal (a) y de Vibración transversal-Vt (b).

Con los ensayos de Oal (Figura 2 a) se determinó la velocidad de onda en sentido longitudinal. Utilizando las expresiones descritas por Uterweiser [9], este valor se ajustó a un 12 % de CH de referencia, obteniendo un valor de Velocidad ajustado, $C_{aj,12}$. La densidad se determinó pesando las muestras y midiendo el volumen de la troza en base al promedio de los diámetros de ambos extremos por el largo. Este valor se ajustó a un CH de referencia del 12 % de acuerdo a EN 384, infiriendo un valor de densidad al $\rho_{aj,12}$. Finalmente, con la ecuación, $(C_{aj,12})^2 * \rho_{aj,12}$, se infirió el módulo de Elasticidad dinámico, $MOE_{d-ol,12}$.

Por otra parte, con los ensayos de Vt (Figura 2 b) se determinaron los valores de la primera frecuencia resonante vertical de las trozas, aplicando dos métodos, uno no-paramétrico, EFDD (Enhanced Frequency Domain Decomposition), y otro paramétrico, el SSI (Stochastic Subspace Identification). Luego, para la determinación del módulo de Elasticidad se usó la expresión derivada de la teoría Euler-Bernoulli aplicada a la frecuencia natural del primer modo en flexión, de una viga en condiciones de borde libre con los valores de la frecuencia, masa y propiedades geométricas (momento de inercia y longitud) de la troza. Finalmente, el Módulo de Elasticidad, de acuerdo a Uterweiser [9] se ajustó a un CH de 12 % de referencia para cada uno de los métodos, obteniendo un $MOE_{d-vt,12}$.

3. Resultados y discusión

Para la selección se usó de referencia la calificación cualitativa propuesta por Ranta-Maunus, en un extenso estudio de madera de coníferas del norte de Europa [10]. Las muestras seleccionadas cumplen con el criterio de Ovalidad y Conicidad recomendado, inferior al 20 % y a 10 mm/m respectivamente. Sin embargo, salvo una pieza, el resto no cumple con el valor de alineamiento de la referencia (inferior a 10 mm para 2 m). La Tabla 1 resume los valores medios para cada parámetro. Como se esperaba, debido a la naturaleza del material y al mínimo nivel de procesamiento, una alta variabilidad se observa en las características visuales de las piezas seleccionadas.

Tabla 1. Características visuales de los especímenes (incluye el diámetro nominal según EN 14251[3])

	Diámetro nominal	Ovalidad a 1 m	Conicidad	Desalineación	Nudo/diámetro toda la pieza	Nudo/diámetro tramo central
	mm	%	mm/m	mm/2m	%	%
media	111.58	8.72	6.70	33.17	12.42	9.30
ds	10.53	5.82	2.05	13.95	7.66	7.76
máx.	142.51	20.00	10.37	70.97	36.84	36.84
min.	90.00	0.00	2.32	9.88	0.00	0.00

La Tabla 2 resume los datos para los ensayos no destructivos. Como referencia, los valores de velocidad de Onda ajustados, $C_{aj,12}$, y del MOE $_{d-ool,12}$ son muy superiores a los registrados para especies de maderas de frondosa, estudiadas por Llana [6], que obtiene un valor medio de 3686 m s^{-1} y 7.95 GPa (MOE estático), respectivamente. Por otro lado, los valores de MOE $_{d-vt,12}$ para ambos métodos (EFDD/SSI) no tienen diferencias significativas ($R^2=0.98$), y son inferiores a los obtenidos por Carreira [7] para la especie frondosa *Corymbia citriodora*, con 22.53 GPa .

Tabla 2. Resultados para los ensayos No destructivos de Ondas acústicas longitudinales y Vibración transversal

	CH_{d-ool}	$C_{aj,12}$	$\rho_{aj,12}$	$MOE_{d-ool,12}$	CH_{d-vt}	$MOE_{d-vt,12}$	
	%	m s^{-1}	kg/m^3	GPa	%	EFDD (GPa)	SSI (GPa)
media	31.90	4599.27	743.54	15.82	27.08	12.31	12.34
ds	13.05	526.58	87.93	3.53	7.90	3.62	3.37
máx.	55.20	5986.55	976.08	24.61	43.19	23.03	21.25
min.	13.96	3370.01	603.52	7.39	13.17	5.96	5.87

Para un segundo turno de ensayos no-destructivos, el CH de las muestras está cerca del valor de referencia del 12 % y los datos tienen una menor dispersión: el CH_{d-ool} es 12.14 % (ds=2.09 %) y para CH_{d-vt} es 11.20 % (ds= 1.83 %) de media.

4. Conclusion

Los valores de Módulo de Elasticidad de este estudio preliminar, están dentro de rangos intermedios en comparación a otros, lo que justifica evaluar la especie para aplicación en construcción. Si bien las correlaciones iniciales en general son débiles, otras características visuales y que podrían repercutir en el desempeño mecánico, se incluirán posteriormente. A esto se debe incluir un valor menos disperso de contenido de humedad. No obstante, una correlación moderada positiva, $r=0.57$, ($p=0.000$; $R^2=0.32$) se observó entre el Módulo de Elasticidad ajustado de las Ondas acústicas longitudinales y el de vibración transversal con el método no-paramétrico, EFDD.

Referencias

- [1] Monteiro A. T.; Gonçalves J.; Fernandes R.F.; Alves S.; Marcos B.; Lucas R.; Teodoro A.C.; Honrado, J. P. (2017) Estimating Invasion Success by Non-Native Trees in a National Park Combining WorldView-2 Very High Resolution Satellite Data and Species Distribution Models. *Diversity*, 9, 6. <https://doi.org/10.3390/d9010006>
- [2] Bukauskas, A.; Mayencourt P.; Shepherd, P.; Sharma, B.; Mueller, C.; Walker, P.; Bregulla, J. (2019) Whole timber construction: A state of the art review. *Constr. Build. Mater.* 213: 748-769. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.043
- [3] European standard (2003) EN 14251-Structural round timber - Test methods.
- [4] Martins C.; Monteiro S.; Knapic, S.; Dias A. (2020) Assessment of bending properties of sawn and glulam blackwood in Portugal. *Forests*, vol. 11, no. 4, [doi: 10.3390/F11040418](https://doi.org/10.3390/F11040418).
- [5] Vega, A.; González, L.; Fernández I.; González P. (2019) Grading and mecontentido de humedadanical contenido de humedadaracterization of small-diameter round contenido de humedadestnut (*Castanea sativa* Mill.) timber from thinning operations. *Wood Mater. Sci. Eng.* vol. 14, no. 2, pp. 81–87, [doi: 10.1080/17480272.2017.1387174](https://doi.org/10.1080/17480272.2017.1387174).
- [6] Llana, D. F.; Short, I.; Harte A. M. (2020) Use of non-destructive test methods on Irish hardwood standing trees and small-diameter round timber for prediction of mecontentido de humedadanical properties. *Ann. For. Sci.*, vol. 77, no. 3, [doi: 10.1007/s13595-020-00957-x](https://doi.org/10.1007/s13595-020-00957-x).
- [7] Carreira, M.R.; Dias, A.A.; Alcântara Segundinho P. G. (2017) Nondestructive Evaluation of *Corymbia citriodora* Logs by Means of the Free Transverse Vibration Test. *J. Nondestruct. Eval.*, vol. 36, no. 2, pp. 2–8, [doi: 10.1007/s10921-017-0401-0](https://doi.org/10.1007/s10921-017-0401-0).
- [8] ISO 3130 (1975) Wood determination of moisture content for physical and mechanical tests.
- [9] Unterwieser, H.; Scontentido de humedadickhofer, G. (2011) Influence of moisture content of wood on sound velocity and dynamic MOE of natural frequency- and ultrasonic runtime measurement. *Eur. J. Wood Wood Prod.*, vol. 69, no. 2, pp. 171–181, [doi: 10.1007/s00107-010-0417-y](https://doi.org/10.1007/s00107-010-0417-y).
- [10] Ranta-Maunus A. (1999) Round small-diameter timber for construction: Final report of project FAIR CT 95-0091.

1082

ESTUDO DAS LIGAÇÕES PREGADAS E CAVILHADAS PARA USO EM PAINÉIS ESTRUTURAIS

Vitor Hugo Minari¹; Marcos Cesar De Moraes Pereira²; Carlito Calil Júnior¹

¹ USP SÃO CARLOS;

² Universidade Estadual Paulista UNESP

Palabras clave / Palavras-chave:

Nail Laminated Timber; Painéis de madeira lamelada pregada; Dowel Laminated Timber; Painéis de madeira lamelada cavilhada

Resumen / Resumo:

A madeira, sendo um material ecologicamente mais eficiente do que o aço ou o concreto, por necessitar de menos energia de transformação em sua produção, além de sequestrar carbono, vem sendo cada vez mais estudada com a incorporação de painéis estruturais no mercado mundial. Infelizmente, a cultura brasileira é uma grande barreira a ser superada para a construção em materiais alternativos. Neste cenário, este projeto tem como objetivo principal o estudo de painéis estruturais de madeira lamelada pregada (Nail Laminated Timber – NLT) e madeira lamelada cavilhada (Dowel Laminated Timber – DLT) a partir do estudo teórico, simulação numérica e da análise experimental de painéis produzidos em laboratório. Esses tipos de painéis apresentam alta eficiência quanto a utilização como pisos e lajes, sendo também, painéis de madeiras livres de cola, e no caso do DLT, painéis que não apresentam outro material em sua composição além da própria madeira.

1. Introdução

Com as recentes políticas ambientais que visam a diminuição das emissões de dióxido de carbono, a indústria da construção civil, que é responsável por um terço de toda a emissão de dióxido de carbono na atmosfera, tem enxergado na madeira um potencial aliado para construções com menores impactos ambientais. Além disso, a madeira torna-se vantajosa pois, quando aliada a outros materiais, pode atingir comportamentos estruturais muito superiores, além de poder ser trabalhada facilmente em fábricas, tendo um controle de fabricação melhor que garante a qualidade e eficiência da estrutura final [1].

Neste cenário, a utilização de painéis estruturais pré-fabricados, como os de madeira lamelada pregada (Nail Laminated Timber - NLT) e de madeira lamelada cavilhada (Dowel Laminated Timber - DLT) são soluções que garantem os benefícios da madeira, por ser um material ecologicamente correto, e goza de todos os benefícios de estruturas pré-fabricadas.

O processo de fabricação do NLT consiste em, a partir de lamelas de madeira colocadas umas ao lado das outras, uni-las com pregos para formar um painel contínuo. Este tipo de painel, tem seu uso consolidado em armazéns com a necessidade de pisos sólidos e resistentes, sendo também um potencial substituto para lajes de concreto e decks de aço na construção de edifícios e residências, especialmente quando se leva em consideração a sua estética diferenciada, sendo muito mais atraente ao olhar do que outras soluções [2]. O NLT é regulamentado por códigos de construção em países como o Canadá (National Building Code of Canada – NBCC [3]), e os Estados Unidos (International Building Code - IBC [4]).

Já o DLT, conhecido historicamente como *dübelholz* na Europa, é o único produto de madeira maciça que não possui outro material em sua constituição além da madeira, sendo que, as lamelas que formam a estrutura são ligadas a partir da utilização de cavilhas de madeira dura, tendo sua eficiência melhorada para usos em espaços horizontais, mas podendo ser uma alternativa ao NLT. Pode-se também, acoplar materiais acústicos, condutos elétricos, entre outros elementos aos painéis de DLT, além de poder se utilizar uma grande variedade de perfis a serem expostos na parte inferior do painel. Comparando com os outros produtos de madeira maciça presentes no mercado, o DLT é o único que não possui cola, produtos químicos ou pregos de metal em sua constituição, reduzindo a emissão de VOC (componentes orgânicos voláteis) que podem ser emitidos pelos adesivos estruturais usados na fabricação de vigas e painéis colados [5].

O objetivo principal deste estudo é analisar o comportamento de painéis NLT e DLT quando submetidos a flexão, além da obtenção de valores de resistência e rigidez destes painéis, sendo comparados com valores obtidos a partir de simulações numéricas destas estruturas. Além disso, outro objetivo é analisar o comportamento de ligações pregadas e cavilhadas utilizando a norma brasileira vigente NBR 7190-5 [6].

2. Materiais e métodos

Para a fabricação dos dois painéis, foram utilizadas lamelas de seção 3,8x9,0 cm com 366 cm de comprimento da espécie *Pinus Taeda*, além de cavilhas da espécie *Peltogyne spp.* (Roxinho) com comprimento de aproximadamente 23 cm (6 camadas). A classificação visual e mecânica dos lotes de madeira foi feita de acordo com as normas NBR 7190-2 [7], NBR 7190-3 [8] e NBR 7190-4 [9] com o intuito de prever e de analisar o comportamento do painel quando montado. Os pregos utilizados para montagem do painel DLT possuíam 3,76 mm de diâmetros e 88,9 mm de comprimento e a caracterização do lote de pregos foi realizada com um lote de 10 pregos, com base na norma espanhola UNE-EN 409 [10].

Após a caracterização dos materiais a serem utilizados, seguiu-se o ensaio das ligações pregadas e cavilhadas. Para isso, seguiu-se o método de ensaio presente na norma NBR 7190-5 [6]. Foram ensaiados 10 corpos de prova de cada tipo de ligação, com 80 cm de comprimento. Os corpos de prova de ligações pregadas foram produzidos com 3 lamelas e 4 pregos de cada lado, totalizando 8 pregos por ligação. Os corpos de prova de ligações cavilhadas foram produzidos com 3 lamelas e 1 cavilha passante. Neste ensaio, foram tomadas medidas de deslocamentos e as respectivas forças aplicadas, além da força que levou os corpos de prova a ruptura. Estes valores são necessários para obtenção de parâmetros de rigidez e resistência das ligações.

2.1. Painéis de madeira lamelada pregada

O painel de NLT foi montado com 35 lamelas, tendo as dimensões finais de 2,95 m de comprimento por 1,33 m de largura. Para a fabricação deste, foi feita uma pré-furação de aproximadamente $1/3$ do diâmetro do prego. A disposição dos pregos foi definida tendo como base Ritter, M. A. [11], sendo 2,5 cm a distância entre o prego e a lateral do painel, e 22,5 cm a distância entre os pregos (em duas linhas na altura do painel), lembrando que, como o prego tem o comprimento de 3 lamelas, a pregagem foi feita de forma alternada entre 3 camadas, tendo 11,25 cm de distância entre pregos de lamelas adjacentes. Para minimizar a movimentação das lamelas, fez-se uso de uma prensa mecânica, com a prensagem lateral do painel, até a altura limite da prensa. A partir desta altura, continuou-se o procedimento prensando manualmente o painel.

Para realização do ensaio, o painel foi posicionado em um esquema estático biapoiado, utilizando-se células de carga para a medição do incremento da força e de quinze extensômetros com precisão de 0,01 mm para a medição dos deslocamentos. Com o intuito de utilizar o software “ATM - Análise de tabuleiros de madeira”, para obtenção de valores representativos dos módulos de elasticidade longitudinal e transversal do painel, foram aplicadas forças pontuais em cinco diferentes pontos, no centro do painel, porém variando-se a coordenada referente a direção da largura do painel. Além disso, aplicou-se forças distribuídas nas duas direções do painel (alterando-se a direção dos apoios deste), para o cálculo dos módulos de elasticidades longitudinal e transversal. Por fim, levou-se o painel a ruptura com a força distribuída aplicada na direção longitudinal.

2.2. Painéis de madeira lamelada cavilhada

O painel de DLT foi fabricado com as mesmas dimensões do que o painel de NLT. Foi realizada a furação das lamelas com uma furadeira de diâmetro 19 mm e a secagem das cavilhas em estufa para redução de suas dimensões, de forma a garantir a rigidez das ligações cavilhadas. Também foi feita a prensagem das lamelas para minimizar a movimentação destas. Com relação a disposição das cavilhas, utilizou-se, em sua maioria, cavilhas com o comprimento equivalente a 6 lamelas, dispostas alternadamente.

Os ensaios realizados no painel, seguiram como descrito no item 3.1, assim como a utilização do software “ATM - Análise de tabuleiros de madeira”. A Figura 1 ilustra os ensaios e a instrumentação realizada no painel cavilhado.



Figura 1: Ensaio e instrumentação dos painéis de DLT e NLT.

3. Resultados e discussões

Os resultados obtidos da caracterização mecânica das espécies de madeira utilizadas, são apresentados na Tabela 1. O ensaio de caracterização do prego apresentou o valor de momento de escoamento característico de $M_{y,k}=10,344$ kN.cm. Por fim, os ensaios de caracterização das ligações pregadas e cavilhadas, retornaram valores de módulo de deslizamento (k_s) de, respectivamente 12,5 e 6,6 kN/mm, além de uma força máxima aplicada ($F_{máx}$) de 24,3 e 15,3 kN. Uma análise comparativa pode ser feita com relação aos ensaios de caracterização das ligações pregadas e cavilhadas, levando-se em consideração o valor final obtido do módulo de deslizamento característico calculado e da força máxima aplicada, que para as ligações pregadas e cavilhadas, pode-se concluir que as ligações pregadas apresentam maior rigidez com relação as cavilhadas, além de terem resistência maior do que estas.

Tabela 1. Valores característicos dos parâmetros de rigidez e resistência dos lotes de madeira utilizados.

Espécie	$\rho_{méd}$ (kg/m ³)	$f_{v0,k}$ (MPa)	$E_{m,k}$ (MPa)	$f_{c0,k}$ (MPa)	$E_{c0,k}$ (MPa)	$f_{c90,k}$ (MPa)	$E_{c90,k}$ (MPa)	$f_{t0,k}$ (MPa)	$E_{t0,k}$ (MPa)
Pinus	447	8,1	5.844	31,7	2.106	3,7	204	30,8	8.788
Roxinho	873	13,7	20.518	87,2	23.041	18,6	1.377	-	-

Os resultados obtidos tanto nos ensaios dos painéis com cargas distribuídas, quanto na simulação dos painéis no software “ATM - Análise de tabuleiros de madeira” são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Valores de rigidez e resistência obtidos nos ensaios e na simulação numérica dos painéis.

	Análise experimental			Simulação numérica		
	E_x (MPa)	E_y (MPa)	σ_{rup} (MPa)	E_x (MPa)	E_y (MPa)	G_{xy} (MPa)
NLT	1.059	27	614	1.060	133	157
DLT	760	3	569	631	16	50

Com relação aos painéis pregados (NLT) e cavilhados (DLT), notamos que nos dois casos, o Módulo de Elasticidade foi consideravelmente maior na direção longitudinal do que na direção transversal. Notamos que isso é justificado pela distribuição das lamelas de madeira somente na direção longitudinal e pela realização das ligações na direção transversal, sendo essas ligações consideravelmente flexíveis. Comparando-se os valores de módulo de elasticidades obtidos diretamente pelo ensaio de flexão do painel e indiretamente pela utilização do software ATM, notamos que há certa equivalência nos valores obtidos pelos dois modos.

4. Conclusões

Comparando os dois painéis, levando em consideração todos os valores obtidos, notamos que o painel pregado (NLT) apresentou uma maior eficiência com relação ao painel cavilhado (DLT). Entretanto, como citado anteriormente, o DLT apresenta vantagens com relação ao impacto ambiental gerado pela construção civil, sendo composto, na sua totalidade, de materiais naturais e renováveis, diferentemente

do NLT, que possui elementos metálicos, ou do CLT, que possui cola em sua composição. Porém, nota-se uma desvantagem do painel DLT com relação a sua fabricação, pela dificuldade da inserção das cavilhas, sendo necessário secá-las em estufa, além da quebra e obstrução de alguns furos.

Conclui-se que, tanto os painéis pregados, quanto os cavilhados, possuem rigidez efetivamente em apenas uma das direções principais. Portanto, estes elementos estruturais são boas opções em estruturas em que as lajes possam ser definidas como em uma direção, como por exemplo em tabuleiros de pontes, ou até mesmo em pequenas lajes, onde um dos lados é significativamente maior do que o outro.

References

- [1] Silva, C.; Branco, J. M.; Lourenço P. B. (2012) MLCC na construção em altura. Atas do 4º Congresso Construção. 18 a 20 de setembro. Coimbra, Portugal.
- [2] Gava, M. (2005) Viabilidade técnica e econômica da produção de componentes construtivos para habitação social utilizando madeira serrada de pinus de terceira classe de qualidade. Dissertação de mestrado. Instituto de Arquitetura e Urbanismo. Universidade de São Paulo, SP, Brasil. 243 p.
- [3] Code of Canada (2020) National Building Code of Canada. Canadian Commission on Building and Fire Codes, Ottawa, Canada.
- [4] International Code (2021) International Building Code. International Code Council, Washington DC, U.S.A.
- [5] O'Connor, J.; Podesto, L.; Barry, A.; Grann, B. (2013) Environmental performance of cross-laminated timber. In The U.S. Edition of the CLT Handbook: cross-laminated timber. FPLInnovations and Binational Softwood Lumber Council. Pointe-Claire.
- [6] Brazilian standard (2022) NBR 7190-5. Projeto de estruturas de madeira Parte 5: Métodos de ensaio para determinação da resistência e da rigidez de ligações com conectores mecânicos. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro, Brasil.
- [7] Brazilian standard (2022) NBR 7190-2. Projeto de estruturas de madeira Parte 2: Métodos de ensaio para classificação visual e mecânica de peças estruturais de madeira. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro, Brasil.
- [8] Brazilian standard (2022) NBR 7190-3. Projeto de estruturas de madeira Parte 3: Métodos de ensaio para corpos de prova isentos de defeitos para madeiras de florestas nativas. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro, Brasil.
- [9] Brazilian standard (2022) NBR 7190-4. Projeto de estruturas de madeira Parte 4: Métodos de ensaio para caracterização peças estruturais. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro, Brasil.
- [10] Spanish standard (2009) UNE-EN 409. Estructuras de madera – Métodos de ensayo – Determinación del momento plástico de los elementos de fijación tipo clavija.. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid, España.
- [11] Ritter, M. A. (1990). Timber Bridges – Design, Construction, Inspection and Maintenance. Washington DC. 944p.

1083

EVALUACIÓN DE LA APTITUD ESTRUCTURAL DE FRONDOSAS INFRAUTILIZADAS EN ESPAÑA: MADERA ASERRADA DE HAYA DE PRIMERA Y SEGUNDA CALIDAD Y CHOPO

Mario Azaña Galán¹; Gonzalo Moltini¹; Vanesa Baño²; Guillermo Íñiguez-González³

¹ Cesefor

² Cesefor/InnovaWood

³ Universidad Politécnica de Madrid

Palabras clave / Palavras-chave:

Clases resistentes, Clasificación, Construcción, Flexión, Normalización, Tracción

Resumen / Resumo:

El potencial estructural de la madera de frondosas es alto, aunque el sector de la construcción se ha desarrollado principalmente para la madera de coníferas. En el caso de Castilla y León, solo el 22% de la producción maderera proviene de frondosas, en parte debido a la falta de normativas para clasificar la madera de interés estructural y fomentar ese uso. Este estudio enfatiza la puesta en valor del chopo como material estructural y propone analizar la utilidad de la madera de haya de primera y segunda calidad de sierra con fines estructurales. Estas calidades de haya no son estructurales, sino calidad estética utilizada en los aserrados sin seguir una norma; de ahí la necesidad de estudio. Para este análisis se realizaron clasificaciones visuales y mecánicas y ensayos estáticos a flexión y tracción del chopo y haya en su primera calidad, ensayando la segunda calidad de haya únicamente a flexión. Los resultados mostraron propiedades para chopo similares a las calidades inferiores de las coníferas españolas, pero obtenidas con turnos de corta más cortos. La madera de haya de primera se aproximó a los valores de la madera de eucalipto recogidos en la norma española y se demostró la viabilidad de utilizar la madera de haya de segunda calidad, con destino actual para leña, con fines estructurales. Este estudio allana el camino para desarrollar normativas que respalden la fabricación de productos de ingeniería de la madera utilizando madera de frondosas.

1. Introducción

La creciente tendencia del uso de madera en la construcción se ve impulsada por una política de cambio que está transformando la industria. Este sector es conocido por su alto consumo de energía en la transformación de materiales y la generación de residuos, algunos de los cuales son difíciles de reciclar. Según datos de la ONU, las emisiones de CO₂ del sector de la construcción representan el 40% de las emisiones globales [1]. Esta realidad está impulsando una necesaria y urgente transformación hacia prácticas más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente. La construcción con madera se observa como una de las actividades que pueden contribuir a la descarbonización del ambiente construido.

Por lo general, la construcción con madera está enfocada al uso de madera de coníferas. Sin embargo, hay cada vez más ejemplos en Europa del uso de madera de frondosas con fines estructurales. En España, el uso estructural de maderas de frondosas está principalmente relegado a la rehabilitación de estructuras tradicionales, principalmente roble o castaño, dependiendo de la región.

Hoy en día, en España, la madera de chopo y haya está ganando un creciente interés para su uso en construcción, debido, entre otros aspectos, a la velocidad de crecimiento de la primera y las altas propiedades mecánicas de la segunda. Sin embargo, a diferencia de lo que ocurre en otros países europeos, ninguna de estas dos especies está incluida en la norma de clasificación estructural visual española (UNE 56546:2022) [2]. Esto se evidencia al analizar la norma UNE-EN 1912:2012 [3], donde se puede apreciar que, a diferencia de España, Francia clasifica visualmente la madera de chopo, y Alemania clasifica tanto la madera de chopo como la de haya para su uso en aplicaciones estructurales. En la actualidad en España, la madera de chopo se destina principalmente a la industria del tablero y del embalaje. La madera de haya de primera calidad se destina a la carpintería y mueble, mientras que la de segunda, diferenciada por su aspecto visual de la anterior, se utiliza principalmente como leña.

Por lo tanto, el objetivo principal de este trabajo es la evaluación de la aptitud estructural de la madera de chopo (*Populus x euroamericana* L-214) y haya (*Fagus sylvatica* L.) de primera y segunda calidad de procedencia española a partir de sus propiedades de flexión y tracción.

2. Material y métodos

2.1. Material

El material de ensayo se resume en la Tabla 1, donde, L es media de la longitud total de las piezas en mm; h es el valor medio del canto de mayor dimensión de las piezas en mm; b es el valor medio del canto de menor dimensión de las piezas en mm; y n el número de piezas de la muestra.

Tabla 1. Valores medios de dimensiones y número de probetas.

Grupo	L (mm)	h (mm)	b (mm)	n
Chopo F	2.501	121	31	45
Chopo T	2.501	118	31	40
Haya1º F	3.113	120	29	40
Haya1º T	3.058	120	30	40
Haya2º F	2.811	120	30	40

2.2. Clasificación visual y mecánica

La clasificación visual de la madera chopo se realizó de acuerdo con la norma UNE 56544:1997 [4] ya que las versiones posteriores no incluyen la clasificación de esta especie. La clasificación visual del haya se realizó de acuerdo a los criterios visuales utilizados por los aserraderos para diferenciar la calidad primera y segunda de acuerdo a su color.

La clasificación mecánica se llevó a cabo mediante el equipo de ensayo homologado MTG 960 de Brookhuis (basado en la estimación de propiedades estructurales a partir de la frecuencia natural de vibración de la pieza), llevándose a cabo pruebas para determinar el módulo de elasticidad dinámico ($E_{0,dyn}$) de las distintas probetas ensayadas, calculado de acuerdo con la ecuación 1.

$$E_{0,dyn} = \frac{Dens * \left(\frac{fL1 * 2 * l}{1.000} \right)^2}{1.000.000} \quad (1)$$

donde, $Dens$ la densidad de la pieza en kg/m^3 ; $fL1$ la frecuencia del pico de vibración longitudinal en Hz; y l la longitud de la pieza en mm.

2.3. Ensayos estáticos y determinación de los valores característicos

Se realizaron ensayos de flexión y tracción (Figura 1) de las probetas siguiendo la norma UNE-EN 408:2012 [5] y se determinaron los valores de resistencia a flexión y a tracción, módulos de elasticidad a flexión y a tracción y densidad. Posteriormente se calcularon los valores característicos de acuerdo a las normas EN 384:2016+A2:2023 [6] y UNE-EN 14358:2016 [7].



Figura 1. Madera de haya de 2ª y 1ª calidad (izda., arriba y abajo respectivamente) y ensayo a tracción en madera de chopo (dcha.)

3. Resultados y discusión

Los resultados de los ensayos de flexión y tracción se muestran en las tablas 2 y 3, respectivamente.

Tabla 2. Tabla de valores medios y característicos de los grupos de muestras ensayados a flexión.

Grupo	Valores	n	CH_{medio} (%)	$P_{12,medio}$ (kg/m ³)	ρ_k (kg/m ³)	$f_{m,medio}$ (MPa)	$f_{m,k}$ (MPa)	$E_{m,g,medio}$ (GPa)	$E_{m,l,medio}$ (GPa)	$E_{dyn,0,medio}$ (GPa)
Chopo F	Promedio	40	9,8	409	351	45	28	9,4	10,8	10,5
	CoV (%)		(6)	(8)		(25)	(6)	(11)	(13)	(12)
Haya1ª F	Promedio	40	13,8	699	571	66	45	12,5	13,3	14,0
	CoV (%)		(10)	(10)		(10)	(5)	(9)	(10)	(9)
Haya2ª F	Promedio	38	15,9	680	616	62	34	12,1	13,1	14,1
	CoV (%)		(5)	(5)		(27)	(8)	(16)	(23)	(14)

*Nota: $f_{m,medio} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{f_{m,i}}{k_{h,i}}$

Donde, CH_{medio} es el contenido de humedad medio de la muestra en %. $\rho_{12,medio}$ es el valor medio de la densidad al 12% de humedad en kg/m^3 . ρ_k es el valor característico del 5% percentil de la densidad en kg/m^3 . $f_{m,medio}$ es el valor medio de los f_m/k_h en MPa. $f_{m,k}$ es valor característico del 5% percentil de la resistencia a flexión en MPa. $E_{m,g,medio}$ es el valor medio del módulo de elasticidad global a flexión al 12% de humedad en GPa. $E_{m,l,medio}$ es el valor medio del módulo de elasticidad local a flexión al 12% de humedad en GPa. $E_{dyn,0,medio}$ es el valor medio del módulo de elasticidad dinámico longitudinal o paralelo a la fibra al 12% de humedad en GPa.

Tabla 3. Tabla de valores medios y característicos de los grupos de muestras ensayados a tracción.

Grupo	Valores	n	CH_{medio} (%)	$\rho_{12,medio}$ (kg/m^3)	ρ_k (kg/m^3)	$f_{t,0,medio}$ (MPa)	$f_{t,0,k}$ (MPa)	$E_{t,0,medio}$ (GPa)	$E_{dyn,0,medio}$ (GPa)
Chopo T	Promedio	30	13,6	461	389	45	20	11,3	11,1
	CoV (%)		(12)	(8)		(31)	(11)	(14)	(15)
Haya1ª T	Promedio	40	12,4	714	648	64	43	12,8	14,5
	CoV (%)		(11)	(5)		(21)	(5)	(11)	(14)

*Nota: $f_{t,medio} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{f_{t,i}}{k_{k,i}}$

Donde, $f_{t,0,medio}$ es el valor medio de los $f_{t,0}/k_h$ en MPa. $f_{t,0,k}$ es valor característico del 5% percentil de la resistencia a tracción en MPa. $E_{t,0,medio}$ es el valor medio del módulo de elasticidad a tracción paralelo a la fibra al 12% de humedad en GPa.

A partir de los resultados de ensayo se asignaron las clases resistentes para cada especie de acuerdo a la norma UNE-EN 338:2016 [8], resultando en C22 para el chopo a flexión, y T14,5 a tracción y para el haya, D40 para el haya de primera y D30 para el haya de segunda a flexión. Dado que en la UNE-EN 338 no existen todavía clases resistentes para la madera de frondosas ensayada a tracción, se asignó la calidad DT25 al haya de primera de acuerdo con lo propuesto por Kovryga et al. (2016) [9]. El haya de segunda no se estudió a tracción.

4. Conclusiones

Las propiedades de la madera de chopo resultaron similares a las calidades ME-2 de las coníferas de procedencia española (todas ellas C18 según la UNE-EN 1912:2012 [3]) incluidas en la norma de clasificación visual UNE 56544:2022 [10], con la ventaja de contar con turnos de corta mucho más reducidos.

La madera de haya de primera calidad mostró valores de propiedades mecánicas similares a otras frondosas españolas clasificadas visualmente, como el eucalipto (MEF).

La madera de haya de segunda calidad mostró valores similares a la madera de castaño clasificada visualmente (MEF y MEF-G), lo que brinda la posibilidad de añadir valor a esta calidad, actualmente destinada a leña.

Se observa de los resultados obtenidos a tracción que este método de ensayo resulta de interés para el

uso de especies en productos de la ingeniería de la madera ya que al ser necesaria la transformación de las clases C en T para posteriormente asignar un GL (Clase resistentes de los productos laminados) según se especifica en la UNE-EN 14080:2013 [11]. Siguiendo el ejemplo del chopo, observamos que, a flexión, se obtiene una C22 que equivale a una T13 mientras que por ensayar a tracción se obtiene una clase T14,5.

Las futuras investigaciones deben estar centradas en el desarrollo tecnológico y normativo de estas especies para, con un muestreo suficiente, sentar las bases de sus propiedades y aprovechar todo el potencial que nuestras frondosas nos ofrecen.

Agradecimientos

Este proyecto fue financiado por el programa Interreg SUDOE cofinanciado con fondos FEDER a través del proyecto (SOE4/P1/E1115) y por el Instituto para la Competitividad Empresarial de Castilla y León, cofinanciado con fondos FEDER (CCTT3/20/SO/0001).

Referencias

- [1] Global Alliance for Buildings and Construction, “2020 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emissions, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector - Executive Summary,” 2020. [Online]. Available: <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/34572>
- [2] AENOR, “UNE 56546:2022 Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de frondosas,” 2022.
- [3] AENOR, “UNE-EN 1912:2012. Madera estructural. Clases Resistentes. Asignación de calidades visuales y especies,” 2012.
- [4] AENOR, “UNE 56544:1997 Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural,” 1997.
- [5] AENOR, “UNE-EN 408:2011+A1:2012 Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas,” p. 38, 2012.
- [6] CEN, “EN 384:2016+A2:2023. Structural timber. Determination of characteristic values of mechanical properties and density,” no. May, 2023.
- [7] AENOR, “UNE-EN 14358:2016 Estructuras de madera. Determinación y verificación de los valores característicos,” 2016.
- [8] AENOR, “UNE-EN 338:2016 Madera estructural. Clases resistentes,” Madrid, Nov. 2016.
- [9] A. Kovryga, P. Stapel, and J.-W. Van De Kuilen, “Tensile strength classes for hardwoods,” Graz, Aug. 2016.
- [10] AENOR, “UNE 56544:2022 Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas,” 2022.
- [11] AENOR, “UNE-EN 14080:2013 Estructuras de madera. Madera laminada encolada y madera maciza encolada. Requisitos,” 2013.

1084

EVALUACIÓN DE LA EFICACIA DE TRATAMIENTOS DE PROTECCIÓN SUPERFICIAL APLICADOS EN TABLEROS OLB

Rose Marie Garay Moena¹; Alejandro Bozo González¹

¹ Universidad de Chile

Palabras clave / Palavras-chave:

Recubrimientos superficiales, Protección de tableros de madera, Envejecimiento acelerado, Envejecimiento natural, Comportamiento al fuego

Resumen / Resumo:

La empresa MASISA S.A. fabrica el tablero de uso no estructural “One Layer Board” (OLB), formado con partículas de una capa adheridas con urea melamina formaldehído, mediante prensado. Útil para construir tabiquería de interior, revestimiento de muros, cielos o cierres perimetrales. Para evaluar su desempeño se probó la eficacia de distintos tratamientos de protección superficial (impermeabilizante, esmalte, stain, estuco elastomérico, corcho), por medio de ensayos de comportamiento al fuego, envejecimiento natural en campo de prueba (EN=1 año, registrando cambios en propiedades estéticas cada 2 meses) y de envejecimiento acelerado (EA= 5 semanas, exposición en cámara Shellab a 45°C y 65% HR, realizando evaluaciones físicas, mecánicas y estéticas a 0 (T0), 100 (T1), 200 (T2), 400 (T3), 800 horas (T4). Las probetas se dejaron estabilizar por 15 días, luego se realizaron ensayos de hinchamiento en espesor y absorción de humedad, humedad, densidad anhidra y actual y flexión estática. Los ensayos brindan información de su desempeño a distintas condiciones de exposición, arrojando diferencias significativas entre tratamientos de protección permitiendo estimar su potencial desempeño en construcción para los fines que plantea su fabricante. Los resultados son promisorios para usos no estructurales en construcción adecuadamente protegidos, por diseño y por tratamientos superficiales.

1. Introducción

Los tableros estructurales, contrachapados y OSB, empleados en construcción cumplen exigencias en sus propiedades físico-mecánicas que derivan tanto de protocolos que especifican procesos de fabricación como de las propiedades a alcanzar, usualmente reconocidos en el mercado de tableros como normas voluntarias de producto que señalan los requerimientos para producción, comercializar y especificar tanto contrachapados como OSB denominadas como PS1-19 y PS2-18 [1, 2]. En tanto, los tableros no estructurales también son usados en construcción[3, 4, 5, 6]. Lo relevante es especificar su uso correctamente, de acuerdo a las cualidades que cada uno ofrece y procurar su durabilidad. Investigaciones previas [7, 8, 9, 10] acerca del desempeño de tableros en servicio han sido replicadas para evaluar esta vez el tablero OLB

2. Objetivos

2.1.Objetivo general

Evaluar la eficacia de distintos tratamientos de protección superficial aplicados en tableros OLB mediante ensayos de envejecimiento acelerado.

2.2.Objetivos específicos

- Realizar ensayos de comportamiento al fuego, envejecimiento natural y acelerado
- Caracterizar y Comparar las propiedades de tableros OLB para uso en construcción
- Evaluar y recomendar condiciones apropiadas de uso de este tablero en construcción

3. Material y método

3.1.Materiales

Se utilizaron tableros OLB y tablero OSB estructural como tratamiento control. En la tabla 1, se describen los tratamientos, tablero testigo (OLB desnudo) y tablero control (OSB desnudo).

Tabla 1. Recubrimientos y códigos

Trat	Codig		4	E	Tablero + pintura (esmalte base agua)
1	M	Tablero + estuco elastomérico	5	OLB	Tablero OLB desnudo como control
2	OSB	Tablero OSB 12 mm como testigo	6	IS	Tablero + isocork.
3	I	Tablero + impermeabilizante	7	S	Tablero + Stain

*Todos los recubrimientos fueron aplicados según fabricante a dos capas, con brocha o espátula según correspondiese.

3.2.Método

Comportamiento al Fuego. Según norma ASTM D 1360-90^a. “Ensayo estándar de resistencia al fuego de pinturas. Método de cabina [11]. En probetas de OLB Construcción 12 mm; OSB 11 mm.

Envejecimiento acelerado. Se dimensionan probetas para las propiedades físicas y mecánicas: Densidad actual (NCh792-81), Humedad (NCh 176/1:2019), Absorción de humedad e Hinchamiento en espesor (NCh 793-73). Las que fueron expuestas en cámara climatizada a 45°C y 85% HR, durante 5 semanas, retiradas y se dejadas estabilizar por 15 días. Las evaluaciones se hicieron a 7 tratamientos de protección superficial bajo la norma UNE 927-1(2013) [12].

T0 = inicial, T1 = 200 horas, T2 = 200 horas, T3 = 600 horas y T4= 800 horas

Envejecimiento Natural. Basado en la Norma ASTM D1006:2021[13], práctica estándar para realizar pruebas de exposición exterior de pinturas aplicadas a mano y en fábrica sobre madera y materiales compuestos de madera. Se determinan los cambios de las propiedades decorativas y protectoras de los recubrimientos después de 1 año de exposición norte y sur. se evaluó el daño provocado por la intemperización al tiempo 0, 2, 4, 6 y 8, 10 y 12 meses de exposición norte y sur.

Para la evaluación del sustrato-protector se midió cada daño inspeccionado, se segregó en tres categorías: grave, medio y leve, en cada una de éstas la propiedad evaluada tiene una ponderación de acuerdo con su importancia.

4. Presentación y análisis de resultados

4.1.Comportamiento al Fuego

Tabla 2. Ensayos de comportamiento al fuego en tableros con y sin pintura retardante de llama.

T	Descripción producto	Densidad actual sin pintura g/cc	Densidad actual con pintura g/cc	Pérdida de peso s/p (gr)	Pérdida de peso c/p(gr)	INC sin pintar	INC c/ pintar	Diferencia% S/Pintar/Pintado
1	OLB 12 mm	0,682	0,7146	21,34	14,34	22,16	16,223	73,20
2	OSB 11 mm	0,648	0,648	16,46	17,12	37,91	18,51	48,83

*: índice de carbonización

4.2.Envejecimiento Acelerado

Gráficamente las propiedades físicas y mecánica evaluadas se observan en la Figura 1 a, b, c y d

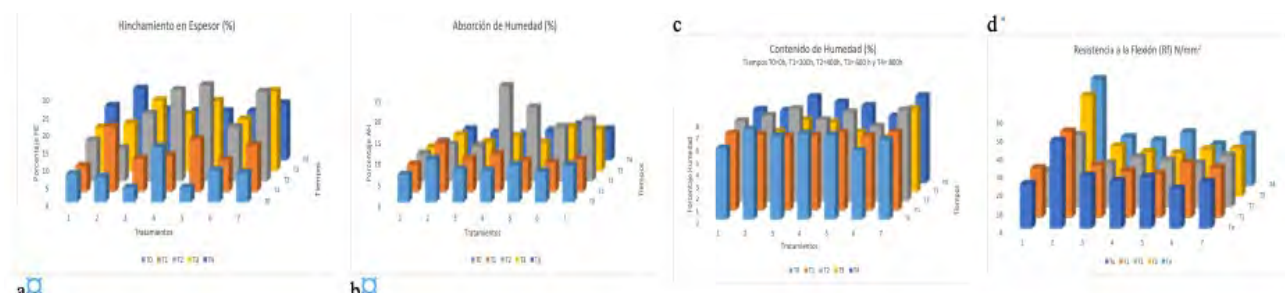


Figura 1 a,b,c,d. Resultados de Propiedades físicas HE, AH, H y mecánica F

4.3.Envejecimiento Natural

Tableros expuestos en campos de prueba Exposición Sur (ExS)y Norte(ExN)



Figura 2 a,b,c y d: Comparación gráfica Inicio del ensayo T0 a y b y T3 c y d (8 meses) ExS y ExN

5. Conclusiones

El estudio muestra cómo es posible mejorar el desempeño en servicio de los tableros OLB cuando estos son recubiertos por protectores superficiales, los ensayos permiten cuantificar el aporte en protección que se obtiene al comparar con aquellos no protegidos.

Al usar como tratamiento testigo tableros OSB y compararlo con OLB, se verifica que las diferencias en propiedades físicas humedad, hinchamiento en espesor y aborsorción de humedad, no arrojan diferencias significativas entre ambos tableros y que en la propiedad mecánica de flexión si existen diferencias a favor del tablero estructural OSB, por lo que se debe tener especial cuidado al especificar la función que cumplen los tableros OLB en construcción, las cuales están bien descritas por el fabricante y los usuarios deben tenerlo presente y no usar ambos tableros como equivalentes.

Agradecimientos

Se agradece a Masisa S.A por facilitar el material de ensayo y al profesor Rodrigo Araya por el apoyo estadístico de los datos.

Referencias

- [1] PS1-19. Contrachapado estructural. Norma voluntaria de producto <https://www.apawood.org/publication-search?q=PS1-09>
- [2] PS2-18 Norma de desempeño para tableros estructurales de madera. Norma voluntaria de producto. <https://www.apawood.org/Data/Sites/1/documents/americalatina/ex-t350-la.pdf>
- [3] Calle, R. (2019). Caracterización del comportamiento mecánico de uniones clavadas madera-tablero en sistemas marco plataforma. http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/3361/1/Calle_Miranda_Rodrigo_Andres.pdf
- [4] MASISA .(2022) Elemento Constructivo Vertical Con OLB Construcción. <https://production-masisa.s3.amazonaws.com/pim/1/a/8/a/1a8a0a5d21e1c46e23d07dd86c96c4570053c7c0_Ficha_Tecnica_OLB_Construccion_Muro_Perimetral.pdf>
- [5] WARMBIER, K., & WILCZYŃSKI, M. (2016). Resin content and board density dependent mechanical properties of one-layer particleboard made from willow (*Salix viminalis*). *Drvna industrija*, 67(2), 127-131.
- [6] KAMKE FA, NAIRN JA. (2023) Advances in structural wood products adhesive bonding. In: Dillard DABT-A in SAB (Second E, editor. Woodhead Publishing in Materials [Internet]. Woodhead Publishing; p. 417–55. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323912143000016>
- [7] Garay, R., Inostroza, M., & Ducaud, A. (2017). Color and gloss evaluation in decorative stain applied to cases of *Pinus radiata* wood treated with copper azole micronized Type C. *Maderas-Cienc Tecnol*, 19(1), 21–38. Retrieved from <https://revistas.ubiobio.cl/index.php/MCT/article/view/2660>

- [8] Garay, R.; Henríquez, M. (2010) Comportamiento al fuego de tableros y madera de pino radiata d. Don con y sin pintura retardante de llama. *Maderas-Cienc Tecnol* 12(1):11-24.
- [9] Garay, R.; Poblete, H.; Karsulovic, J.T. (2009a) Evaluation of oriented strandboard and plywood subjected to severe relative humidity and temperature conditions. *Forest Prod J* 59(3):84-90.
- [10] Garay, R. (2009b) Effect of two Guards Surface Properties Wooden boards, after a year of exposure to the elements. *Información Tecnológica* 20(4):123-130.
- [11] EN 927. (1997) Paints and Varnishes. Materials and Systems for outer coatings wood. Part 1 y 2. Standard. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- [12] ASTM D1360 - 98 (revisada en 2011). Método de prueba estándar para la Retardancia de fuego de Pinturas (Método de Gabinete)¹
- [13] ASTM D1006/D1006M-21. Standard Practice for Conducting Exterior Exposure Tests of Hand and Factory Applied Paints on Wood and Wood Composite Materials. Book of Standards Volume: [06.01](#). Developed by Subcommittee: [D01.27](#). Pages: 8. DOI: 10.1520/D1006_D1006M-21. ICS Code: 87.040.

1086

EVALUACIÓN DE UNIONES FINGER-JOINT PARA PRODUCTOS DE MADERA DE INGENIERÍA DE PINO SILVESTRE (*PINUS SYLVESTRIS* L.) DE ORIGEN ESPAÑOL

Silvia Gómez¹; José Luis Villanueva¹; Mario Azaña Galán¹; Gonzalo Caballé¹

¹ CESEFOR

Palabras clave / Palavras-chave:

PUR, MUF, Resistencia mecánica a flexión, MLE, MME, Madera tecnológica

Resumen / Resumo:

La mayor parte de madera laminada que se emplea en España procede de la industria centro y noreuropea, la cual fabrica mayormente con madera de abeto (*Abies alba*) y de píceas (*Picea abies*). En cuanto a madera de conífera local, en España la industria de la madera de ingeniería (EWP) mayormente fabrica con pino radiata (*Pinus radiata*) y pino marítimo (*Pinus pinaster*). El pino silvestre (*Pinus sylvestris*) es una de las especies con mejores prestaciones mecánicas y aptitud para la fabricación de productos tecnológicos, sin embargo, en nuestro país su empleo en la EWP es anecdótico. En el marco del proyecto IbericaLam, cuyo fin último es el desarrollo de una línea de negocio centrada en la fabricación de diferentes productos laminados de madera de pino silvestre en Castilla y León, evaluamos el comportamiento de las uniones finger-joint de madera de pino silvestre nacional, comparando un total de 3 referencias distintas de adhesivos comerciales monocomponentes de poliuretano (PUR) y de adhesivo melamina urea formaldehído (MUF). Los resultados muestran la adecuación de los 3 adhesivos para la fabricación de elementos de madera laminada encolada y madera maciza estructural de pino silvestre de origen nacional, así como el hecho de que la unión dentada no resulta un factor limitante a la hora de fabricar madera laminada, incluso en clases resistentes elevadas. Esto sugiere que el pino silvestre de origen nacional es una opción viable para potenciales proyectos de la EWP en España.

1. Introducción

Las políticas de descarbonización del sector de la construcción están redirigiéndolo hacia el empleo de materiales de bajo impacto ambiental. De esta manera, en España la apuesta por los materiales lignocelulósicos de origen local como la madera de pino silvestre (*Pinus sylvestris*) frente a los productos de madera importados cobra gran sentido. Por otro lado, la normativa europea está evolucionando hacia la eliminación de adhesivos con emisiones de COVs como el formaldehído y los isocianatos, previéndose una posible sustitución o reformulación de los adhesivos más comúnmente empleados en la industria de la madera de ingeniería y de los tableros de madera (adhesivos PUR y adhesivos urea formaldehído, UF) por adhesivos de origen natural libres de emisiones o por adhesivos de bajas emisiones (como los melamina urea formaldehído, MUF).

En esta línea, el presente estudio busca analizar el comportamiento estructural de piezas de gran escuadría de pino silvestre empalmados mediante uniones tipo *finger joint* -para su posterior empleo en la fabricación de vigas KVH y MME (dúos, tríos, entre otros)- y de láminas de la misma madera empalmadas mediante unión tipo *finger joint* -para su empleo en la fabricación de vigas de madera laminada encolada (MLE)-, con diferentes adhesivos de tipo PUR y MUF.

El grado de aptitud de la madera para uso estructural requiere de la realización de ensayos experimentales de determinación de las propiedades mecánicas, de acuerdo con normativas nacionales y/o europeas. En España, la norma que regula los requisitos de prestación de la madera laminada encolada y de la madera maciza encolada (MME) es la EN 14080:2022 [1] y la norma que regula los de la madera maciza estructural con empalmes por unión dentada es la EN 15497:2014 [2]. De esta manera, la calidad y clase resistente asignada a la madera estructural encolada (MLE, MME) corresponde siempre a la clase resistente de las láminas utilizadas para su fabricación.

2. Objetivos

El objetivo del presente estudio fue comprobar la resistencia estructural de uniones *finger joint*, con adhesivos de diferente naturaleza, para la fabricación de productos de madera de ingeniería (MLE, KVH, MME) fabricados con *Pinus sylvestris* de origen español.

3. Metodología

3.1.Muestreo

Dado que el objetivo del presente estudio se centraba en las uniones encoladas y no en las posibles influencias sobre las propiedades físicas y mecánicas de la región de procedencia de la madera, se utilizó madera aserrada proveniente únicamente de los pinares del Sistema Ibérico Norte.

3.2.Clasificación visual

Teniendo en cuenta la Norma 56544:2022 [3], la madera fue clasificada visualmente como ME-1, que se corresponde con la clase resistente C24.

3.3.Fabricación de las probetas de ensayo

El proceso de fabricación se compuso de las siguientes fases: retestado y corte a las dimensiones finales, precepillado de la madera en moldurera, fresado del dentado (*finger joint*), encolado de la unión y cepillado a las dimensiones finales.

Las secciones elegidas para las probetas se decidieron pensando en los potenciales productos de ingeniería. Respecto a su longitud, se estableció según las exigencias de la Norma EN 408:2011+A1:2012 [4] para los ensayos a flexión de la unión dentada. El fresado del dentado, se realizó en la máquina CM Machine y en todas las probetas las dimensiones del diente fueron de 15 mm de longitud y 3,8 mm de paso. Respecto al encolado, se siguieron los requerimientos de las fichas técnicas de cada referencia de adhesivo así como los requisitos de fabricación contemplados en la norma EN 14080:2022 [1].

Se fabricaron probetas de dos secciones, una sección de 190x64mm y otra de 160x40mm. Las de mayor sección, fueron encoladas con 3 adhesivos diferentes, Loctite HB S109 de tipo PUR, Jowapur 686_20 de tipo PUR y AkzoN GripPro de tipo MUF. Se fabricaron 10 probetas para cada uno de los adhesivos. En el caso de las probetas de menor sección, se fabricaron 60 unidades, 30 de ellas con el adhesivo MUF AkzoN GripPro y 30 con el adhesivo PUR Loctite HB S109

En todos los casos, se controlaron las condiciones ambientales de fabricación, se cuantificó la cantidad de adhesivo incorporado a cada unión -con el fin de comprobar que se cumplían las especificaciones del fabricante- y se aplicaron las presiones indicadas por el fabricante de la maquinaria.

3.4. Ensayos experimentales de determinación de las propiedades mecánicas

Todas las probetas fabricadas se ensayaron siguiendo el procedimiento operativo de ensayo que establece la Norma EN 408:2011+A1:2012 [4], teniendo en cuenta las consideraciones específicas incluidas en el apartado E.2 de la Norma EN 14080:2022 [1].

En el caso de las láminas con destino a la fabricación de MME, las probetas fabricadas se ensayaron de canto, siendo “h” la mayor dimensión de la sección; conforme a las condiciones que las láminas tendrían en sus condiciones reales de uso. En el caso de las láminas con destino la fabricación de MLE, las probetas se ensayaron de cara.

El contenido de humedad se determinó según la norma EN 13183-1 [5], a partir de una rebanada de lámina tomada lo más cercana posible al punto de rotura. La densidad de cada probeta (ρ) se obtuvo mediante la relación entre el peso y las dimensiones de la rebanada al contenido de humedad medido. La resistencia a flexión (f_m) se determinaron según las ecuaciones dadas por la norma EN 408:2010/A1:2012 [4]. Los valores característicos de las propiedades fueron calculados según las normas EN 384:2016+A2:2023 [6] y EN 14358:2016 [7].

4. Resultados y discusión

4.1. Propiedades mecánicas de las uniones finger-joint con destino kvh y mme

La Tabla 1 presenta los valores característicos (percentil 5) de resistencia a flexión obtenidos experimentalmente en las uniones finger-joint para KVH y MME y para cada referencia de adhesivo.

Tabla 1. Resultados de ensayos a flexión de las uniones finger-joint con destino KVH y MME

Nombre del adhesivo	Tipo	Nº ensayos	Nº finger rotos	Resistencia media (N/mm ²)	Desviación típica	Percentil 5 (N/mm ²)*
AkzoNobel GripPro Plus	MUF	10	5	48,09	10,41	26,23
Jowapur 686.20	PUR	10	4	57,51	8,28	40,10
Loctite HB S109	PUR	10	3	45,16	9,43	25,33
TOTAL		30	12	50,25	10,55	30,52

Las tres colas ensayadas han dado un valor característico por encima de 24 N/mm², lo que permitiría fabricar KVH y MME certificados como C24 utilizando una madera clasificada con características resistentes suficientes. Por otro lado, la cola Jowapur 686.20 (PUR), ha dado una media y un valor característico más elevado que el resto, aunque los resultados obtenidos del ANOVA muestran que las diferencias no son significativas ($p\text{-valor}=0,2056$). Finalmente, en los tres casos ensayados, la unión finger-joint no supone un limitante para la fabricación de elementos estructurales KVH y MME.

4.2. Propiedades mecánicas de las uniones finger-joint con destino mle

La Tabla 2 presenta los valores característicos de resistencia a flexión obtenidos experimentalmente en las uniones finger-joint con destino vigas laminadas y para cada referencia de adhesivo.

Tabla 2. Resultados de ensayos a flexión de las uniones finger-joint con destino MLE

Nombre del adhesivo	Tipo	Nº ensayos	Nº finger rotos	Resistencia media (N/mm ²)	Desviación típica	Percentil 5 (N/mm ²)*
AkzoNobel GripPro Plus	MUF	30	12	66,71	11,02	46,10
Loctite HB S109	PUR	30	1	73,15	9,33	55,70
TOTAL		60	13	69,93	10,25	54,38

Las dos colas ensayadas han dado un valor característico por encima de 45 kN/mm², lo que permitiría fabricar madera laminada de altas prestaciones estructurales (GL24h, GL28H, GL32H y GL36H), siempre y cuando se cumplieran el resto de los requisitos establecidos en la Norma EN 14080:2022 [1]. Del análisis ANOVA se concluye que sí existen diferencias significativas ($p\text{-valor}=0,0136$) entre los valores de resistencia media a flexión obtenidos para cada tipo de adhesivo, siendo el valor más elevado el correspondiente al adhesivo de tipo PUR.

Con el objetivo de simplificar las comparaciones y mantener la consistencia con otras investigaciones utilizadas como referencia, se ha decidido no extender los datos de la muestra a una población teórica. Esta elección se fundamenta en la ausencia de varias submuestras y procedencias, cuya ausencia penaliza significativamente los resultados obtenidos en este estudio.

5. Conclusiones

Se puede concluir que queda verificada la adecuación de las tres referencias de adhesivos para su empleo en la fabricación de uniones finger-joint con madera de pino silvestre de origen español.

Además, se ha podido comprobar que la unión finger-joint no resulta un limitante a la hora de fabricar madera laminada encolada para clases resistentes elevadas.

Por último, revisando los valores característicos de las muestras ensayadas, queda demostrado que a menor tamaño de la sección empalmada mejor comportamiento de la unión dentada.

Agradecimientos

Este proyecto de investigación ha sido financiado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) de la Unión Europea y la Junta de Castilla, a través del Instituto para la Competitividad Empresarial de Castilla y León (ICE).

Referencias

- [1] European standard (2022) EN 14080:2022. Timber structures. Glued laminated timber and glued solid timber. Requirements. European Committee of Standardization (CEN), Brussels, Belgium.
- [2] European standard (2012) EN 15497:2014. Structural finger jointed solid timber. Performance requirements and minimum production requirements.
- [3] European standard (2022) EN 56544:2022. Visual grading for structural sawn timber. Coniferous timber.
- [4] European standard (2012) EN 408:2010+A1:2012. Timber structures. Structural timber and glued laminated timber. Determination of some physical and mechanical properties.
- [5] European estándar (2002) EN 13183-1:2002. Moisture content of a piece of sawn timber - Part 1: Determination by oven dry method.
- [6] European standard (2023) EN 384:2016+A2:2023. Structural timber - Determination of characteristic values of mechanical properties and density.
- [7] European standard (2016) EN 14358:2016. Timber structures - Calculation and verification of characteristic values

1087

EVALUACIÓN IN-SITU DE LA VARIACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO DE LA MADERA ESTRUCTURAL EXPUESTA A LA INTEMPERIE EN ATMÓSFERAS TROPICALES VOLCÁNICAS

Viviana Paniagua Hernández¹; Cindy Torres Quirós¹; Beatriz González Rodrigo²

¹ Universidad de Costa Rica

² Universidad Politécnica de Madrid

Palabras clave / Palavras-chave:

Atmósferas volcánicas, Ciprés, Teca, Evaluación In situ, MOEdin, Ultrasonido

Resumen / Resumo:

El objetivo de esta investigación fue el análisis del impacto de una atmósfera acida volcánica en las propiedades mecánicas de las maderas estructurales *Tectona grandis* y *Cupressus lusitánica*. Para ello los especímenes de estudio fueron expuestos a la intemperie en una zona volcánica activa Poás, y una zona testigo, sin contaminación de dióxido de azufre (SO₂), Braulio Carrillo, bosque pluvial montano y misma altitud. Se evaluó experimentalmente el Módulo elástico dinámico MOE_{din}, obtenido mediante la velocidad de onda ultrasónica en campo (in situ), con probetas tamaño estructural a lo largo de 3 años. Se emplearon los factores de ajuste para predecir la velocidad estándar a un contenido de humedad (CH) de 12% (V₁₂) a partir de las velocidades obtenidas a diferentes CH (V_H). Lo cual permitió comparar los resultados de las mediciones a una misma pieza en el tiempo. Esta investigación concluyó que el efecto de la exposición a la intemperie no está influido por la contaminación ácida provocada por las emanaciones volcánicas, por lo tanto, se considera que la madera es un material estructural adecuado para infraestructuras turísticas en zonas volcánicas.

1. Introducción

La degradación de la madera expuesta a la intemperie en atmósferas volcánicas no ha sido reportada, en estos contextos se debe considerar los agentes ácidos (gases y lluvia) [1], [2]. Zonas con estas características son muy comunes en Costa Rica (CR) [3], país tropical, con alta amenaza sísmico y volcánicamente activo; condicionado por las placas Cocos, Caribe y Nazca. En el cual, los volcanes forman parte de zonas protegidas (Parques Nacionales) donde podría ser prominente el uso de madera estructural para la creación de infraestructura turística. Esto, considerando la meta del país de promover la construcción sostenible [4], [5].

En ambientes tropicales, la alta humedad relativa del ambiente estabiliza a la madera con altos contenido de humedad (CH) que varían a lo largo de las estaciones (seca y lluviosa) y que modifican las propiedades de la madera [6]. De modo que la exposición de la madera a la intemperie en la zona volcánica podría implicar la degradación natural acelerada debido a estar en una ambiente donde podrían proliferar los agentes bióticos, sin embargo, otros efectos como la foto degradación, lenta y superficial, podría tener poca influencia en las propiedades mecánicas globales [7].

Las propiedades mecánicas pueden ser evaluadas en el tiempo empleando métodos no destructivos que permiten ahorrar tiempo, costos, ofrecen una alta precisión en los resultados obtenidos y permiten evaluar una misma pieza de madera en el tiempo, in situ en las condiciones reales y sin interferir en el proceso meteorización y/o degradación natural. El método no destructivo mediante ultrasonido permite a partir de la velocidad de onda ultrasónica estimar el módulo de elasticidad dinámico (MOEdin) [8],[9] el cual presenta una buena correlación lineal con el módulo estático (MOE) [10]. El objetivo de esta investigación es el análisis a lo largo de 3 años, del impacto de una atmósfera acida volcánica, en el MOEdin de las maderas *Tectona grandis* y *Cupressus lusitánica*, con especímenes de estudio expuestos a la intemperie en una zona volcánica activa Poás, y una zona testigo sin SO₂, Braulio Carrillo.

2. Métodos

Esta investigación se llevó a cabo con 32 probetas (16 teca y 16 ciprés) en tamaño estructural con dimensiones 2 x 4 x 68" (48 x 98 x 1720 (mm), según la norma ASTM-D-198 [11] las 16 probetas fueron analizadas en las series de tiempo (0, 3, 6, 9, 26, 30, 36, meses). Las muestras se obtuvieron de madera sólida procedente de plantaciones forestales locales, de aserraderos ubicados en La Rita, Guápiles, Limón, (teca) y Paso Llano, San José de la Montaña, Heredia (ciprés). Las edades de la plantación fueron 14 (teca) y 40 años (ciprés) respectivamente, debido a que representan la madurez con la que estas se comercializan localmente. Las probetas fueron ubicadas en dos zonas con características climáticas parecidas y altitud, pero con muy distinta contaminación atmosférica debido a los volcanes. La primera de las zonas es el Parque Nacional Volcán Poás (P) (10°10'10.36"N, 84°13'56.00"O, a 35 km de San José, elegido por su de intensa y sostenida actividad vulcanológica, su alta afluencia turística. La zona testigo, Parque Nacional Braulio Carrillo (B.C.) 10°09'36"N 83°58'28"O. El estudio se llevó a cabo por 30 meses de setiembre de 2020 a marzo de 2023. Los datos de la concentración del Dióxido de azufre (SO₂) se obtuvo del Observatorio vulcanológico y sismológico de Costa Rica (OVSICORI), estaciones Expo-GAS que determinan la relación CO₂/SO₂, cada 30 segundos.

Para cada punto de la serie de tiempo, se midió la velocidad ultrasónica VH en campo con un equipo de ultrasonido portátil (Sylvatest duo-Lausanne, Suiza), que permitió la determinación del tiempo de vuelo (ToF) de la onda ultrasónica generada por transductores piezoeléctricos a una frecuencia de 54 kHz. Las mediciones se obtuvieron en la dirección longitudinal por medio contacto directo, (con los transductores confrontados en las testas, en el centro de la sección transversal); considerando que VH en sentido longitudinal ofrece el parámetro más consistente para la evaluación global de los miembros estructurales. La velocidad de propagación de la onda longitudinal VH de cada espécimen se midió repetidamente tres veces [12]. Para cada tiempo se registraron las dimensiones (volumen) y la masa, para obtener la densidad aparente ρ , el CH fue medido con un higrómetro y posteriormente corregido cuando se obtuvo la masa seca al final de experimento. Posteriormente se emplearon los factores de corrección para un CH estándar del 12 %. Ec. 1 para teca y Ec. 2 para ciprés, respectivamente, obtenidos en una fase de investigación preliminar [13].

$$V_H/V_{12} = 1 - 0.0083 \cdot (MC - 12) \quad (1)$$

$$V_H/V_{12} = 1 - 0.0106 \cdot (MC - 12) \quad (2)$$

Al final del periodo de estudio 36 meses los especímenes fueron llevados al laboratorio, se acondicionaron dentro de una cámara climatizada. Se midió las V_{12} , posteriormente se secaron las probetas para corregir los CH por masa seca [14].

Para el control de las condiciones meteorológicas y la acidez del ambiente se emplearon expositores. Los datos de las variables climáticas se obtuvieron de estaciones meteorológicas ubicadas en los sitios de estudio. Además, se colocaron colectores de agua de lluvia y de niebla (estos últimos bajo techo) para la recolección mensual y análisis de nivel de pH, así como la detección y concentración de aniones cloruro, fluoruro, sulfato y nitrato (Cl^- , F^- , NO_3^- y SO_4^{2-}).

Para evaluar el comportamiento de la variación del MOE_{din} en el tiempo se realizó un estudio de los outliers, un análisis, homocedasticidad y normalidad de los residuos y se analizó la varianza mediante un ANOVA para cada grupo de estudio.

3. Resultados y discusión

Para la zona volcánica, el estudio identificó que el agua condensada de la niebla puede alcanzar valores de pH altamente ácidos y una concentración sustancial de iones de sulfato SO_4^{2-} en niebla significativamente más altos que los observados en otros climas tropicales (pH-niebla (3.34 ± 0.52), SO_4^{2-} (23.44 ± 22.99) mg/L). Si bien el SO_2 atmosférico tuvo niveles de concentración relativamente bajos durante todo el experimento (0-1.5) ppm. Por lo tanto, el principal contribuyente a las condiciones ácidas fue la niebla ácida. La variación del MOE_{din} , para ambas especies, y zonas de estudio no presentan una tendencia clara a lo largo del tiempo (**Figura 1 y Tabla 1**).

El en caso de la teca, contrariamente a lo que ocurre en otros materiales de construcción en ambientes ácidos, el MOE_{din} aumenta ligeramente en los primeros meses, experimentando después una ligera disminución. En el caso de Ciprés se observa una leve disminución del MOE_{din} en el tiempo para ambos sitios; sin embargo, no es significativa (**Tabla 1**). En la **Figura 2** se presenta el análisis de normalidad para ambas especies.

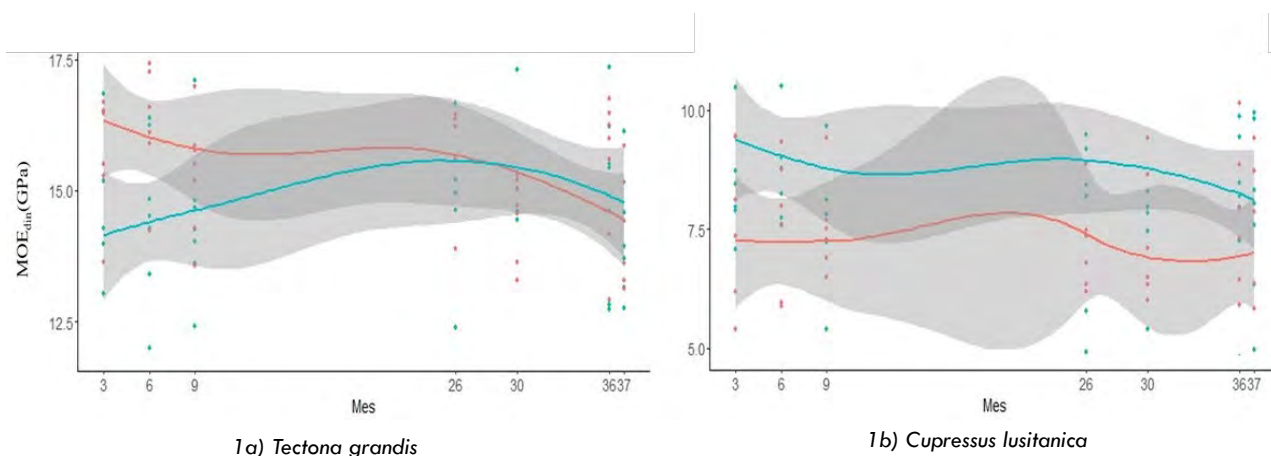


Figura 1. Variación del MOE_{din} en el tiempo, *Tectona* (Figura 1a), *Cupressus* (Figura 1b) inter-sitios Poás y Braulio Carillo. En color gris se observan los intervalos de confianza.

Tabla 1. Análisis de regresión y ANOVA de la variación a lo largo del tiempo y de los lugares de muestreo (volcánico o referencia) para madera estructural de *Tectona grandis* y *Cupressus lusitanica*

ANOVA <i>Tectona grandis</i>						ANOVA <i>Cupressus lusitanica</i>					
	Grados libertad	Suma cuadrados	Error Cuad. medio	Prueba F	Valor P		Grados libertad	Suma cuadrados	Error Cuad. medio	Prueba F	Valor P
sitio	1	0.132	0.1320	0.06	0.810	sitio	1	120.019	120.019	35.59	0.000
tiempo	6	40.721	6.7868	3.00	0.012	tiempo	6	4.435	0.739	0.22	0.970
sitio*tiempo	6	28.239	4.7066	2.08	0.067	sitio*tiempo	6	4.286	0.714	0.21	0.972
Error	70	158.435	2.2634			Error	84	283.233			

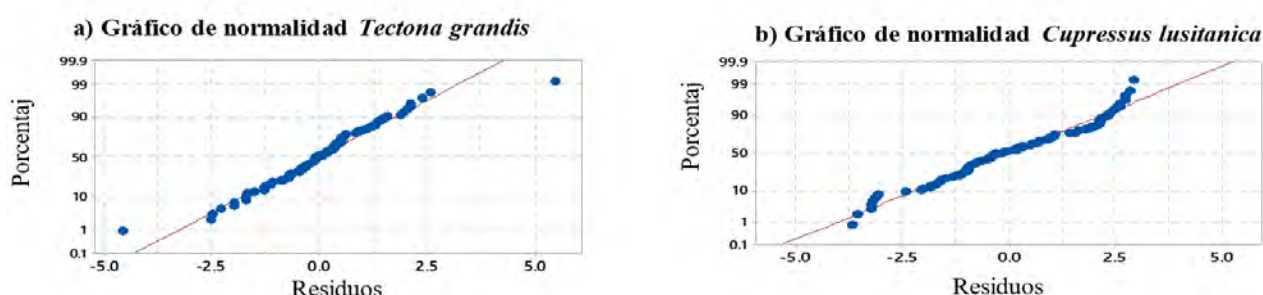


Figura 2. Gráficos de normalidad *Tectona* (Figura 2a), *Cupressus* (Figura 2b) inter-sitios Poás y Braulio Carillo.

4. Conclusiones

En el presente estudio se ha analizado la variación del MOE_{din} a lo largo de 3 años en madera estructural de dos especies en dos lugares con diferentes concentraciones de contaminación de gases volcánicos, sin y con una alta incidencia. A partir del análisis de la varianza se puede concluir que la madera experimenta diferencias significativas entre los sitios. En el caso de la teca, el comportamiento de las piezas difiere de forma significativa a través del tiempo, con un nivel de significancia de 0.05 (95% confianza). En cambio, para la madera de *Cupressus lusitanica*, el comportamiento es similar en el tiempo, pero diferente entre los sitios. Si bien para ambas especies se identificó una diferencia significativa entre las medias del MOE_{din} en los meses, esta no es de tan alto impacto. Es decir, desde una perspectiva cuantitativa no hay un impacto considerable en la reducción del MOE_{din} . Por lo tanto, se considera que la madera es un material estructural adecuado para infraestructuras turísticas en zonas volcánicas.

Referencias

- [1] H. Williams-Jones, G., & Rymer, "Hazards of volcanic gases," in *The encyclopedia of volcanoes*, Academic Press., 2015, pp. 985–992.
- [2] T. A. Mather, "Volcanoes and the environment: Lessons for understanding Earth's past and future from studies of present-day volcanic emissions," *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, vol. 304, pp. 160-179., 2015.

- [3] T. P. de Moor, J. M., Aiuppa, A., Pacheco, J., Avard, G., Kern, C., Liuzzo, M., ... & Fischer, "Short-period volcanic gas precursors to phreatic eruptions: Insights from Poás Volcano, Costa Rica," *Earth Planet. Sci. Lett.*, vol. 442, pp. 218-227., 2016.
- [4] H. R. Woodard, A. C., & Milner, "Sustainability of timber and wood in construction," in *Sustainability of construction materials*, Woodhead Publishing., 2016, pp. 129–157.
- [5] FAO, "Material. Available online:," *Action Urged to Promote Wood as a Sustainable Construction*. Date Accessed July, 2023, 2021. [Online]. Available: <https://www.fao.org/forestry/news/99169/en/>.
- [8] E. A. Mascarenhas, A. R. P., de Melo, R. R., Pimenta, A. S., Stangerlin, D. M., de Oliveira Corrêa, F. L., Sccoti, M. S. V., & de Oliveira Paula, "Ultrasound to estimate the physical-mechanical properties of tropical wood species grown in an agroforestry system," *Holzforschung.*, vol. 75, 2020.
- [9] B. Kasal, . "Semi-destructive method for in-situ evaluation of compressive strength of wood structural members. ," *For. Prod. J.*, vol. 53(11/12), pp. 55-58., 2003.
- [10] S. Chauhan and A. Sethy, "Differences in dynamic modulus of elasticity determined by three vibration methods and their relationship with static modulus of elasticity," *Maderas. Cienc. y Tecnol.*, vol. 18(2), pp. 373-382., 2016, doi: 10.4067/S0718-221X2016005000034.
- [11] ASTM-D198-21a, "ASTM-D198 Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes." ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, 2015.
- [12] M. Yamasaki, C. Tsuzuki, Y. Sasaki, and Y. Onishi, "Influence of moisture content on estimating Young's modulus of full-scale timber using stress wave velocity," *J. Wood Sci.*, vol. 63, no. 3, pp. 225–235, Jun. 2017, doi: 10.1007/S10086-017-1624-5.
- [13] V. Paniagua, J. Corrales, C. Torres, B. Gonzalez.-Rodrigo.- Forests, and U. 2022, "Influence of Timber Moisture Content on the Ultrasonic Wave Velocity Measurement of *Tectona grandis* LF and *Cupressus lusitanica* M. from Costa Rica," *For. Mdpi*, 2022, doi: 10.3390/f13081296.
- [14] ASTM-D4442-16, "Standard Test Methods For Direct Moisture Content Measurement Of Wood And Wood-Based Materials." ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2016.

1088

EVALUACIÓN PARAMÉTRICA DE MUROS POSTENSADOS DE CLT EN ESTRUCTURAS AISLADAS SÍSMICAMENTE

Jorge Mellado Péndola¹; Peter Dechent Anglada¹; Franco Benedetti Leonelli²; Alexander Opazo Vega²

¹ Universidad de Concepción

² Universidad del Bio-Bio

Palabras clave / Palavras-chave:

CLT, resistência, Rigidez, Rolling shear, Madeiras de reflorestamento

Resumen / Resumo:

El diseño de edificios de CLT de mediana altura en zonas de gran sismicidad representa un desafío, ya que los sistemas de CLT tienden a ser rígidos, lo que induce grandes demandas de fuerza y aceleración. Además, la baja capacidad intrínseca de deformación y disipación de energía de conectores convencionales sugiere que se deben utilizar pequeños factores de reducción de fuerza en el diseño sísmico, lo que dificulta el diseño convencional de edificios de CLT en altura. Una alternativa para el diseño de edificios de CLT convencionales en zonas sísmicas, puede resultar de combinar la construcción con un sistema de aislación sísmica, lo que facilita el diseño, y permite aumentar la altura de la edificación con un mejor desempeño sísmico. Este trabajo realiza un análisis paramétrico, para edificios de 8 pisos aislados sísmicamente, con muros postensados de CLT. El estudio consideró el análisis de diferentes cantidades y longitudes de muros para lograr diferentes períodos objetivos en base fija entre 0,4 y 1,0 segundos. Con base en los resultados de este trabajo, se propone una estrategia de diseño simplificada para edificios de CLT aislados sísmicamente, lo que permite una estimación efectiva de la fuerza de los anclajes en los muros.

1. Introducción

La fabricación de diafragmas horizontales y verticales de CLT se presenta como una nueva oportunidad para la construcción de edificios de mediana altura, considerando que la madera es un recurso natural renovable y que ofrece grandes ventajas ambientales. En su forma convencional, a la construcción en CLT se le asigna un factor de reducción del espectro elástico de diseño sísmico levemente superior a $R=2$, lo que limita la altura de estas edificaciones por la exigencia de diseño en los anclajes. La aislación sísmica representa una solución alternativa, donde es posible liberar restricciones y aumentar el número de pisos con niveles de demanda de diseño mínimos, debido al desacople de la estructura con el movimiento del suelo que generan los aisladores sísmicos, lo que reduce las aceleraciones a las que se ve sometida la estructura concentrando las deformaciones en la interfaz de aislación.

Esta investigación plantea un análisis paramétrico para estructuras aisladas donde se varía la cantidad y longitud de los muros de CLT para diferentes periodos objetivos de la superestructura considerada de base fija, entre 0,4 y 1,0 segundos. Se considera el sistema constructivo tipo *balloon* postensado a una losa base de hormigón armado sobre el sistema de aislación. Se considera el sistema *balloon* principalmente, para evitar el aplastamiento de la madera perpendicular a la fibra que ocurre al utilizar el sistema constructivo plataforma, y así alcanzar alturas mayores de la edificación. El estudio permite proponer un diseño simplificado para muros de edificios aislados, que, en este trabajo en particular, y para describir la metodología se muestra de manera general para edificios de 8 pisos. El sistema de anclaje es el de postensado para resistir el momento volcante y el de uniones de corte para controlar el deslizamiento. El estudio se realiza inicialmente para suelo tipo D y zona sísmica III, que es exigente en Chile. Se considera el análisis no lineal del sistema de aislación con el supuesto de comportamiento lineal de la superestructura. Los análisis se realizan para un periodo objetivo del sistema de aislación lo suficientemente alto para lograr una diferencia con el periodo fundamental del suelo tipo D, como por ejemplo el de la ciudad de Concepción, el cual resulta ser cercano a los 3 segundos. Se otorga énfasis al diseño de los paneles de muros, al sistema de postensado, a las uniones de corte y a las uniones entre paneles de muros paralelos.

2. Materiales y metodología

La metodología de trabajo consideró la modelación de los muros de CLT en grupos de estructuras, variando la cantidad de muros y así el periodo de la superestructura. Se consideraron las propiedades ortotrópicas del material, las cuales fueron calculadas asumiendo pino radiata chileno, como una manera de poder visualizar el potencial de esta madera que proviene de grandes plantaciones en Chile, y de esa manera impulsar la construcción sustentable.

Primeramente, se consideraron estructuras en base fija con el objetivo de estimar la masa horizontal del piso que debe ser asignada a cada muro de una planta dada, para alcanzar un periodo objetivo específico para las superestructuras. Las longitudes de muros se variaron entre 1 y 6 metros para incluir periodos de la superestructura entre 0,4 y 1,0 segundos. En cuanto al diseño de los elementos de CLT, procedimientos conocidos fueron empleados [1-4].

3. Resultados y discusión

Los resultados permitieron obtener curvas de tendencia, donde en base a la longitud de muros de corte y periodo objetivo de superestructura, se estima la masa horizontal del piso que debe ser asignada a cada muro, como se muestra en la Figura 1 (a). Lo anterior permite proponer una configuración inicial de muros de diferentes longitudes a partir de una planta en función de un periodo objetivo de la superestructura para un proyecto en particular. Para la planta que se muestra en la Figura 1 (b), que corresponde a un ejemplo, estas curvas permiten estimar el periodo de la estructura en base fija de manera directa para la dirección de análisis, y sin necesidad de una modelación. Además, la estructura no requiere ser perfectamente simétrica para predecir los resultados.

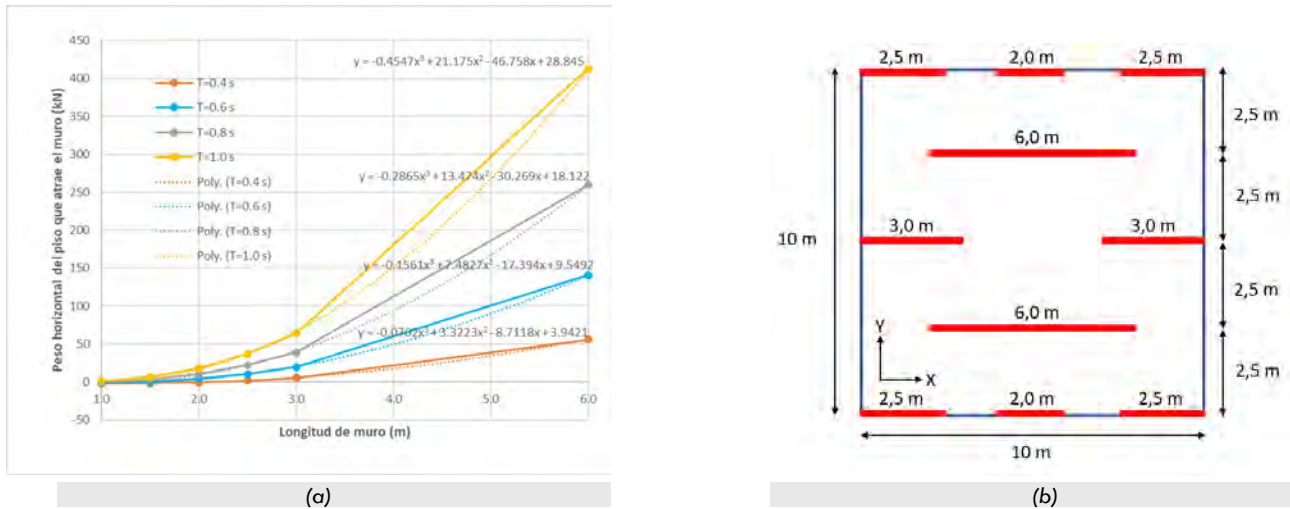


Figura 1. (a) Peso horizontal del piso que atrae cada muro de cualquier longitud entre 1 y 6 m, para alcanzar un periodo objetivo [5], (b) distribución en planta de muros propuestos en eje X [5]

Los resultados obtenidos a partir de la Figura 1 (a) aplican para paneles de CLT de 5 capas con 33 mm de espesor cada una, sin embargo, se puede utilizar también para paneles de CLT con distinto espesor al considerado, siempre que posea 5 capas y la relación entre espesor y ancho de las tablas sea de 1:4. De cumplirse esta condición, el peso horizontal del piso que atrae cada muro obtenido a partir de la Figura 1 (a) se debe multiplicar por la razón entre el espesor de cada tabla y los 33 mm considerados.

Luego para la estructura aislada y en función del periodo de la superestructura en base fija se parametrizó mediante análisis no lineal de respuesta en el tiempo la carga axial necesaria en los anclajes de los muros, consistentes en barras de postensado, para prevenir el volcamiento de los muros en función de su largo. Se consideraron dos casos límites, uno en que el muro en su base presente solo compresiones y otro en el cual estas compresiones se ven limitadas a una proporción de la longitud de los muros. En el caso 1 se calculó la fuerza axial requerida en los muros para que no exista levantamiento en su base. En el caso 2 se calculó la fuerza axial requerida en los muros permitiendo un levantamiento en estos. Se consideró un mínimo de longitud apoyada del 40 % de la longitud total de los muros con un máximo de 10 mm de levantamiento en sus extremos. En ambos casos la carga axial que se calcula incluye el peso sísmico vertical en cada muro y la suma de la fuerza de tracción requerida para las barras. En la Figura 2 se muestra una representación de las cargas y tensiones para ambos casos.

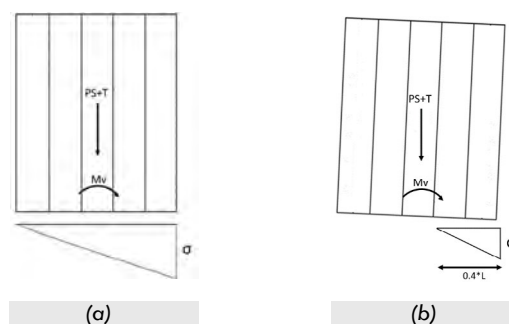


Figura 2. Representación de cargas y tensiones (a) caso 1, (b) caso 2 [5]

Con los resultados obtenidos para cada periodo de superestructura, se crearon líneas de tendencia de tipo lineal, que permiten obtener la fuerza axial requerida en las barras de postensado para cualquier longitud de muro entre 1 y 6 m en una planta con diferentes longitudes de muro, lo que se muestra en la Figura 3 (a) para el caso 1 y en la Figura 3 (b) para el caso 2.

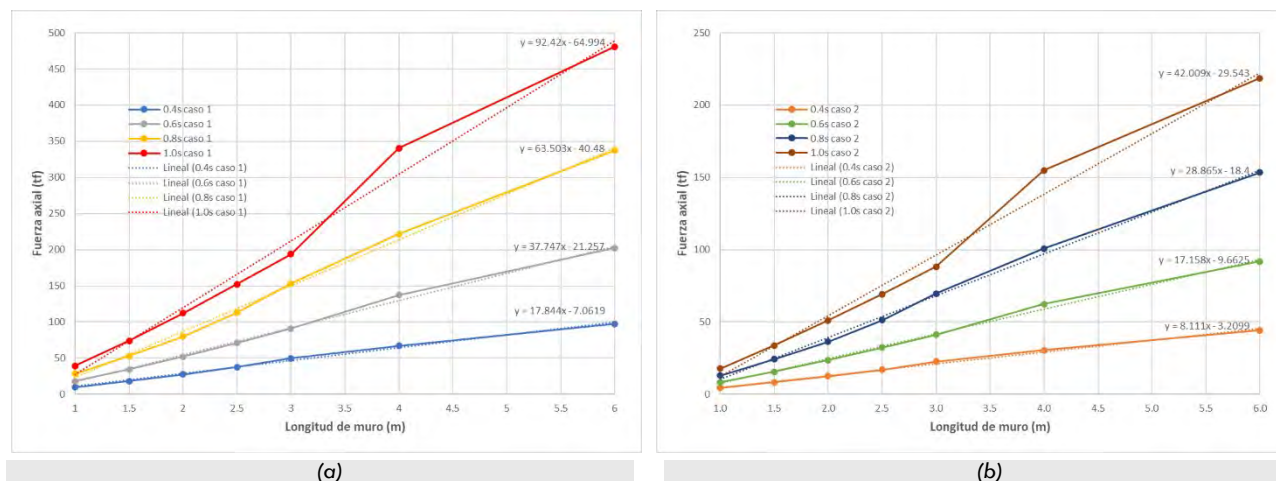


Figura 3. Fuerza axial requerida (a) caso 1, (b) caso 2 [5]

4. Conclusiones

Los resultados del estudio realizado permiten una estimación del postensado de muros de CLT, en una estructura aislada sísmicamente, con un nivel de confianza aceptable en estructuras sin asimetrías importantes. También se comprobó que al permitir un levantamiento controlado en los extremos de los muros se reduce considerablemente la tensión requerida en las barras de postensado, en comparación con el caso en que el muro no presenta levantamiento.

Referencias

- [1] American Wood Council (2018). National Design Specification for Wood Construction 2018 Edition. NDS 2018. Leesburg, Estados Unidos.
- [2] Bogensperger, T., Moosbrugger, T. y Silly, G. (2010). Verification of CLT-plates under loads in plane. World Conference on Timber Engineering. Austria.
- [3] FPInnovations (2013). CLT: Handbook Cross Laminated Timber, U.S. Edition. Estados Unidos.
- [4] Mahamid, M. (2020). Cross-Laminated Timber Design. Estados Unidos: Mc Graw Hill.
- [5] Mellado, J. (2021). Evaluación paramétrica de muros postensados de CLT en estructuras aisladas sísmicamente. Universidad de Concepción, Chile.

1089

EXPERIMENTAL CHARACTERIZATION OF HYBRID GLULAM BEAMS

Carlos Martins¹; Cláudio Ferreira²; Sandra Monteiro³; Alfredo Dias¹

¹ SerQ - Centro de Inovação e Competências da Floresta; Universidade de Coimbra

² SerQ; InWood

³ Universidade de Coimbra

Palabras clave / Palavras-chave:

Bending tests; Bonding performance; Non-destructive testing; Structural efficiency; EN 408.

Resumen / Resumo:

The use of timber for the construction sector brings several benefits, namely the carbon storage at the structures. Also, the increased demand for timber is expected to promote the application of appropriate forest management principles. However, the increased use of cross-laminated timber requires a huge volume of sawn timber for its production. This paper aims to highlight the potential of mixing species at the cross-section of glulam beams. Under-utilized species were combined with species of high mechanical properties or with higher availability to optimize the mechanical performance of such beams. Raw material characterization was performed through non-destructive tests, followed by glulam production and mechanical characterization, through bending tests, and lastly, bonding performance evaluation was assessed by delamination and glue line shear strength tests. Combining high-density hardwoods with low-density softwoods/hardwoods showed high mechanical properties (mean values above 15000 N/mm² for modulus of elasticity and 77.0 N/mm² for bending strength) with mean densities below 600 kg/m³. Also, the use of the longitudinal vibration method and the transformed section method showed higher correlations with mechanical properties (above 0.89 for static modulus of elasticity and above 0.78 for bending strength). Bonding performance between low- and mid-density lamellae was positively evaluated while for high densities some specimens failed the requirements defined for softwoods in EN 14080.

1. Introduction

The construction sector seeks sustainable materials to tackle climate change, and politicians also consider the need to use materials from sustainable and renewable sources, with timber being recognised as part of the solution [1]. Portugal still strongly depends on glulam or CLT importation, or even on raw material to produce these products, mainly Spruce (*Picea abies* H. Karst.) and/or Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). However, the Portuguese Forest has a diversity of species that can be considered for structural elements production, such as Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) and Southern blue gum (*Eucalyptus globulus* Labill.) with the most representative, 23% and 26% of the forest area

respectively. Maritime pine is the most common softwood, and its market is mainly dedicated to low-valued products (e.g. pallets, pellets) and other applications such as fibreboard panels. However, its performance has been demonstrated previously by grading [2], gluing, and mechanical tests in the form of glulam beams [3]. On the other hand, pulp and paper production are the main applications of Southern Blue gum. Research studies have been performed to determine their mechanical properties as sawn wood [4], as well as glulam applications [5]. Despite the knowledge and availability, some issues could be pointed out about the sawing, drying, and bonding processes [6]. Hence, the use of hybrid elements could be a turnover that allows: i) to optimize the raw material, specifically using species with low-mechanical properties at the inner layers [5,7] and ii) to decrease the number of glue lines between denser species.

The present research focuses on the mechanical characterization of 28 glulam beams based on combining softwoods and hardwoods available in the Iberian Peninsula. Longitudinal vibration method and transformed section method were adopted to predict the mechanical properties from glulam beams and before destructive tests according to EN 408 [8]. Bonding performance was also assessed through delamination and glue line shear strength tests following EN 14080 [9].

2. Materials and methods

2.1.Raw material

The production of glulam beams was preceded by the characterization of timber boards from a total of six species from the Iberian Peninsula, two of them softwoods (Maritime pine, *Pinus pinaster* Ait.; and Japanese red-cedar, *Cryptomeria japonica* D. Don) and four hardwoods (Southern blue gum, *Eucalyptus globulus* Labill.; Poplar, *Populus* spp.; Blackwood, *Acacia melanoxylon* R. Br.; and Beech, *Fagus sylvatica* L.). Physical characteristics such as thickness, width, and length were measured in three different locations (midspan and both boards' ends) and the average value was recorded to determine the density, based on the weight of each board. Moisture content was assessed through an electrical moisture meter (RTU GANN 600) at three locations (midspan and 60 cm apart from each board's end). Data was considered as input for the non-destructive characterization based on the longitudinal vibration method. A total of 140 boards were chosen from broader samples based on the dynamic modulus of elasticity.

2.2.Adhesives

Based on previous studies carried out by the authors and due to stock availability, two different types of adhesives were considered: one-component polyurethane, with primer, (1C-PUR) and a two-component phenol resorcinol formaldehyde (PRF) adhesive. Technical data sheets were followed ensuring the prescriptions of the amount of adhesive, clamping pressure, and assembly time. For the 1C-PUR adhesive, a quantity of 180 g/m² was adopted preceded by the application of a primer (20 g/m²) with an activation time of at least 10 min., whereas a quantity of 450 g/m² was used for PRF adhesive with a ratio of 100/20 of resin/hardener.

2.3. Glulam beams production

A total of 28 glued laminated timber beams with approximately 2400 mm length without finger-joints were produced at SerQ laboratory facilities. Each beam was composed of 5 lamellae of 24 mm thickness and 100 mm width. The gluing process was carried out at controlled conditions of temperature ($20 \pm 2^\circ\text{C}$) and relative humidity ($65 \pm 5\%$). As the aim of the present work was to explore through a preliminary work the potential of producing hybrid glulam beams, a total of six different combinations, leading to seven configurations, were considered: i) Maritime pine with Poplar (HMPBP-1 and HMPBP-2); ii) Maritime pine with Japanese red-cedar (HMPCJ); iii) Blackwood with Japanese red-cedar (HBWCJ); iv) Southern Blue gum with Japanese red-cedar (HBGCJ); v) Southern Blue gum with Poplar (HBGBP); and vi) Beech with Poplar (HSBBP). Based on the dynamic modulus of elasticity obtained from non-destructive characterization, the boards were selected and planned to the final thickness of 24 mm, being non-destructively assessed again as the cross section was changed and the length was adjusted to 2400 mm. The lamellae were sorted to have symmetrical glulam cross-sections with the boards with the highest values of dynamic modulus of elasticity placed at the external layers and those with minimum values at the inner layers. The adhesive was applied manually with a teeth spatula to ensure a uniform layer, with the applied amount controlled by weighing. The clamping pressure (0.8 N/mm^2) was ensured by a group of hydraulic jacks, with 5 tons of maximum capacity, spaced by 500 mm. A minimum period of 7 days was adopted for a complete curing process of the adhesives. After that, the glulam beams were laterally planned to 92 mm width and tested.

2.4. Experimental characterization

2.4.1. Non-destructive assessment

The prediction of the mechanical properties is of utmost importance. In the present research two methodologies were followed to predict the modulus of elasticity, namely: i) transformed section method (E_{TSM}) and ii) longitudinal vibration method (E_{MTG}). The former allows the sorting of the raw material into the cross-section even before the assembly process and requires information about the thickness, width, and dynamic modulus of elasticity. The longitudinal vibration method comprises the impact of a sphere at one end of the timber element. This impact induces a wave that travels through the element and, in the case of the device used (Machine Timber Grader, Brookhuis), is measured when returns to the same end. The natural frequency is determined, and the dynamic modulus of elasticity is computed (see [10]).

2.4.2. Static tests

The experimental campaign focused on the assessment of the mechanical properties under bending stresses, namely the modulus of elasticity ($E_{m,g}$) and bending strength (f_m). The test layout, loading procedures and measuring devices considered were in accordance with EN 408 [8]. Static modulus of elasticity was performed with a displacement constant rate of 0.36 mm/s up to 40% of the estimated failure load. Deflections were measured by displacement transducers with 20 mm and 50 mm maximum capacity while the applied load was measured by the load cell of the hydraulic actuator. The bending strength test was performed with a constant displacement rate of 0.17 mm/s up to failure. After each failure test, specimen's representative of the full cross-section and without defects were cut to determine the moisture content by oven-dry method and to assess the bonding performance through delamination tests.

3. Results and discussion

3.1. Mechanical characterization

Table 1 presents a summary of mean values obtained from non-destructive (E_{TSM} and E_{MTG}) and destructive tests ($E_{m,g}$ and f_m) performed on the seven different configurations of glulam beams. Moisture content (w) and density (ρ) are also presented. According to EN 384 [11] density and static modulus of elasticity must be adjusted to 12% reference moisture content ($\rho_{12\%}$ and $E_{m,g,12\%}$, respectively). For bending strength and according to EN 14080 [9], it should be considered an adjustment based on the depth of the beam and the thickness of the layers ($f_{m,adj}$).

The analysis of the results from Table 1 highlights the potential in combining two species in the same cross-section of a structural element, concerning its mechanical performance. For instance, the minimum individual value obtained for bending strength ($f_{m,adj}$) was 39.2 N/mm², which is 63% higher if compared to GL24c (24 N/mm²), one of the strength classes with most representativeness in the market, despite finger-joints were not considered in the lamellae.

Table 1. Mean values of non-destructive and destructive tests

	HMPBP-1	HMPBP-2	HMPCJ	HBWCJ	HBGCJ	HBGBP	HSBBP
Number of beams	4	3	3	2	4	7	5
E_{TSM} (N/mm ²)	12746	13390	13495	15198	17998	17314	13511
E_{MTG} (N/mm ²)	11245	12232	11449	12933	13162	13649	11757
$E_{m,g}$ (N/mm ²)	12684	13229	12943	15191	17651	16262	12129
f_m (N/mm ²)	62.4	65.6	59.4	91.3	78.8	87.7	69.1
w (%)	14.5	14.3	13.9	12.5	12.5	13.6	14.5
ρ (kg/m ³)	513	570	490	541	550	602	542
$\rho_{12\%}$ (kg/m ³)	506	564	485	539	549	598	535
$E_{m,g,12\%}$ (N/mm ²)	12998	13534	13187	15265	17770	16519	12430
$f_{m,adj}$ (N/mm ²)	59.0	62.0	56.1	86.2	77.3	82.9	65.2

Density at 12% moisture content presents a small range of mean values, varying between 485 kg/m³ and 598 kg/m³. However, both mechanical properties vary significantly, with the highest values being achieved when denser hardwoods are at the external layers, as was expected, for HBGBP or HBGCJ. The determination of the structural efficiency for hybrid glulam beams compared to a single species glulam beam shows a significant difference that can be considered to optimize the use of raw material. For example, the structural efficiency of both $E_{m,g,12\%}$ and $f_{m,adj}$ for HBGBP are 27.6 and 0.139, respectively, whereas for glulam beams made solely of Southern Blue gum the corresponding values are 24.4 and 0.116 [5]. Additional information, namely regarding bonding performance can be found in the full paper.

4. Conclusions

The present research presents the results of a preliminary and experimental campaign of mixing two species within the cross-section of glulam beams. Seven different configurations were addressed combining softwoods and hardwoods from Iberian Peninsula Forests. Both mechanical properties under bending and bonding performance were evaluated for 28 glulam beams. Hybrid glulam beams showed high mechanical properties for values of density between 500-600 kg/m³. Also, the use of non-destructive

methodologies showed high correlations (above 0.78) with mechanical properties. Further research should be carried out comprising bonding performance if denser hardwoods are considered.

Acknowledgement

This work was partially funded by FCT/MCTES through national funds (PIDDAC) under the R&D unit Institute for Sustainability and Innovation in Structural Engineering (ISISE), under reference UIDB/04029/2020, and under the Associate Laboratory Advanced Production and Intelligent Systems ARISE under the reference LA/P/0112/2020. It was also partially funded by FCT through the project TimberTech under reference 2022.06937.PTDC.

References

- [1] European Commission (2022) New Proposals to Make Sustainable Products the Norm and Boost Europe's Resource Independence; European Commission, Brussels, Belgium
- [2] Dias, A.M.P.G.; Machado, J.S.; Santos, P. (2014) Use of timber products of high performance in structural applications (in Portuguese). In proceedings of the 5^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas. November 26-28. Lisbon, Portugal.
- [3] Martins, C. (2019) Health Assessment of Structural Glued Laminated Timber Elements (in Portuguese). PhD Dissertation. Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal. 303 p.
- [4] Martins, C.; Moltini, G.; Dias, A.M.P.G.; Baño, V. (2023) Machine Grading of High-Density Hardwoods (Southern Blue gum) from Tensile Testing. *Forests*. 14(8):1623. doi.org/10.3390/f14081623
- [5] Martins, C.; Dias, A.M.P.G.; Cruz, H. (2020) Blue gum: assessment of its potential for glued laminated timber beams. *European Journal of Wood and Wood Products*. 78:905-913. doi.org/10.1007/s00107-020-01567-0
- [6] Franke, S.; Marto, J. (2014) Investigation of Eucalyptus globulus wood for the use as an engineered material. In proceedings of the WCTE 2014 – World Conference on Timber Engineering. August 10-14. Quebec City, Canada.
- [7] Castro, G.; Paganini, F. (2003) Mixed glued laminated timber of poplar and *Eucalyptus grandis* clones. *European Journal of Wood and Wood Products*. 61:291-298. doi.org/10.1007/s00107-003-0393-6
- [8] European standard (2012) EN 408:2010+A1:2012. Timber structures – Structural timber and glued laminated timber – Determination of some physical and mechanical properties. European Committee of Standardization (CEN), Brussels, Belgium.
- [9] European standard (2013) EN 14080:2013. Timber structures – Glued laminated timber and glued solid timber - Requirements. European Committee of Standardization (CEN), Brussels, Belgium.
- [10] Martins, C.; Dias, A.M.P.G.; Cruz, H. (2019) Using non-destructive testing to predict the mechanical properties of glued laminated poplar. *Proceedings of the ICE – Structures and Buildings*. 172(9):661-670. doi.org/10.1680/jstbu.18.00060
- [11] European standard (2022) EN 384:2016+A2. Structural timber. Determination of characteristic values of mechanical properties and density. European Committee of Standardization (CEN), Brussels, Belgium.

1090

ENGINEERING FIRE-SAFE BUILDINGS WITH MASS TIMBER

Cristian Maluk¹

¹ *Semper*

Palabras clave / Palavras-chave:

Mass timber, Fire engineering, Fire safety

Resumen / Resumo:

This experimental research explores the influence of thin intumescent paints used for reducing the charring rate of mass timber during fire. An experimental method is used where the heating conditions of timber samples during testing is carefully controlled and varied to reproduce a range of fire scenarios. A reduction of the measured charring rate of timber by use of thin intumescent coatings could: (1) enable the optimal utilisation of the timber as a construction material – negating or minimising the need of encapsulation techniques requiring use of additional resources and materials; (2) allow a degree of expression of timber in buildings providing environmental and aesthetic benefits while still achieving fire safety requirements; and (3) account for a wide range of applications such as ceilings and vertical wall panels by virtue of the proposed testing setup.

1. Introduction and background

Mass timber structures are becoming increasingly prominent in Australia and across the globe as an avenue to a more sustainable building industry. Advances in the manufacturing of mass timber have led to the mainstream use of Engineered Wood Products (EWPs), such as CLT and Glulam for varied applications as shown in Figure 1.

A key challenge associated with using EWPs in a building relates to the presence of exposed (or expressed) timber being detrimental towards influencing the fire scenario, such as challenging the safe evacuation of building occupants, intervention of the fire brigade, and/or local collapse of the structure resulting in severe damage or even catastrophic collapse of the building. For instance:

- During the incipient/growth stages of a fire, timber walls and/or ceiling might ignite and burn ahead from the fire front, resulting in a rapid fire growth;
- When a fire is fully developed (i.e. fuel load is fully involved and burning), its intensity and duration may be influenced by the presence of burning timber; and
- During decay (and cooling) stages of a fire, timber may continue to burn even after the fuel load (e.g. furniture) in the compartment is consumed.

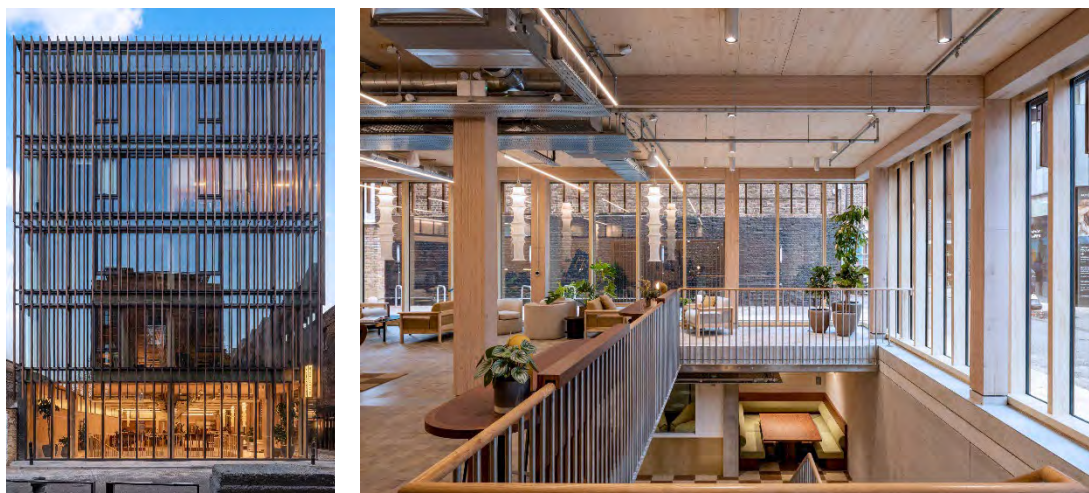


Figure 1. (left) Exterior and (right) interior views of exposed mass timber used in The Black and White Building, London, UK.

Photo © www.buildporto.com.

To date, the issue of having timber walls and/or ceilings burning during a fire and contributing to the fire load has been predominantly dealt with in the industry by partially or completely encapsulating mass timber structures using fire rated cladding materials such as gypsum drywalls. However, this does not allow expression of mass timber elements and requires additional resources and materials, embodying a much less sustainable building design.

Thin intumescent coatings, widely used in the steel industry due their proven fire performance and aesthetic considerations [1], are usually applied to achieve a coating thickness of a few millimetres to a certain Dry Film Thickness (DFT). They are thermally reactive materials and when heated, swell multiple times their original thickness forming a thick layer of a foam-type material with low thermal conductivity and density – creating a thermal barrier keeping the temperature of the protected material relatively cold. However, there has been little published research on the fire performance of thin intumescent coatings used on mass timber structures.

1.1. Rate of charring

There is an emerging need for the fire safety engineering community to recognise, assess, and mitigate the different levels of fire challenges associated with mass timber structures. During a fire in a mass timber building, the flaming combustion of timber results in an exothermic reaction, which releases heat and changes the constitutive properties (thermal and mechanical) of burned timber, turning it into what is widely known as char timber [2].

Char timber has significantly low load-bearing properties compared to normal (i.e. not burned) timber, considering its char layer has no contribution to the structural capacity of the member. Figure 2 shows a timber sample protected using thin intumescent coating after heating [3].

In addition, the increase of the rate of temperature in-depth and the rate of char can also result in the increase of temperature at the interface adhesive of EWP's lamellas, being detrimental to the load-bearing capacity (e.g. loss of the composite action between the lamellas) and overall performance of EWPs during a fire event. A typical characteristic design value that is used for the charring rate of timber is usually between 0.65 and 0.80 mm/min (Eurocode 5, Part 1-2) [4].

2. Research objective

This study aims to understand the fire performance of thin intumescent coatings that could be used to protect mass timber structures and provide practical insights into the fire behaviour of unprotected (i.e. uncoated) and protected (i.e. coated) timber. Specifically, using thin intumescent coatings to justify a reduced charring rate of timber.

A reduction of the charring rate could have a considerably positive impact in how fire-safe mass timber structures are designed with regard to their stability in a fire event. For instance, an increased load-bearing performance of the timber could be demonstrated during and after the fire event, negating or minimising the need of encapsulation that requires additional resources and materials, therefore resulting to a much more sustainable mass timber building design without compromising on fire safety.

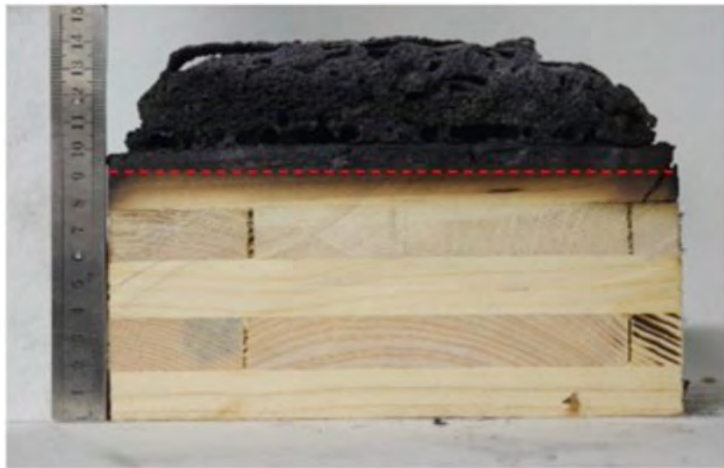


Figure 2. Timber sample protected using thin intumescent coating heating [3].

3. Methodology

The experiments will be performed for a range of heating scenarios using the Heat-Transfer Rate Inducing System (H-TRIS) at The University of Queensland [5]. Experiments will be conducted to investigate the charring rate for timber samples that are: (i) exposed and (ii) protected with thin intumescent coatings for varied DFTs.

H-TRIS uses moveable radiant panels, which can be configured at different testing orientations and capable of conditioning samples to controlled and transient incident radiant heat fluxes. This system will be coupled with a sample holder having an integrated spark ignition system [6].

The objective of this novel testing setup is to control the heating conditions at the target surface of an intumescent-coated sample in different testing orientations, while the spark igniter is kept in a position that allows for it to be effective as the transient swelling takes place.

4. Conclusions

This study is aimed to improve the current knowledge of and enable confidence towards using thin intumescent coatings for designing fire-safe mass timber structures by:

- Reducing the charring rate of timber for its optimal utilisation as a construction material;
- Enabling expression of mass timber in buildings for its environmental and aesthetic benefits while still achieving fire safety requirements; and
- Accounting for a wide range of EWPs applications, such as column, vertical wall panels, ceilings etc., by virtue of the proposed novel testing setup method.

References

- [1] Lucherini, A.: 'Fundamentals of thin intumescent coatings for the design of fire-safe structures', 2020.
- [2] Barber, D.: Fire Safety and Tall Timber Buildings—What's Next?. In Structures Congress, pages 556-569, 2017.
- [3] Lucherini, A., Razzaque, Q.S., & Maluk C. Exploring the fire behaviour of thin intumescent coatings used on timber. Fire Safety Journal, 109: 102887.
- [4] BSI, 'BS EN 1995-1-2:2004 Eurocode 5: Design of timber structures. General. Structural fire design', BSI London, 2004.
- [5] Maluk, C., Bisby, L., Krajcovic, M., & Torero, J. L. A heat-transfer rate inducing system (H-TRIS) test method. Fire Safety Journal, 105:307-319, 2019.
- [6] Janssens, M. Piloted ignition of wood: a review. Fire and Materials, 15(4):151-167, 1991.

1091

EXPERIMENTAL INSIGHTS INTO THE DISMANTLABILITY OF LIGHTFRAME TIMBER PREFABRICATED WALLS

Valentina Torres Poblete¹; Guillermo Íñiguez-González¹; Pierre Blanchet²; Baptiste Giorgio²

¹ Universidad Politécnica de Madrid

² Université Laval

Palabras clave / Palavras-chave:

Circular economy, Design for disassembly, Industrialization, Reuse, Wood construction

Resumen / Resumo:

This study provides insights into the dismantlability of light timber frame prefabricated walls, highlighting the importance of Design for Disassembly in construction. It explores how Circular Economy principles can be applied in timber construction to minimize resource use and reduce waste and emissions. Timber, as a renewable resource, offers significant potential for reuse and recycling, contributing to sustainability. Conducted at the Renewable Materials Research Centre, Laval University, Quebec City, Canada, the study analyzed the dismantling process of one full-scale model of light-frame timber exterior wall corner and assessed the condition of materials for potential reuse and recycling. The findings reveal that the greatest challenges in dismantling and material deterioration were mainly due to the use of pneumatic nailers for connections. While some materials like vinyl siding showed reusability, others such as gypsum board and vapor barriers were significantly damaged, hindering reuse. This study underscores the need to consider material dismantlability and reusability from the early design stages, aligning with sustainable construction practices.

1. Introduction

Construction and demolition waste constitutes the largest waste fraction, representing between 30% and 40% of total solid waste [1]. This can be explained by the fact that the building industry bases in a linear economic model, based on the idea of “take, make, dispose” [2]. Likewise, if a change in the model is not generated, global material consumption in cities could increase from 40 billion tons in 2010 to 90 billion tons in 2050, following current trends [3].

To turn this situation around, the Ellen MacArthur Foundation describes a new model: The Circular Economy as “an industrial economy that is restorative or regenerative by intention and design”. This objective is achieved through sustainable design, consistent upkeep, repair, reuse, remanufacturing, refurbishment, and recycling [4]. This approach could reduce global CO₂ emissions from materials by up to 38% or 2.0 billion tons by 2050, primarily due to reduced demand for steel, aluminum, cement, and plastic [5]. Within this approach, wood emerges as a highly valuable renewable resource, particularly when sustainably harvested. By aligning with circularity principles, timber not only meets ecological criteria but also offers high potential for reuse and recycling at the end of a building’s lifespan [6].

In recent decades aligned with the Circular Economy, architectural and construction design approaches, principles, and methodologies have been developed to facilitate the recovery of materials at the building's end of life. Among them, Design for Disassembly (DfD) stands out as a design strategy that aims to replace the demolition phase of the life cycle with a disassembly phase. This approach allows the building's components to be reused and recycled, thereby reducing the generation of solid waste [7]. Designing constructive solutions for reuse their components ensures that they can be reintroduced at their maximum value, reducing the need for new primary materials.

Furthermore, industrialized timber construction systems, especially panelized or 2D solutions, exhibit an inherent adaptability that allows for their reconfiguration without resorting to demolition. The standardization of their components, which are easily assembled, presupposes efficient disassembly, contingent upon the nature of the connections between elements [5]. However, it is crucial to consider the longevity of the various layers that make up the construction elements [6], as well as their interconnection. This consideration ensures the future viability of refurbishing the complete panel for reuse, whether in its original location or in a new building.

Using full-scale model of light-frame timber exterior wall corner (Table 1), this study analyses the inherent challenges in their disassembly. It also examines the condition of each material to determine the potential for reusing the panel as an integral unit; this as a preliminary exploration of possibilities and challenges, from the construction perspective, focusing on the reuse of the element as a cohesive whole, rather than on individual components.

2. Experimental study

To materialize this study, an experimental procedure was implemented in the laboratories of Renewable Materials Research Centre (CRMR), Laval University, Quebec City, Canada, whose configuration was established following the guidelines of the Novoclimat program, which aims to reduce heating costs by 20% and improve comfort, setting energy performance and certification standards for energy-efficient home building. Likewise, a level 1 of prefabrication was adopted, characterized by including only individual construction elements, such as beams, pillars, or just the base structure of the panel [8]. In line with this approach but applied to the model, the prefabrication was limited to the structure of each individual 2 in. x 6 in. sawn wood wall, with OSB boards serving as bracing plates. This process forms phase 1 of the assembly stage. Phase 2 involves the installation of the remaining construction components on-site (Table 2), which commences once both walls are erected (Fig. 1).

Table 1. Dimensions

Wall Nomenclature	Dimensions in inches		Dimensions in meters (aprox.)	
	length	high	length	high
AM1	91	90	2.3	2.3
AM2	144	90	3.7	2.3

After completing phase 2, the disassembly process began, executing the steps followed during the model construction in reverse order to assess the ease of disassembly and the final condition of each recovered material and its subsequent categorization (Table 3). All applied dismantling techniques were aimed at maximizing material recovery, rather than causing damage.

Table 2. Full-scale model materials

Wall Layer	Component	Connection Method	Dimension Component
Structure	Sawn timber	Metabo Hpt Framing Nails	8 ft. x 2 in. X 6 in.
	OSB panel		8 ft. x 4ft. x 7/16 in.
Insulation	Fiberglass Insulation	Without fixation	6 in. x 15 in. x 47 in.
	Extruded polystyrene	plastic cap nails	8 ft. x 4 ft. x 1 1/2 in.
Membranes	Polyethylene, vapor barrier	Staples	10 ft. x 100 ft.
	Moisture barrier	Staples	10 ft. x 100 ft.
Claddings	Plasterboard	Screws	8 ft. 4ft. X 3/8 in.
	Vinyl siding	Nails	12 ft. X 10 in.



Figure 1. Left, phase 1, prefabrication walls. Right, phase 2, vapor barrier installation

3. Results and conclusions

The most challenging actions involved detaching both panels from the platform and removing the OSB board from the structure, followed by dismantling the interior battens. The difficulty in these actions is mainly due to the size of the nails used, Metabo Hpt Framing Nails at 3 1/4 in. long. Although their use with a pneumatic nailer speeds up manufacturing and assembly, they complicate the disassembly process and deteriorate the condition of the recovered materials.

Although vinyl siding shows high reusability (Table 3), drywall, on the other hand, is prone to significant damage at its fragile edges, preventing its reuse, though it remains potentially recyclable. Furthermore, during the removal of the battens supporting this cladding, the vapor barrier is significantly damaged, rendering it non-reusable. Additionally, the recyclability of this material is limited, as there is no suitable industrial process for it.

Table 3. Analysis methodology, example for activity: “On-site Dismantling” and sub-activity: “Dismantling of the Exterior Siding.”

Rating Purpose	Assessment scale						%	Notes
		1	2	3	4	5		
Degree of Difficulty	Simple	X				Difficult	20	Perception: Easy, though deeply driven nails increase difficulty. After modifying the dismantling method from a hammer and counter-plate to two hammers, it became easier, especially since the nails have large heads. Less depth in embedding would simplify the process further.
Siding Condition	Irrecoverable				X	Recoverable	100	Since the dismantling is done by a single person at the time of the siding removal, the siding is bent along its length.
	Non-reusable				X	Reusable	100	Minor damage to parts may occur during nail removal and handling.
	Non-recyclable					Recyclable	0	-
Fasteners State	Irrecoverable				X	Recoverable	100	Most nails with wide heads can be recovered in excellent condition and reused once removed.
	Non-reusable				X	Reusable	94	Due to the nail's morphology, most fastenings are reusable, although results may vary over time.
	Non-recyclable	X				Recyclable	6	444 gr.: Nail for reuse. 415 gr.: Nail for recycling. 29 gr.

The critical points converge in the correlation between the time taken for disassembly, the difficulty of the action, and the subsequent condition of the material. While the model faithfully represents the common practices of the industry in Quebec, Canada, the inherent difficulties in its disassembly are mainly due to not considering Design for Disassembly as one of its conceptualization criteria at an early design stage.

References

- [1] Wimmers, L.; Schauerte, T.; Tannert, T.; Wimmers, G. (2021). Prefabricated Construction in British Columbia, Canada: Status and Challenge. In World Conference on Timber Engineering, August 9-12. Santiago, Chile. Pp 1-9.
- [2] Crowther, P. (2005). Design for Disassembly – Themes and Principles. Environment Design Guide. Pp. 1-7. Royal Australian Institute of Architects.
- [3] Macarthur, E., & Heading, H. (2019). How the circular economy tackles climate change. Ellen MacArthur Found.
- [4] Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy—A new sustainability paradigm?. Journal of cleaner production, 143, Pp.757-768.
- [5] Finch, G., Marriage, G., Pelosi, A., & Gjerde, M. (2021). Building envelope systems for the circular economy; Evaluation parameters, current performance and key challenges. Sustainable Cities and Society, 64, 102561.
- [6] Smith, R. E., & Quale, J. D. (2017). Offsite architecture. En Routledge eBooks. <https://doi.org/10.4324/9781315743332>
- [7] Dams, B., Maskell, D., Shea, A., Allen, S., Driesser, M., Kretschmann, T., Walker, P., & Emmitt, S. (2021). A Circular Construction Evaluation Framework to promote designing for disassembly and adaptability. Journal of Cleaner Production, 316, 128122. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128122>
- [8] Hong, J., Shen, G. Q., Li, Z., Zhang, B., and Zhang, W (2018) Barriers to promoting prefabricated construction in China: A cost–benefit analysis. Journal of Cleaner Production, 172, 649–660.

1092

FINANSPARKEN BJERGSTED: AN INNOVATIVE TIMBER-FRAMED OFFICE BUILDING

Mario Rando¹

¹ Degree of Freedom

Palabras clave / Palavras-chave:

Beech, Connections, Glulam, LVL

Resumen / Resumo:

Finansparken Bjergsted is an office building in Stavanger, Norway, built as the headquarters for SpareBank 1. The structural system above ground level uses timber as the principal load bearing elements, a natural, renewable, and readily available local material. Floors are cross-laminated timber panels supported by glued laminated timber beams and columns. For strength and complex geometrical requirements, laminated veneer lumber (LVL) made of beech is also used. The three basement levels and the four communications and services cores are of reinforced concrete. Mass timber structural elements are engineered for strength and are prefabricated with strict tolerances for a rapid construction process. This project uses mainly direct contact timber connections. The beams are shaped and fabricated with openings to suit both the architectural aesthetics and services requirements. All disciplines worked with a fully integrated BIM system.

1. Introduction

This project uses a traditional building material, timber, combined with modern design, detailing and fabrication techniques to create an award-winning office building (see Figure 1). Degree of Freedom has been involved, as part of the design team, from concept design through to construction. The paper highlights why timber has the advantage as a structural element compared to more typical solutions in concrete or steel. Key aspects of the design are discussed, including:

- Choice and use of the different types of mass timber elements.
- Fire design.
- Use of 3D finite element modelling for timber design.
- Timber connection design.
- Fully integrated BIM for construction.



Figure 1. Photo of the finished building (© Sindre Ellingsen)

2. Architectural concept

The wedge shape in both plan and elevation, creates a building that changes character and scale to the different surrounding urban landscapes. It is located in a contrasting situation between Bjergstedparken's more monumental buildings to the north, and a cluster of small, old houses in a more urban situation to the south.

The architecture is based on the game of contrasts between a clear and taut exterior and a more organic interior. The architectural vision at concept design phase is shown in Figure 2. The use of timber as a natural material has a positive effect on human perceptions and experience of their surroundings and has been shown to reduce stress. It is acoustically beneficial for an open plan office space compared to more conventional construction materials.



Figure 2. Exterior view of the building (©Helen&Hard | Saaha)

From the beginning, the design team were aware of the concept that timber, as a construction material, has intrinsic healthy and environmental benefits. When harvested responsibly, wood is arguably one of the best tools architects and engineers have for reducing greenhouse gas emissions and storing carbon in buildings. Carbon cycle of timber follows a closed natural loop. The following were important aspects for the construction material choice:

- Achieve a healthy and clean working environment.
- Reduction of CO2 emissions.
- Reduction of construction time and reduction of waste.
- Use timber as a symbol for the Bank's values.
- Obtain BREEAM-NOR excellent certificate.
- Aesthetic properties of the material.
- Competitive cost.

To come to a final decision, a selected portion of the building was economically analysed for two possible alternatives: timber/concrete and steel/concrete structure. When comparing this package of costs to the whole project cost, including general costs, the difference between steel and timber was reduced to 1.4%.

3. Structural system

The three basement levels are of reinforced concrete, and from ground level four services and communication cores extend up to roof level also in reinforced concrete. These elements provide the overall lateral stability to the structure. Horizontal loads are transferred to these cores via the diaphragm action of 200mm CLT timber floor slabs. The footprint of the timber floor slabs reduces from levels 2 to 7 to follow the wedge-shaped elevation. The roof construction is also a continuous 200mm CLT inclined slab. The vertical load bearing system comprises of the CLT slabs spanning between the main floor beams located on a 5.4m structural grid. The CLT is supported by glulam beams (GL30c).



Figure 4. LVL timber transfer structure

At each grid two glulam beams are continuous across the width of the building bearing directly on to the notched glulam columns (GL30c). Columns are continuous from level 3 to roof level. The floor beams are divided into two, at both sides of the columns, to provide continuity and to facilitate erection. Each beam is made up of two 380mm wide beams glued together – an inner beam of constant depth formed by a glulam section and an LVL beech section and an outer glulam beam of variable depth to suit the architectural requirements. The build-up of the beams during the fabrication process is shown in Figure 3. Continuity of the CLT slabs over the main beams is provided by an LVL spruce panel (Kerto Q).

At level 3 a transfer structure is required to redistribute the column loads to the ground floor columns that are set back from the façade to reduce the building footprint at street level. The ground level at the east side has a double height with a reduced number of columns to create a distinctive space at the entrance of the building. The columns and beams at this level are LVL beech (Baubuche S and Baubuche Q) to form the transfer structure as shown in Figure 4.



Figure 3. Floor beams during fabrication

4. Conclusions

The design of Finansparken Bjergsted is innovative in its use of a traditional building material, timber, as the load bearing structure in a modern office building. It takes advantage of advanced prefabricated timber elements that are engineered for strength and can be prefabricated with strict tolerances for a rapid construction process to realize a singular architectural vision as can be seen in the finished central atrium in Figure. Connections are also designed, where possible, to transfer forces directly between timber members with minimal steel parts. Self-tapping timber screws and steel threaded rods are used as local reinforcement in accordance with the latest technology.

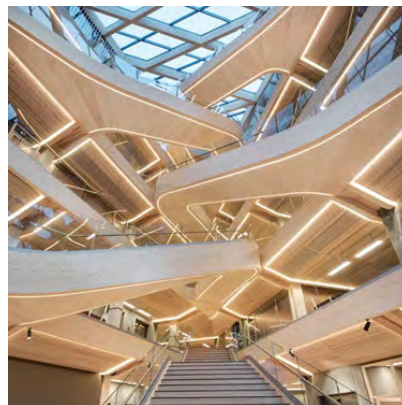


Figure 5. Photo of the central atrium (© Sindre Ellingsen)

ACKNOWLEDGEMENT

The realisation of this project is thanks to a dedicated design team including the architects, Helen & Hard (www.helenhard.no) and Saaha (www.saaha.no). Specialist advice on timber design has been provided by Creation Holz and on timber fabrication by Moelven, Norway. Throughout all stages the final client and building user, Sparebank 1, has provided constant support as well as the Contractor during construction process, Veidekke AS.

1093

FÍSICA DE LA CONSTRUCCIÓN EN LAS ENVOLVENTES DE MADERA

Iñaki Del Prim Gracia¹

¹ Universidad del País Vasco; UPV-EHU Master Madera

Palabras clave / Palavras-chave:

Construcción, Detalles, Eficiencia energética, ODS, Sostenibilidad

Resumen / Resumo:

La definición de las diferentes propiedades físicas que regulan la construcción de envolventes en base madera adquieren una relevancia fundamental a la hora de alcanzar los criterios prestacionales de las construcciones de hoy en día. Mediante un recorrido por los principios fundamentales de la física de la construcción, y su resolución con los sistemas constructivos y estructurales en base madera más habituales, se explicarán las diferentes estrategias constructivas en función de los diferentes sistemas estructurales utilizados.

1. Introducción

Se pretende la descripción de las propiedades de la Física de la Construcción que regulan el comportamiento de las envolventes de los edificios, dando respuesta de manera adecuada a los requerimientos prestacionales que se les solicita, así como el análisis y comparación de diferentes estrategias de resolución de dichos requerimientos en función de diferentes sistemas constructivos y estructurales en base madera.

2. ¿Qué le pedimos a nuestras envolventes en madera?

La envolvente del edificio regula la relación con el medio ambiente del ser humano, cual segunda piel realizada en madera. Si bien los requisitos y prestaciones que le vamos a pedir a nuestra envolvente son similares en todos los edificios, cuando trabajamos con sistemas constructivos y estructurales en base madera adquiere especial importancia el conocimiento y control de las propiedades físicas que regulan el comportamiento de dichos sistemas.

2.1.Eficiencia energética

Tanto la normativa de aplicación (CTEDB-HE 2019) como los estándares energéticos más exigentes y habituales (Passivhaus), basan sus estrategias en la reducción del consumo mediante la limitación de la demanda energética del edificio. Para ello la resolución de una envolvente de altas prestaciones es fundamental, y la madera será un gran aliado que resolverá de manera ejemplar los dos requisitos principales.

EL AISLAMIENTO: Uno de los principios básicos es conseguir que los edificios funcionen de una forma pasiva conservando el calor o el frío en su interior gracias al aislamiento térmico. Se debe por tanto garantizar una envolvente continua súper aislada en todo el edificio, tanto en fachadas y cubiertas como en suelos. Este aislamiento de altas prestaciones protege del calor y del frío, reduce la demanda de energía y el riesgo de aparición de patologías. Las propiedades físicas a tener en cuenta serán las siguientes:

CONDUCTIVIDAD TÉRMICA: λ (Lambda) W/mK. Refleja la capacidad de conducción del calor del material.

RESISTENCIA TÉRMICA: $R = e / \lambda$ m²K / W. La resistencia a la conducción del calor aumenta con conductividades térmicas bajas.

RESISTENCIA TÉRMICA SUPERFICIAL: R_{si} R_{se} m²K / W. Valor que refleja la resistencia de la transmisión entre la superficie del material y el aire.

TRANSMITANCIA TÉRMICA: $U = 1/R$ W/m²K. $R_{muro} = R_{si} + R_t + R_{se}$

En función de las diferentes densidades de los materiales utilizados en la envolvente los valores se deberán adaptar a las prestaciones requeridas.

PUENTES TÉRMICOS: se aspira a tener una envolvente libre de puentes térmicos. Entendemos por puente térmico las zonas de los elementos constructivos donde se produce una variación de la uniformidad del aislamiento, ya sea por un cambio de material, espesor, etc., lo que conllevaba una reducción de la resistencia térmica del cerramiento.

Los puentes térmicos pueden tener efectos negativos: aumento del flujo térmico entre el interior y el exterior, así como el aumento de la humedad relativa (en invierno) en la superficie de la pared, debido a la reducción de la temperatura de esta superficie. La madera, por su propia condición material y su fácil combinatoriedad con otros materiales, ayudará a resolver los diferentes puentes térmicos de manera satisfactoria.

2.2. Protección

Las envolventes de nuestros edificios tendrán que protegernos fundamentalmente ante los cambios de temperatura (tratados en el apartado anterior), el viento, el agua de lluvia, el vapor de agua, así como el ruido (el cual no es objeto del presente artículo).

La **DIFUSIÓN DEL VAPOR DE AGUA** es un proceso lento y natural mediante el cual el vapor de agua se mueve desde los puntos donde la presión de vapor es mayor hacia los puntos donde la presión es menor, intentando igualar contenidos y presiones. La cantidad máxima de vapor que puede contener un ambiente varía según la temperatura, mayor en temperaturas altas y menor en temperaturas bajas.

TEMPERATURA DE CONDENSACIÓN / PUNTO DE ROCÍO: Temperatura a la que la humedad atmosférica alcanza, al enfriarse en condiciones de presión constante, su grado de saturación 100%. Cuando la temperatura ambiente desciende por debajo de ese punto, se condensa agua.

La migración del vapor de agua a través de elementos de construcción debida a la diferencia de presión está regulada por dos propiedades físicas:

COEFICIENTE DE RESISTENCIA A LA DIFUSIÓN DE VAPOR: μ (mu) Refleja la resistencia del material a la difusión del vapor de agua.

ESPESOR DE AIRE EQUIVALENTE A LA DIFUSION DE VAPOR DE AGUA: S_d (m) La capacidad de difusión también depende del grosor del material. $S_d = \mu \times e$.

Para evitar las condensaciones intersticiales, los cerramientos en base madera deben diseñarse para “respirar”, facilitando la difusión de vapor hacia el exterior. Como regla general, conviene proyectar **cerramientos poco permeables al vapor de agua en las capas interiores y más permeables al exterior**. Es posible diseñar una envolvente transpirable a la vez que hermética mediante una buena selección de materiales y soluciones constructivas.

La resistencia al paso del vapor de agua no está directamente relacionada con la resistencia al paso del aire, la cual habitualmente se denomina **HERMETICIDAD** al paso del aire. En un edificio de altas prestaciones debemos evitar el paso incontrolado de aire a través de la envolvente, ejecutando una correcta capa hermética. La envolvente térmica del edificio debe estar rodeada por una línea hermética, que en general, la capa hermética se coloca en la cara interior del aislamiento. La hermeticidad se regula por el parámetro n_{50} $[1/h] = V_{50}[m^3/h]/V[m^3]$.

Todos estos parámetros pueden quedar regulado por la aplicación de Regla de las 3 Capas, mediante la cual la capa de aislamiento queda protegida del exterior por una capa estanca al viento y al agua, pero abierta a la difusión hacia el exterior, y protegida al interior por una capa estanca al aire, hermética, y cerrada a la difusión de vapor hacia el exterior.

2.3.Confort y salud

Entendemos que construimos mejor para vivir mejor. Vivir mejor con más confort y salud, consumiendo menos energía. La madera, si le damos la oportunidad, además de permitirnos y facilitarnos la ejecución de edificios de extrema eficiencia energética industrializados, es un material que nos permite crear espacios y atmósferas con una calidad ambiental que garantice y lleve más allá el confort y la salud de los usuarios de los edificios.

Para regular el control de dicho confort y salud, deberemos tener en cuenta las siguientes propiedades físicas.

TEMPERATURA OPERATIVA: es un índice de confort térmico, y su valor es aproximadamente igual a la media entre la temperatura del aire interior, y la temperatura radiante media de las superficies de la envolvente. Junto a la **HUMEDAD RELATIVA** interior, regula las condiciones de confort recogidas por Fanger en la norma ISO 7730 y posteriormente en el RITE.

Sobre la temperatura radiante de las superficies, además de la capacidad aislante de dicho cerramiento, actúan las siguientes propiedades:

FLUJO DE CALOR: q W/m². $q = U (\theta_i - \theta_e)$. Refleja la pérdida de calor de un material.

CALOR ESPECÍFICO: c_p J/ kgK. Calor absorbido por kg de material.

CAPACIDAD DE ACUMULACIÓN DE CALOR: J/m^3K . Cantidad de calor acumulado por m^3 de material. Está relacionado con la densidad del material. $S = c_p \times \rho(kg/m^3)$.

EFUSIVIDAD TÉRMICA: b $J/m^2K*s^{0,5}$. Refleja numéricamente la sensación de frío o calor que producen los materiales al tocarlos con una misma temperatura superficial.

DIFUSIVIDAD TÉRMICA: a cm^2/s . Rapidez con la que la temperatura puede penetrar en el material.

Para controlar la Humedad Relativa tendremos en cuenta la **HIGROSCOPICIDAD**, definida como la capacidad del material para absorber humedad del aire que lo rodea y devolverla de nuevo regulando la humedad atmosférica, hasta alcanzar el equilibrio. Evita condensaciones y por tanto reduce el peligro de formación de moho, deterioro de los aislamientos y empeoramiento de su conductividad térmica.

Otro aspecto fundamental en el Confort es la **INERCIA TÉRMICA** entendida como la capacidad de absorber calor y cederlo posteriormente al ambiente. En invierno nos permite acumular calor y en verano desfasar la onda térmica y absorber calor para disiparlo durante la noche. Es una batería que regula la temperatura.

Para el óptimo funcionamiento térmico de un edificio, es necesaria la correcta complementariedad de ambas estrategias con el régimen de uso. Los materiales aislantes no son por lo general materiales con inercia térmica y viceversa. En medio, hay algunos materiales que conjugan ambas propiedades, aunque no sean los más eficientes en cada una de ellas, son los llamados correctores térmicos, ya sean materiales únicos (como la madera) o conglomerados (morteros aligerados como un mortero con virutas de corcho...).

La difusividad y la efusividad influyen en los ritmos de transmisión de energía y en la capacidad de acumular calor, en el desfase y en la amortiguación de la onda térmica. La posición del aislamiento en el cerramiento también es importante. Para que un elemento aporte su masa a la estabilidad térmica, es necesario que esté situado dentro del local para que su masa esté en contacto directo con el ambiente interior.

Por tanto, la inercia térmica del cerramiento produce por una parte una estabilidad térmica de las temperaturas interiores y, por otra, proporciona un desfase y una amortiguación de la transmisión de calor.

3. ¿Cómo lo conseguimos?

En función del sistema constructivo y estructural a utilizar, las estrategias para cumplir con los requisitos y prestaciones técnicas más arriba descritas variarán explorando la adaptabilidad y variabilidad de las diferentes soluciones. Cuando trabajemos con madera, definiremos todas estas estrategias de manera diferente en función del sistema estructural con el que estemos trabajando.

3.1.Sistemas de tronco macizo

El origen de este sistema está en las antiguas construcciones que se generaban por el apilamiento de troncos, más conocidas como BlockBau en Centroeuropa. Dichos sistemas están abocados a ser cerramientos multicapa con el objetivo de poder incorporar láminas y materiales intermedios capaces de regular y controlar las diferentes propiedades físicas. No obstante, serán sistemas capaces de mantener la presencia y masividad de la madera tanto a interior como a exterior, consiguiendo unas mejores prestaciones en cuanto a la satisfacción del confort interior.

3.2.Sistemas de entramado ligero

Entendemos sistemas de entramado ligero a aquellos que generan estructuras superficiales en muros, forjados y cubiertas que al unirse y arriostrarse funcionan como una estructura espacial. El entramado ligero hace una distinción de elementos y funciones más diferenciados, lo cual nos ayuda a aplicar la estrategia de física de la construcción conveniente según nuestros intereses mediante cerramientos multicapa de dos tipologías: diafragmas con tablero estructural interior y diafragmas con tablero estructural exterior, y su combinación como entramados cerrados.

La construcción de un cerramiento debe funcionar como un embudo, por lo que las distintas capas que lo conforman deben de situarse de menos abiertas a la difusión (al interior) a más abierta a la difusión (al lado exterior). Se debe evitar al máximo la penetración de vapor de agua al aislante, con el fin de evitar un aumento significativo de la conductividad térmica durante el curso de la vida del producto. Es por ello muy importante hacer un cálculo higrométrico del cerramiento, de forma que se evite la generación de patologías en el cerramiento.

3.3.Sistemas de paneles de madera contralaminada clt.

La utilización de sistemas murarios realizados con paneles de madera contralaminada facilita a priori la implementación de las estrategias de física de la construcción. Frente a la discretización de elementos constructivos que se produce en los sistemas de entramado ligero, donde cada elemento tiene su función, el panel de madera contralaminada aún habitualmente funciones estructurales, de hermeticidad y de regulador de la difusión del vapor, así como de inercia y mejora de la temperatura radiante mediante su difusividad y efusividad, al colocarse habitualmente al interior de la envolvente, trasdosado al exterior con aislamiento.

3.4.Sistemas de paneles a base de perfiles de madera laminada machiemburada.

Una alternativa a los tableros de CLT son los perfiles de madera laminada machiemburada denominados HBE o LV según el mercado del que provengan. Estos perfiles son vigas de madera laminada machiemburada, que se pueden montar individualmente o ser ensamblados formando paneles o muros de mayor tamaño. El concepto estructural por tanto es muy similar al de los paneles de CLT, a excepción hecha de que el CLT puede entenderse como elemento relativamente bidireccional dentro de ciertas relaciones ancho-largo, y los perfiles HBE son siempre unidireccionales.

En cuanto a la física de la construcción, presenta algunas diferencias notables respecto al CLT.

4. Conclusiones

Es evidente que la correcta resolución de la física de la construcción de la envolvente es clave a la hora de enfrentarse a una obra de edificación de altas prestaciones. En el caso de las construcciones con sistemas constructivos y estructurales en base madera, todavía adquieren más importancia debido a los riesgos de patologías estructuralmente severas que pueden sufrir dichos edificios. Una correcta elección del sistema constructivo y estructural en función del uso, unido a unas adecuadas estrategias de física de la construcción, adquieren especial trascendencia para alcanzar los objetivos con éxito. El conocimiento de las reglas específicas, de la física de la construcción concreta inherente a cada uno de los sistemas estructurales en madera por parte del técnico facultativo, resultan de vital importancia de manera que se garantice que el edificio va a funcionar en la mayor parte de su vida útil dentro de los criterios prestacionales, de confort y salud que le vamos a exigir.

1094

FUNCIONAMIENTO Y ESTRUCTURA DE LA PRENSA DEL LAGAR TRADICIONAL DE BALTANÁS (PALENCIA)

Jose Ramón Aira Zunzunegui¹; David Sanz Arauz¹; Beatriz Del Río Calleja¹; Ángel Fombellida Villafuella¹; Juan Manuel Rubiales Jiménez¹; Luis Javier Sánchez Aparicio¹; Federico Luis Del Blanco García¹; Mercedes González Redondo¹; Javier Pinilla Melo¹; Soledad García Morales¹

¹ Universidad Politécnica de Madrid;

Palabras clave / Palavras-chave:

Estructura, Fabricación, Madera, Patrimonio, Vino

Resumen / Resumo:

Las bodegas de Baltanás (Palencia), declaradas Bien de Interés Cultural, constituyen un ejemplo de patrimonio arquitectónico desarrollado alrededor del mundo del vino. El barrio cuenta con trescientas setenta y cuatro bodegas en cuyo interior es común encontrar lagares con una prensa con estructura de madera. Un lagar es una infraestructura donde se alojaban todos los elementos necesarios para exprimir la uva y obtener el mosto que posteriormente se convertiría en vino. En la actualidad, son pocos los lagares que se encuentran en activo pero dada la importancia que tuvieron, la escasez de estudios existentes y, especialmente, la relación que tienen los materiales de la prensa con el entorno, se planteó esta investigación con el objeto de ampliar el conocimiento sobre las maderas empleadas y su comportamiento mecánico. Para ello, se tomaron muestras de los elementos con mayor responsabilidad estructural, se llevaron a cabo mediciones en el propio emplazamiento y en el laboratorio, se identificaron las especies por medio de microscopía óptica y se realizaron ensayos no destructivos, hídricos y destructivos para conocer sus propiedades físico-mecánicas. De los resultados experimentales destaca la madera de jerbo por tener mayor densidad, rigidez, resistencia a la penetración, dureza superficial, resistencia a flexión y resistencia a compresión paralela que el olmo y el enebro. Finalmente, se asignó una clase resistente a cada madera (D45 para el olmo, D60 para el jerbo y C45 para el enebro) y se calculó la estructura destacando que los niveles de agotamiento eran adecuados para las cargas que recibían.

1. Introducción

Las bodegas de Baltanás (Palencia), declaradas Bien de Interés Cultural (BIC) en la categoría de Conjunto Etnológico, constituyen un ejemplo de patrimonio arquitectónico desarrollado alrededor del mundo del vino con un atractivo muy significativo cuyo conocimiento debe conservarse y difundirse. Su barrio de bodegas sorprende desde el exterior y cautivan sus entrañas al introducirse en el interior del cotarro que transmite la esencia de su sabiduría popular. El barrio cuenta con trescientas setenta y cuatro bodegas que hoy en día se dedican más al ocio que a la producción de vino y que, adicionalmente, se posicionan como un incentivo muy interesante para potenciar el turismo de interior, Figura 1.



Figura 1. Barrio bodegas de Baltanás

La investigación realizada en este trabajo pretende contribuir a la mejora y difusión del conocimiento de este BIC focalizando su atención en el comportamiento mecánico de la prensa y en las maderas utilizadas para su construcción. La prensa es un ingenio mecánico muy antiguo, que procede de la época romana, presente en numerosos lagares del valle del Cerrato. Su estructura está formada por elementos de madera y su funcionamiento se asemeja al de una palanca de segundo grado, Figura 2. Un extremo, el apoyo, descansa en la pared, mientras que, en el otro extremo, la potencia, es donde se aplica la fuerza que consiste en una gran piedra unida a la viga a través de una pieza de madera, que es precisamente la que caracteriza este tipo de prensa y que recibe el nombre de huso o husillo. Entre ambos extremos se encuentra la resistencia conformando lo que se llama pie, en este caso la uva a exprimir, sobre la que se coloca un piso de tablones y sobre ellos un entramado de madera llamado castillo, encargado de repartir homogéneamente la presión sobre el pie. La uva que llega al lagar se deposita en lo que se llama vaso. Se estruja con la prensa y el mosto que sale cae al pozal, situado en un nivel inferior, con capacidad suficiente para recoger todo el mosto de, al menos, una prensada. El mosto se saca del pozal manualmente con un cubo. El transporte a la bodega se hacía por medio de pellicas u odres, con capacidad en torno a dos cántaros. El reparto de mosto se hacía proporcionalmente a la uva que cada cual había metido en el lagar, a razón de cinco cántaros por carga de uva.



Figura 2. Elementos de una prensa

En este trabajo se estudió la prensa del lagar comunal adoptada como geometría tipo por ser similar a muchas otras presentes en el valle del Cerrato. La viga tenía una longitud de 11,5 m, con una sección en el extremo apoyado de 70x70 cm y en el otro extremo de 50x50 cm. La piedra de la prensa tenía un peso de 1500 kg.

2. Material y métodos

El material de estudio consistió en tres muestras de madera obtenidas de los elementos de una prensa. Concretamente, una muestra de olmo de una viga, una de jerbo de un husillo y otra de enebro de una viga. El procedimiento de identificación de la especie forestal se llevó a cabo mediante la elaboración de preparaciones microscópicas de espesor entre 15 y 25 micras, cortadas según las secciones de ortotropía de la madera para su posterior observación al microscopio óptico de luz transmitida, Figura 3. Cada tipo de corte realizado proporciona información clave sobre las características anatómicas de la madera, información utilizada para identificar la especie por comparación con muestras y descripciones recogidas en la bibliografía de referencia [1-2].



Figura 3. Preparaciones microscópicas. De izquierda a derecha: olmo, jerbo y enebro

En el laboratorio se llevaron a cabo tres tipos de pruebas: ensayos no destructivos con varios dispositivos portátiles (medición de ondas sónicas con MST de Fakopp, ondas ultrasónicas con TICO de Proceq, penetración con penetrómetro Pilodyn y dureza superficial con durómetro Shore), ensayos hídricos con estufa y balanza hidrostática, y ensayos destructivos con máquina universal electromecánica. Con los datos obtenidos en los ensayos no destructivos e hídricos se calculó la densidad de la madera, el módulo de elasticidad dinámico, el contenido de humedad (por el método de secado en estufa) y la contracción volumétrica. Para los ensayos destructivos se utilizaron probetas pequeñas libres de defectos, llevándose a cabo ensayos de flexión a tres puntos para conocer la resistencia a flexión, y ensayos de compresión paralela para conocer la resistencia a compresión paralela, Figura 4.



Figura 4. Ensayos destructivos. De izquierda a derecha: flexión y compresión paralela

La clasificación estructural de cada una de las especies se realizó atendiendo a dos parámetros obtenidos experimentalmente: densidad media y resistencia característica a flexión. Una vez asignada la clase resistente de las tres maderas estudiadas, se realizó el cálculo de la estructura y la comprobación del agotamiento de los elementos principales de la prensa (viga y huso). Para calcular las leyes de esfuerzos y las reacciones en los apoyos se utilizó el software de elementos finitos Dlubal RFEM v. 5.31.

Resultados y conclusiones

Se determinó que la madera denominada coloquialmente como olmo efectivamente pertenece al género *Ulmus* L. y probablemente sea la especie *Ulmus minor* Mill., la madera denominada como jerbo se corresponde con el *Sorbus domestica* L. y, finalmente, la madera denominada como enebro se corresponde con la especie *Juniperus thurifera* L. Al olmo se le asignó una clase resistente D45, al jerbo una D60, y al enebro una C45.

La estructura se modelizó como una viga continua biapoyada con un extremo en voladizo, Figura 5. El apoyo del extremo es articulado porque la viga no puede despegarse de la pared, al estar retenida por el lobo, aunque sí puede girar. El apoyo intermedio es deslizante porque las piezas del castillo permiten el giro y además cierto movimiento lineal, al no estar unidas mecánicamente entre sí ni tampoco con la viga. Se aplicó una carga puntual en el extremo del voladizo de 15 kN, correspondiente con el peso propio de la piedra, y una carga uniforme de 2,6 kN/m, debida al peso propio de la viga.

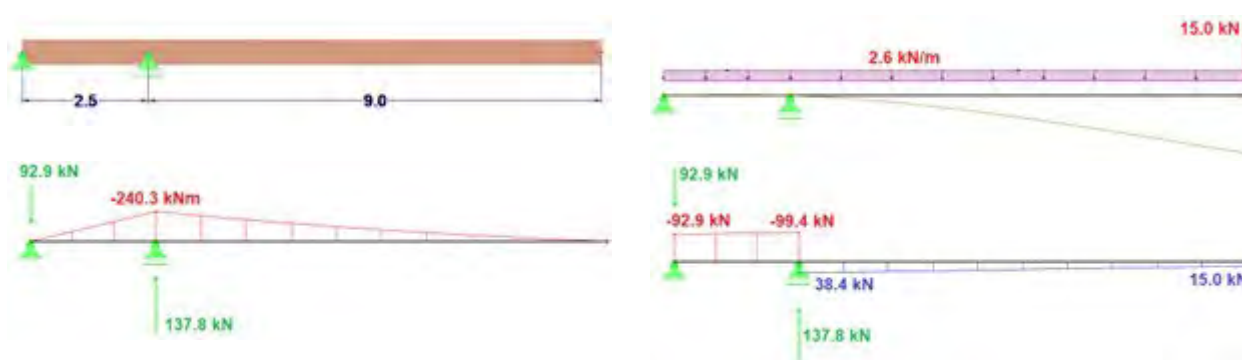


Figura 5. Deformada y leyes de esfuerzos de la prensa. De izda. a dcha.: modelización, deformada, momentos flectores y cortantes.

Se realizaron las comprobaciones de flexión y de cortante en la viga de olmo, constatando que trabaja con un agotamiento del 56 % a flexión y 29 % a cortante, y la comprobación de tracción paralela en el huso de jerbo, con a un agotamiento solamente del 8 %. Además, se verificó la viabilidad de utilizar vigas de enebro en lugar de vigas de olmo ya que, desde un punto de vista mecánico, prácticamente no había diferencia entre ambas especies. Por tanto, la estructura de la prensa, tal y como está concebida empleando las maderas y secciones tradicionales, es perfectamente funcional para el cometido que se había diseñado.

Agradecimientos

Los autores quisieran mostrar su agradecimiento a la Oficina de Aprendizaje-Servicio de la Universidad Politécnica de Madrid por haber financiado esta investigación, a la Asociación Barrio de Bodegas de Baltanás por su disponibilidad y por compartir abiertamente su conocimiento sobre las bodegas, a la empresa Dlubal Software GmbH por facilitar su programa para los cálculos y, finalmente, a los estudiantes de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura por su participación en el proyecto, concretamente, a Álvaro Lucena, Daniel Muñoz, Javier Calvo, Julio Nogales, Marta Alonso y Paula Flores.

Referencias

- [1] García, L. and Guindeo, A. (1988) Anatomía e identificación de las maderas de coníferas españolas. AITM. Madrid. 142 p.
- [2] Schweingruber, F. (1990) Anatomy of European woods. WSL/FNP. Paul Haupt Berne & Stuttgart Publishers. Stuttgart. 800 p.

1095

HABITAR LA PENDIENTE: CABAÑÓN DLPM

Alejandro Jesús González Cruz¹; José Ignacio De Teresa Fernandez Casas²; Juan Carlos Bamba Vicente³

¹ Universidad Politécnica de Madrid

² UG

³ UCSG

Palabras clave / Palavras-chave:

Rampa, Casa en pendiente, Estructura sismorresistente, Bambú, Cabañón DLPM

Resumen / Resumo:

El terremoto 7.8 de 2016 que castigó la provincia ecuatoriana de Manabí, provocó reacciones muy diferentes en la manera de entender el futuro de la vivienda en la zona. Las propuestas para las nuevas construcciones en la costa del país han oscilado desde los grandes planes habitacionales que repiten en masa la tipología de vivienda ofertada por el gobierno, hasta la aparición de propuestas puntuales que revisan los sistemas de construcción local (estructuras en bambú) y que mejor se comportaron frente al sismo. Son por ello reacciones psicológicamente opuestas, basadas por un lado en el miedo y la sobreprotección para evitar a toda costa que se repita el desastre y, por otro, en la confianza y puesta en valor del saber popular y de su capacidad de adaptación. Esta comunicación analiza una de las viviendas construidas tras el terremoto, el “Cabañón DLPM”, como propuesta crítica para la vivienda rural costera, y cuyo objetivo es poner en valor las cualidades de la arquitectura popular de la zona. Se trata de una construcción cuya estructura, organización espacial y relación con el entorno, reflexionan sobre la capacidad de la arquitectura local para transformar las formas de habitar, los modos de construir y los mecanismos de interacción con el medio ambiente tras el aprendizaje adquirido de las experiencias de crisis y escasez post-catástrofe.

1. Introducción: la casa rural costeña ecuatoriana



Figura 1. Cabañón DLPM

El terremoto de 7.8 grados en la escala Richter que afectó, en abril de 2016, a gran parte de las construcciones de la costa de Manabí, en Ecuador, evidenció la mala construcción de las viviendas de bajos recursos de la zona, y abrió un debate sobre cómo debía ser la arquitectura de la casa a partir de entonces. Aparecieron así dos propuestas enfrentadas: las revisiones de las cabañas de caña tradicionales de la zona, que habían soportado aceptablemente el sismo, y los prototipos de vivienda con bloques de hormigón del Ministerio de Vivienda (MIDUVI). No obstante, y como consecuencia del trauma post-catástrofe, la mayoría de las viviendas que se construyeron desde entonces responden al segundo esquema: barracones de una planta con muros de hormigón y cubierta de chapa, sin calidad constructiva, espacial o ambiental, que renuncian al valioso bagaje constructivo de la arquitectura del lugar. Se trata de respuestas urgentes frente al miedo y a la necesidad de vivienda económica y segura, que hipotecan su habitabilidad, y que además entienden que la única vivienda digna y aceptable por la población debe estar construida en hormigón.

Sin embargo, tras el sismo, y debido al buen comportamiento que demostraron las estructuras de caña de bambú (*Guadua Angustifolia*), se generó una revalorización de estas construcciones, que anteriormente habían sido asociadas a los sectores más pobres, para los que tener una casa en hormigón era indicio de bienestar social. El buen comportamiento sísmico de la madera y la caña se debía a la flexibilidad de estos materiales, pero también al saber hacer de la arquitectura popular de la costa. Un aprendizaje milenario que tuvo un referente cercano en los talleres de construcción en caña organizados en las últimas décadas entre las poblaciones de Puerto Rico y Las Tunas, con motivo de la construcción del complejo agro-turístico Alándalus, y con la figura del arquitecto Jorge Morán como principal responsable del proyecto [1].

Esta propuesta de comunicación tiene como objetivo poner en valor las cualidades de la vivienda popular de la costa ecuatoriana, a través del análisis de una propuesta arquitectónica concreta: el Cabañón DLPM (Figura 1), en Las Tunas, Manabí. El proyecto es el resultado de una investigación que analiza las construcciones en caña más relevantes de este periodo en la zona, y especialmente tras el terremoto, para identificar y dar forma a los principales valores constructivos, espaciales y funcionales de esta arquitectura.

Como resultado de este análisis, se han definido cuatro lineamientos de proyecto que desarrollan los principios fundamentales de la arquitectura del lugar: la relación con el terreno en el que se inserta la vivienda, la creación de una superficie horizontal que poder habitar, la construcción de una única estancia económica y adaptable a posibles cambios en su uso, y la construcción de una estructura resistente y lo bastante abierta como para permitir un correcto acondicionamiento climático de la casa.

2. Desarrollo y resultados:

2.1.La casa de adán en el paraíso [2].

Aunque el colapso estructural de las viviendas durante el terremoto fue el causante de las numerosas bajas humanas, los problemas de abastecimiento provocaron a su vez grandes dificultades en las poblaciones urbanas, y sobre todo en las rurales, para subsistir durante las semanas e incluso meses posteriores a la catástrofe.

Como consecuencia, se ha producido desde entonces una revalorización de la capacidad de autonomía de la casa para afrontar posibles periodos de escasez. Si bien la casa productiva ha estado siempre

presente en estas sociedades debido a su precariedad económica, la necesidad de autoabastecimiento se ha hecho aún más patente tras la crisis pos-terremoto. Para ello la casa se plantea más que nunca abrirse a su entorno para poder cultivar, para permitir la ventilación y ahorrar en climatización y para poder relacionarse comercialmente con las personas de alrededor.

2.2.La conquista de la horizontal

De alguna forma, la horizontal solo es valorada cuando escasea, pero tiende a hacerse omnipresente en un mundo cada vez más llano (sin altos ni bajos). El “plano horizontal plano” [3] es un artificio del ser humano que ha cobrado importancia en el territorio de lo doméstico hasta llegar a ser incuestionable y, sin embargo, no existe ninguna horizontal natural que podamos habitar en el planeta. La casa plantea recuperar el plano inclinado como espacio habitable, capaz de dar acceso a las superficies horizontales que soportan el programa convencional de una casa (sala, comedor, cocina, baño, cama y oficina), en un desplazamiento que permite llegar a una altura de 9 metros sin subir escaleras. El proyecto no pretende por ello renunciar a la horizontal, sino ponerla en valor, como primer logro de la arquitectura, antes incluso que el techo como elemento protector. Al igual que ocurre para Bachelard con el espacio, podemos entender que “el exceso (de suelo horizontal), nos asfixia mucho más que su escasez”.

Es en 1966, con el manifiesto de Paul Virilio y Claude Parent, “La función oblicua” [4], cuando el plano inclinado es explorado como una estancia más de la casa. Parent coloca planos inclinados en su propia casa para poner a prueba su propuesta conceptual de un hábitat en donde se mezclen los planos inclinados y horizontales. Al inclinarse, el suelo deja de ser únicamente para caminar, convirtiéndose en un suelo para sentarse, un suelo para mirar, un suelo para dormir, un suelo para jugar, etc. Su propia hija declaraba a este respecto que “vivir lo oblicuo no es una aventura o experiencia, nunca me he sentido como un cerdo de guinea. No se trata de un concepto. Vivir en pendiente es uno de los modos más naturales e inteligentes de vivir: dinámico, móvil, progresivo, renovable, interactivo, natural y saludable” [5].

2.3.La casa de una sola habitación

El proyecto se basa en la acción de plegado en altura del plano inclinado del suelo, dando lugar a un espacio continuo en el que la separación entre estancias no está delimitada por muros, sino por el propio suelo. De esta forma, su inclinación, superposición y distribución de las superficies horizontales, sustituye a los paramentos verticales de compartimentación. Desaparece así la idea de habitación, dejando en manos del suelo la posible aparición de usos dentro de un espacio que se comprime y dilata.

La casa está formada por una única habitación, que da lugar a un espacio continuo y genérico en donde los usos específicos aparecen para marcar lugares temporalmente [6]. El suelo es por ello soporte y es al mismo tiempo elemento de cosido y de separación entre estancias. La rampa funciona como una “extraordinaria costura espacial”, como nexo de unión, haciendo desaparecer cualquier otro elemento sintáctico de conexión; los habituales ritos de paso entre habitaciones, gestionados tradicionalmente por las puertas, son sustituidos aquí por matices en la forma del suelo. Los umbrales se convierten en cambios en la pendiente de la rampa, o en pliegues entre dos planos. Las habitaciones no están definidas por sus límites sino por las horizontales que contienen. De esta forma, en un mismo espacio continuo podemos entender que hay tantas habitaciones como superficies horizontales.

Lo mismo ocurre con la ventana, como diafragma entre el interior y el exterior. La envolvente no pretende enmarcar vistas, delegando de nuevo en el suelo esta responsabilidad. Las ventanas se esconden en las direcciones hacia las que apunta la pendiente [7]. Así, la rampa ascendente de la cubierta se convierte en una ventana al cielo durante la noche, o el plano inclinado del dormitorio, que parece extenderse hasta la playa, se convierte de alguna forma en una ventana al mar. El único elemento verdaderamente protagonista es por tanto el suelo, que remplaza a los muros, puertas, ventanas e incluso cubiertas. Como en la arquitectura oriental, el plano inclinado se convierte en un elemento central, y en parte del mobiliario. La referencia del usuario-observador cambia, aproximándose al suelo y aumentando la percepción del espacio; recuperando la intensa relación con el suelo propio de la niñez [8].

2.4. Estructuras sismoresistentes con bambú

En el centro de este espacio se inserta un elemento habitual de las construcciones de la zona, el núcleo húmedo de ladrillo que contiene el baño y la cocina. Este bloque aparece como un objeto más dentro de la casa, una caja fuerte que ayuda a rigidizar la estructura de caña y que reduce al mínimo necesario la tipología de casa tradicional, con sus puertas y ventanas, sus muros y suelos a diferentes alturas. El resto de la casa, la mayor parte, es rampa.

Alrededor el núcleo, se coloca una estructura triangulada, que envuelve el núcleo central de ladrillo a modo de “andamiaje”, construyendo tres tramos de diferente inclinación (10%, 8%, y 16%), que se adaptan al programa correspondiente. El desarrollo en rampa de la estructura permite la triangulación de la misma, y el uso de losas de hormigón aligeradas con cascarilla de arroz reduce en 9 toneladas su peso, generando una estructura sismorresistente que permite construir a menos de \$100 el metro cuadrado.

Empresas como Hogar de Cristo o Techo, han creado prototipos de vivienda de bajo coste, que reproducen estas nociones básicas de la construcción en caña y madera, renunciando a alguno de los valores primordiales, como la separación del suelo para evitar la filtración de agua a la estructura. Sus talleres de construcción con alumnos se unen a los proyectos de diseño y trabajo comunitario organizados por universidades entre las que destaca la UCSG, con el ejemplo del prototipo de vivienda construido en Durán en 2016 denominado la Casa Eco, la edificación para usos comunitarios del Wild Child Village, o prototipos habitable de emergencia construidos con estructuras de paneles prefabricados de bambú, protegidos con una envolvente de fibras naturales procedentes de los desechos de la agroindustria [9]

De esta manera, a través de los talleres se pretende hacer reflexionar a los estudiantes y miembros de la comunidad, sobre los valores de la arquitectura popular, aplicando estos principios a casos reales de vivienda, contribuyendo así a la evolución de la tipología local, y poniendo el foco de atención sobre un problema creciente y universal. raíz del Terremoto 7.8 (2016), el gobierno, a través del Ministerio de desarrollo urbano y vivienda, con el asesoramiento de las universidades, apostó por construcciones en bambú, sacando adelante una Norma Ecuatoriana de la Construcción para estructuras de Guadúa, hasta entonces inexistente.

3. Conclusiones

De estos cuatro lineamientos, podemos extraer a modo de conclusiones varios objetivos específicos que se plantea el proyecto y que pretende hacer extensivos a otros proyectos de vivienda en la costa:

- Preservación del terreno natural, recurriendo a formas de apoyarse que eviten la eliminación de la topografía, permeabilidad y especies vegetales preexistentes. Esto resulta especialmente complicado en el caso de terrenos en fuerte pendiente como el del caso de estudio, en donde el plano inclinado del terreno es puesto en valor y prolongado en altura.
- Aprovechamiento del terreno cultivable y gestión de los recursos hídricos existentes, así como la recogida y tratamiento del agua de lluvia y de las aguas grises producidas por la vivienda, para su uso en regadío.
- Puesta en valor de la horizontal como excepción al plano inclinado, evitando la innecesaria “horizontalización” de todo el suelo de la casa y de su entorno.
- Análisis de las posibilidades espaciales que ofrece la construcción de un único espacio continuo en el interior de la casa, y de los matices que puede haber en la colocación del programa en su interior.
- Diferenciación de las dos estructuras que forman la casa popular: un núcleo rígido que contiene los cuartos húmedos, y una estructura ligera en la que se desarrollan los usos más cambiantes de la vivienda.
- Utilización de materiales sostenibles como la caña o la tierra del lugar.
- Creación de una gran sombra ventilada que evite el uso del aire acondicionado.
- Puesta en valor de la capacidad de autonomía de la casa en cuanto a abastecimiento energético y de suministros básicos.

Referencias

- [1] MORÁN, Jorge (1987). *Vocabulario de arquitectura campesina en el litoral ecuatoriano*. Museo Antropológico del Banco Central del Ecuador y Universidad Laica Vicente Rocafuerte, Guayaquil.
- [2] RIKWERT, Joseph (1971). *La casa de Adán en el Paraíso*. Gustavo Gili, Barcelona.
- [3] CAMPO BAEZA, Alberto (2012). *Principia architectonica*. Mairera, Madrid.
- [4] PARENT, Claude y VIRILIO, Paul (1966). *Architecture Principe*. Revista-manifiesto del grupo Architecture Principe. París.
- [5] KOOLHAAS, Rem (2014). *Elements of architecture: RAMP*. Marsilio, Venecia, p. 69.
- [6] APARICIO, Jesús (2008). *Construyendo con la razón y los sentidos*. Nobuko, Madrid.
- [7] DE MOLINA, Santiago (2017). *Hambre de arquitectura: Necesidad y práctica de lo cotidiano*. Ed.Asimétricas, Madrid, p.115-116.
- [8] MONTEYS, Xavier (2000). *La casa collage*. Gustavo Gili, Barcelona.
- [9] GONZÁLEZ CRUZ, Alejandro Jesús (2021). *RAE-Refugio Antártico Ecuatoriano: Etapa 1*. UCSG, Guayaquil.

1096

HACIA LA FABRICACIÓN DIGITAL DE ESTRUCTURAS LAMINARES DE MADERA DEFORMADAS ELÁSTICAMENTE CON MALLADOS ORTOGONALES

Carlos Martínez-Criado¹; Antonio José Lara Bocanegra¹; Antonio Roig¹; Francisco González Quintial²; Andrés Martín-Pastor³; Almudena Majano Majano¹

¹ Universidad Politécnica de Madrid

² Universidad del País Vasco

³ Universidad de Sevilla

Palabras clave / Palavras-chave:

Diseño computacional, Estructuras ligeras, Fabricación digital, Flexión activa, Mecanizado CNC, Uniones carpinteras

Resumen / Resumo:

Las estructuras laminas reticulares (conocidas en inglés como gridshells) de madera son estructuras que, gracias a la eficiencia estructural que les confiere su forma curva consiguen una notable optimización de material, constituyendo una excelente respuesta a las exigencias cada vez mayores de una construcción con bajas emisiones de carbono. El presente trabajo explora posibilidades de diseño y fabricación de este tipo de estructuras a partir de la integración de la flexión elástica y el empleo de uniones carpinteras mecanizadas por CNC, poniendo el foco de atención en soluciones con mallados ortogonales, los cuales garantizan el encuentro en ángulo recto de las piezas a la vez que permiten simplificar las soluciones de unión. La complejidad y expresividad implícitas en el diseño de gridshells se aborda en esta investigación mediante un flujo de trabajo que desde las primeras etapas tiene en cuenta el proceso de manufacturación final. La adecuada selección del mallado permite simplificar otros aspectos de gran relevancia en el diseño de gridshells como la cubrición de la estructura a partir de elementos planos o desarrollables. El empleo conjunto de la flexión activa y la desarrollabilidad permiten mecanizar todos los elementos de la estructura con una misma herramienta sobre un tablero variando únicamente el soporte sobre el que se mecaniza en función de los espesores requeridos por cada componente. La metodología propuesta es validada mediante el diseño y construcción de modelos a escala.

1. Introducción

El empleo de madera en la construcción, así como la implementación de nuevas estrategias de diseño computacional ligado a las ventajas que ofrece la fabricación digital han hecho posible realizar, entre otros, impresionantes estructuras laminas reticulares de madera (gridshells). Estas constituyen estructuras muy eficientes a la vez que expresivas, adecuadas para cubiertas ligeras de medias y grandes luces, que adquieren gran parte de su rigidez y capacidad portante gracias a su forma.

La eficiencia, el atractivo estético y unas exigencias cada vez mayores de una construcción con bajas emisiones de carbono hacen que estas estructuras sean cada vez más interesantes para arquitectos e ingenieros si bien es cierto que la falta de una técnica constructiva económicamente asequible ha relegado su uso a obras singulares.

El presente trabajo propone integrar el curvado en flexión activa con el empleo de uniones carpinteras madera-madera realizadas mediante CNC para dar una respuesta ágil y asequible a la construcción de este tipo de estructuras. Se plantea un nuevo sistema de unión multicapa que posibilite un proceso de curvado e instalación sencillo, preciso y rápido a la vez que se obtiene una estructura atractiva con un alto grado de rigidez debido a la configuración de las uniones.

2. Mallados ortogonales

Una gridshell de madera puede entenderse como una red de delgadas tiras de madera que se extienden sobre la superficie de referencia de la estructura. Estas láminas, al ser curvadas sobre la superficie, adoptan con carácter general una combinación de torsión y curvatura en los dos ejes de inercia cuyas características dependen tanto de la superficie subyacente como de la trayectoria de las láminas sobre la misma. Existen ciertos patrones que eliminan alguna de estas componentes como son los de **curvas geodésicas**, que no tiene curvatura geodésica; los de **curvas asintóticas**, en los que la curvatura normal es cero; o los de **líneas de curvatura principal**, cuya torsión es nula. La imposición de estas condiciones puede permitir, a cambio de cierta restricción formal, simplificar el proceso de fabricación y construcción [1], en contraposición con mallados libres que se materializan en elementos que presentan curvatura en los dos ejes de inercia y torsión.

El presente trabajo parte de la condición de ortogonalidad de la malla, lo que abre la posibilidad de fabricar láminas con uniones carpinteras mecanizadas con maquinaria CNC estándar de tres ejes. Esta condición de ortogonalidad es inherente a algunos mallados (Figura 1) como son los mallados asintóticos en superficies mínimas, los de líneas de curvatura principal (LCP) en cualquier superficie, los de curvatura principal constante (CMC meshes) o los de líneas de tensión principal [2]. También se pueden generar mallas ortogonales trazando geodésicas perpendiculares entre sí en una superficie desarrollable.

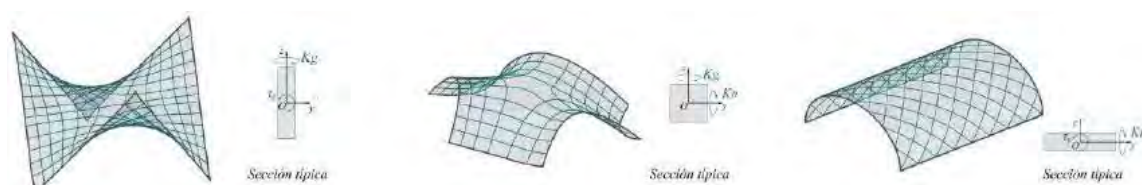


Figura 1. Ejemplos de mallados ortogonales: líneas asintóticas en superficie mínima (izq.), líneas de curvatura principal (centro) y geodésicas en superficies desarrollables (dcha.).

3. Flujo de información: del diseño a la fabricación

Tomando como punto de partida una red de curvas ortogonales sobre una superficie (p.ej. algunas de las mencionadas en el apartado anterior), el flujo de trabajo propuesto avanza a través de las siguientes fases: 1) Modelo geométrico (estructura alámbrica multicapa + análisis de tensiones de curvado); 2) Modelo detallado (espesores reales y detalles); y 3) Desarrollo 2D y fabricación (figura 2).



Figura 2. Flujo de diseño.

Definida la geometría de la unión surge el modelo geométrico multicapa en el que se especifican las fibras neutras de las futuras láminas. En un sistema multicapa de dos capas, existen un total de cuatro superficies de referencia separadas entre sí [3] una distancia “S”, que viene definida, en este caso, por la geometría de la unión. Considerando las intersecciones entre las curvas del mallado como una matriz de nodos, la matriz contenida en la superficie original (N0) se desplaza en la dirección del vector normal a la misma en cada uno de estos nodos una distancia S (N1), 2S (N2) y 3S (N3) respectivamente (figura 3). Estas cuatro matrices de nodos sirven de soporte para dibujar la red de curvas que conforman el Modelo geométrico desde el que se generarán el resto de los modelos. Para esta red se puede extraer el vector curvatura (k) de cada una de las fibras de manera discreta en toda su longitud y proyectarlo según las direcciones normal y tangente a la superficie obteniendo las curvaturas normal y geodésica de cada una de las tiras en cada punto, a partir de las cuales se realiza el análisis de las tensiones de curvado debidas a la flexión en régimen elástico de las mismas [4] (Figura 2 izq.).

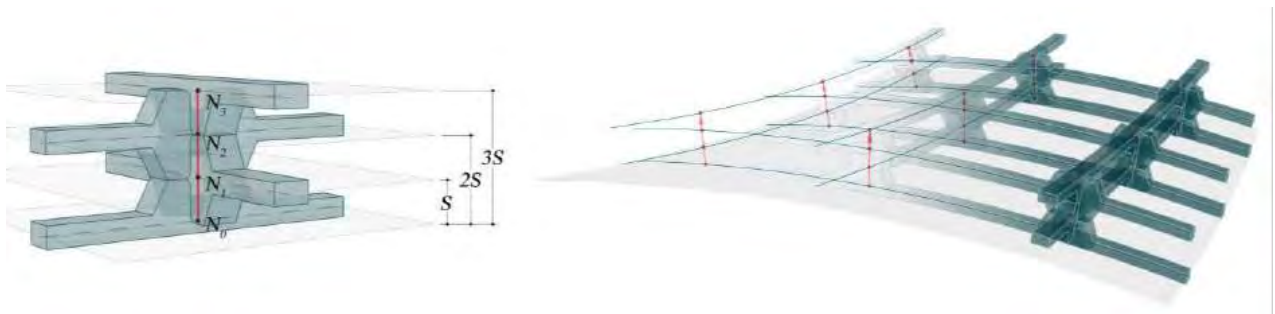


Figura 3. Sistema de generación.

A partir del modelo geométrico se obtiene un *Modelo detallado* que contiene toda la geometría necesaria para el posterior diseño de apoyos y cubrición de la estructura. Se especifica la sección transversal de las láminas y las uniones se orientan sobre cada uno de los nodos mediante un sistema de ejes locales con relación a la superficie.

Por último, la geometría se traslada al plano para poder generar un archivo de fabricación que posteriormente se mecanice mediante CNC. El empleo del principio de flexión activa permite obtener una geometría curva a partir de la deformación elástica de una tira recta. El proceso inverso, es decir,

la traducción de la geometría 3D curvada a 2D, se lleva a cabo de manera individual - lámina a lámina - evaluando para cada una de ellas la longitud de cada tramo entre nodos y trasladando el módulo, de forma acumulada, sobre una recta. Esto permite “desplegar” cada curva y sus respectivos nodos para, posteriormente, orientar la geometría de la unión mediante un sistema de ejes de referencia locales. La cubrición se discretiza en tiras desarrollables las cuales se desdoblan en su forma plana.

Todos los componentes propuestos para la resolución de este tipo de estructuras tienen como denominador común la posibilidad de mecanizarse con CNC de tres ejes sobre un tablero en dirección exclusivamente perpendicular a este, lo que permite unificar la manufacturación de toda la estructura con una misma herramienta variando únicamente el soporte sobre el que se trabaja atendiendo a los espesores requeridos por cada componente.

La metodología se ha validado mediante el diseño y fabricación de un modelo a escala (figura 4) realizado por corte láser en el que se emplea un patrón de LCP que constituye, de manera intrínseca, una malla de cuadriláteros planos (PQ mesh), cuya versión semi-discreta genera en ambas direcciones bandas desarrollables [5]. Este método permite cubrir la superficie mediante delgados tableros a lo largo de una de las direcciones del mallado.

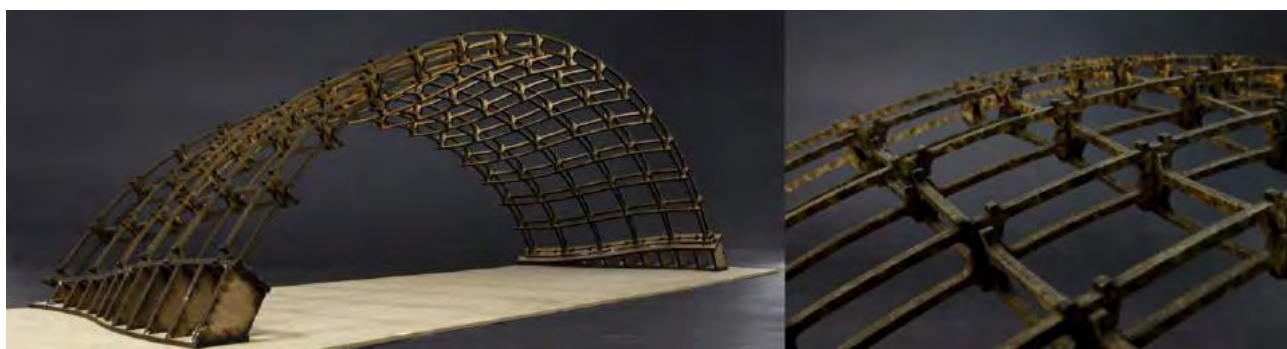


Figura 4. Modelo a escala (izq.) y detalle de la unión propuesta (dcha.).

4. Conclusiones

El sistema planteado supone una alternativa al diseño tradicional de estructuras laminares reticulares combinando las ventajas de la flexión activa y la mecanización CNC aplicada a uniones carpinteras. Esta conjunción resulta en un sistema preciso, coherente y atractivo que emplea exclusivamente tableros de madera mecanizados a través de una sola herramienta, el cual se ha validado mediante la construcción de prototipos a diferentes escalas. Futuros trabajos de interés son el desarrollo y caracterización del sistema de unión y el análisis de la necesidad de implementar algún sistema de rigidización a cortante en el plano de la lámina, adicional a la rigidez rotacional proporcionada por las uniones. Además, la utilización de mallados ortogonales sugiere la exploración sobre nuevos métodos de generación y optimización que amplíen la libertad formal del sistema.

Agradecimientos

Este trabajo es parte del proyecto de I+D+i PID2020-112954RA-I00, financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033.

Referencias

- [1] Oberbichler T, Schling E, Bletzinger KU (2023) Tracing curvature paths on trimmed multipatch surfaces. *Appl Math Model*, vol. 118, pp. 253–271. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2023.01.033>.
- [2] Dellinger F, Li X, and Wang H.(2023) Discrete Orthogonal Structures. *Computers and Graphics*. <https://doi.org/10.1016/j.cag.2023.05.024>
- [3] Slabbinck E, Blumer H, Rick S, Riegenbach D, Antemann M, and Scheurer F. (2023) Integrative approach to a timber gridshell formed on-site. *Proceedings of the IASS Annual Symposium 2023 Integration of Design and Fabrication*. 10–14 July 2023, Melbourne, Australia.
- [4] Lara-Bocanegra AJ, Majano-Majano A, Arriaga F, Guaita M. (2018) Long-term bending stress relaxation in timber laths for the structural design of lattice shells. *Construction and Building Materials*, 193:565-575. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.224>
- [5] Pottman H, Asperl A, Hofer M, Kilian A (2007) *Architectural geometry*. Bentley Institute Press. Exton, Pennsylvania, USA.

1097

HERRAMIENTA DE ESTIMACIÓN DE DISPONIBILIDAD DE MADERA ESTRUCTURAL A NIVEL DE CUENCA FORESTAL

Gonzalo Caballé¹; José Luis Villanueva¹; Saúl Gutiérrez¹; Diego Aranda²; Rafael Alonso²

¹ CESEFOR

² FORA

Palabras clave / Palavras-chave:

Caracterización estructural, LiDAR, Pino silvestre, Montes Universales

Resumen / Resumo:

Se propone una metodología de estimación de disponibilidad de madera con características estructurales a escala de cuenca forestal. La metodología combina tecnología LiDAR, inventarios de campo, evaluación de rendimiento en industria y caracterización estructural de la madera en laboratorio. La información obtenida se utiliza para modelizar el volumen de madera por clases de calidad. Finalmente, se genera una cartografía predictiva a escala de cuenca forestal que muestra la distribución de las distintas clases estructurales. La herramienta desarrollada proporciona información precisa sobre el potencial de provisión de madera estructural en la cuenca forestal para orientar la ubicación de la industria.

1. Introducción

El estudio de factibilidad que se realiza para el establecimiento de una forestoindustria orientada a la fabricación de productos estructurales contempla entre sus capítulos una definición precisa de la fuente u oferta de madera con aptitud estructural. En términos técnicos, es necesario establecer el área geográfica o cuenca forestal proveedora. El presente trabajo propone una metodología de estimación de disponibilidad de madera con características estructurales a escala de cuenca forestal. La metodología fue desarrollada para pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.) pero se podría replicar para otras especies.

El pino silvestre es una de las especies con mayor área de distribución natural en Europa, abarcando incluso parte de Asia. La mayor parte de sus masas se distribuyen de forma continua, formando extensos bosques de llanura y de media montaña. En la región austral de su distribución, que corresponde a las formaciones de España, aparece de forma discontinua y en altitudes elevadas ocupando una superficie de 1,04 millones de hectáreas [1]. Esta superficie, supone una existencia de madera próxima a 153 millones de m³ ubicándose entre las especies de mayor importancia [2].

2. Metodología

2.1. Área de estudio

Se utilizó como área de estudio las masas puras de *Pinus sylvestris* de los Montes Universales distribuidos en las provincias de Cuenca (19.794 ha), Guadalajara (25.041 ha) y Teruel (31.748 ha), España. La determinación de la superficie de bosque que integra dicha área se realizó en base al Mapa Forestal de España a escala 1:50.000 (MFE50), seleccionando aquellas áreas con al menos un 70% de cobertura de la especie objetivo. En total, el área de estudio ocupa algo más de 76.000 ha.

2.2. Evaluación del recurso forestal

2.2.1. Pre-procesado de información LiDAR y estratificación

La evaluación del recurso forestal se realizó mediante un inventario LiDAR (acrónimo del inglés LiDAR, Laser Imaging Detection and Ranging) por métodos de masa. Para ello, resultó imprescindible estratificar el área de estudio (76.000 ha) con el fin de que la muestra recogiera de la mejor manera posible toda la variabilidad de estructuras forestales presentes. La definición de los estratos de muestreo se realizó empleando como estratificadores el nivel de cobertura arbórea o fracción de cabida cubierta (LFCC) y el percentil 95 de la altura de la vegetación (P95). Los datos LiDAR se obtuvieron vía web desde el Centro de Descargas del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG, <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/>) pertenecientes al Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA). Para el procesado de los datos LiDAR, se utilizó el software easyLAZ® [3], que permite el análisis y procesamiento masivo de información LiDAR. Finalizado el procesamiento de dicha información, se definieron tres niveles para cada uno de esos dos estratificadores.

Esta estratificación, permitió ubicar 33 parcelas de muestreo a campo cubriendo todas las estructuras de bosques a partir de los cuales se pudieron ajustar modelos no lineales predictivos de las variables dasométricas básicas de interés para la gestión. Fueron implementadas parcelas circulares con radio de 14,1 m para que tuvieran una superficie (625 m²) coincidente con la del pixel obtenido en la tecnología LiDAR. Se midió el diámetro a la altura del pecho (DAP, 1,3m) en todos los árboles de la parcela fijando el diámetro mínimo inventariable en 7,5 cm. Adicionalmente, se midió la altura de los árboles dominantes de la parcela.

2.2.2. Recorte de la nube de puntos de las parcelas de campo

Mediante programas específicos de tratamiento de datos LiDAR se procedió al recorte de la ubicación exacta de las parcelas de muestreo a campo, cuyas coordenadas fueron tomadas con precisión submétrica. Una vez recortadas las parcelas de campo se calculó una amplia colección de estadísticos LiDAR para cada una de ellas y se creó una base de datos con las variables dasométricas derivadas de la información tomada sobre el terreno (densidad, área basimétrica, altura dominante, diámetro medio cuadrático, volumen con corteza) y diferentes estadísticos LiDAR. Tras generar la base de datos se procedió a ajustar diferentes modelos estadísticos para estimar las variables dasométricas a partir de información LiDAR. En este proceso se empleó la plataforma forecast (<https://forecast.fora.es/>, Föra SLL, España) y se obtuvieron estimadores para: densidad (N), área basimétrica (G), diámetro medio cuadrático (Dg), altura dominante (Ho), volumen maderable con corteza (VCC), biomasa (W) y altura de la base de la copa (HCB). Dichos modelos se aplicaron a la superficie total del área de estudio obteniendo un mapa en continuo de las diferentes variables dasométricas.

2.3. Caracterización estructural

2.3.1. Selección de las muestras

Teniendo en cuenta la variabilidad de estratos del área de estudio, se seleccionaron 15 parcelas de muestreo a campo del total de 33 para obtener madera. En cada parcela se identificaron los 10 árboles más próximos al centro, se realizó una estimación de calidades de sus trozas en pie y luego se apearon obteniendo trozas hasta un diámetro en punta fina de 20 cm. Cada troza fue identificada con el número de árbol y parcela correspondiente. Las trozas se aserraron en serrerías de la zona y las piezas de madera obtenidas fueron medidas en sección y largo. Se estimó el rendimiento de aserrado y todas las piezas fueron clasificadas visualmente siguiendo la norma EN 1611-1:2021, también conocida como “Madera aserrada de coníferas - Clasificación visual de calidad - Parte 1: Pino silvestre. Del total de piezas aserradas obtenidas, se escogieron 150 piezas aleatoriamente de 15x5 cm de sección que se enviaron a ensayar al laboratorio de Fundación CeseFor (Soria, España).

2.3.2. Clasificación mediante técnicas no destructivas

Inmediatamente después del acondicionado y previamente al ensayo destructivo a flexión se procedió a la clasificación de las piezas de madera aserrada mediante técnicas mecánicas no destructivas. Se realizó la clasificación de cada pieza midiendo la frecuencia de propagación de onda acústica empleando el equipo MTG de brookhuis. Cada pieza de madera fue además pesada y medida con precisión, con el objeto de determinar posteriormente la densidad de la misma.

2.3.3. Ensayo destructivo a flexión

El protocolo de ensayo se realizó siguiendo la norma UNE-EN 408. Fundación CeseFor dispone en su laboratorio de una máquina universal de ensayo de flexión y compresión con capacidad de 50 t y luces en flexión de hasta 6m dotada de dos extensómetros para la medición de modo continuo de la flecha de las vigas durante el ensayo. La norma establece que la velocidad de aplicación de la carga no debe superar en ningún momento los 0,003 h mm/s, criterio que se cumplió en todos los casos. La presión se mantuvo hasta alcanzar una carga (dentro del tramo elástico del material) suficiente para obtener las gráficas de deformación-fuerza necesarias para los cálculos de los módulos de elasticidad global y local. Posteriormente, se retiraron ambos extensómetros y se continuó hasta la rotura de la pieza, momento en el que se obtuvo la Fmax (carga de rotura), el tiempo de duración del ensayo, y el motivo y la localización de la rotura. Una vez rota la pieza se clasificó visualmente la sección de rotura, midiendo y caracterizando la singularidad que produjo la rotura.

2.4. Modelización del volumen por calidades de madera

Los datos empleados en la modelización provienen de los cálculos de rendimientos por clase de calidad realizados en aserradero, fruto del meticuloso trabajo de trazabilidad, desde el monte hasta el aserradero, de todos los árboles apeados, las trozas seleccionadas y los productos de madera aserrada obtenidos y clasificados. Tras la elaboración y depuración de los datos disponibles, para los ajustes se contó con datos de 1094 piezas, extraídas de 354 trozas (de 4 m mayoritariamente), correspondientes a 144 árboles repartidos por 15 parcelas, en las cuales además se obtuvo información dasométrica completa de todos los árboles cortados y no cortados. A estas 15 parcelas, se sumaron las 18 parcelas restantes en las que estaba disponible la información dendrométrica y dasométrica pero no la de calidad de la madera (no se apearon árboles).

2.5. Generación de la cartografía de la madera de calidad

Una vez obtenidas las ecuaciones que relacionan las diferentes variables evaluadoras de la madera de calidad a nivel de parcela con una o más variables dasométricas, resulta inmediato alcanzar el objetivo último del proceso: generar una cartografía predictiva a escala de cuenca forestal de la madera de calidad de pino silvestre en los Montes Universales.

3. Resultados

3.1. Inventario LiDAR

En la Tabla 1 se muestran las ecuaciones ajustadas para las siete variables dasométricas objetivo del inventario. Todos los parámetros resultaron significativos ($p < 0.05$).

Tabla 1. Ecuaciones LiDAR ajustadas

Variable dasométrica	Definición	Unidades	Ecuación LiDAR
N	Densidad de pies	árboles/ha	$5.9993 * \exp(-0.0614 * LH\_VAR) * \exp(3.5484 * CANOPY) * \exp(0.03 * LFCC\_MEAN) * \exp(4.481 * LH\_CV)$
G	Área basimétrica	m ² /ha	$0.1903 * \exp(0.0809 * LH\_VAR) * \exp(3.2724 * CANOPY) * \exp(0.0305 * LFCC\_MEAN)$
DG	Diámetro medio cuadrático	cm	$18.0111 * \exp(0.0707 * LH\_VAR) * \exp(-2.0398 * LH\_CV)$
HO	Altura dominante	m	$6.0203 * \exp(0.0619 * LH\_P95)$
VCC	Volumen con corteza	m ³ /ha	$0.044 * LH\_P25^{0.9842} * LFCC\_MEAN^{1.3327}$
W	Biomasa anhidra total	t/ha	$0.055 * LH\_P20^{0.6839} * LFCC\_MEAN^{1.3886}$
HCB	Altura de la base de la copa viva	m	$HO / (1 + \exp(1.416 - 0.0487 * LH\_P95 + 0.0039 * ALL\_FIRST - 0.0171 * LFCC\_MEAN))$

3.2. Caracterización de las masas desde la perspectiva de la madera de calidad

Una vez aplicadas las ecuaciones obtenidas a la cartografía generada en el inventario LiDAR, se obtiene la caracterización de las masas desde la perspectiva de la madera de calidad, en forma de archivos SIG. Como ejemplo de los resultados que pueden consultarse en dichos archivos, se muestra en la Figura 1 un ejemplo de visualización de los volúmenes de las calidades estructurales según el criterio de Clases Resistentes (C18 y C24).

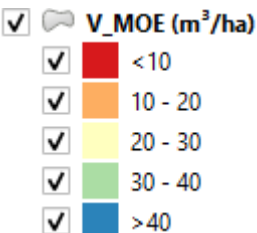


Figura 1. Ejemplo de cartografía de volúmenes por calidades en una pequeña zona del área de interés. Suma de los volúmenes de calidades estructurales C18 y C24.

4. Conclusiones

La metodología desarrollada permite definir con alta precisión el potencial de provisión, ubicación y volumen, de madera con calidad estructural de una cuenca forestal convirtiéndose en una herramienta clave en la instalación de una industria.

Agradecimientos

El presente estudio fue financiado por el proyecto Grupos Operativos-GO PRORURAL (O00000226e2000044608), Fondo Español de Garantía Agraria, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Un especial agradecimiento al personal del laboratorio de ensayos de Fundación CESEFOR, Álvaro Sánchez, Juan Carlos Rubio, Pablo Blanco y Laura Gomez.

Referencias

- [1] Rojo A. & Montero G. (1996) El pino silvestre en la Sierra de Guadarrama. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, ISBN: 84-491-0203-0. Pp-296.
- [2] Bravo F, Guijarro M, Cámara A, Díaz Balteiro L, Fernández P, Pajares JA, Pemán J, Ruiz-Peinado R. 2017. La situación de los bosques y el sector forestal en España – ISFE 2017. Sociedad Española de Ciencias Forestales. 275 pp. Edita Sociedad Española de Ciencias Forestales. 2017
- [3] Alonso Ponce, R.; Lizarralde, I.; Rodríguez-Puerta, F. y Pérez-Rodríguez, F., 2018. EasyLaz 1.0. Registro de la Propiedad Intelectual SO-8/2018.

1098

HIPÓTESIS SOBRE EL PROCESO CONSTRUCTIVO DE LA ARMADURA DE CUBIERTA DEL CONVENTO DE GRACIA EN ÁVILA S XVI

María Angeles Benito Pradillo¹; Sofía Carabaña Lozano¹

¹ Universidad Politécnica de Madrid, ETSAM

Palabras clave / Palavras-chave:

Armaduras, madera, Estructura de bajocubierta, Par e hilera, Cercha española

Resumen / Resumo:

El conjunto del Convento de Gracia en Ávila se realizó en diferentes campañas constructivas. Este artículo se centra en el proceso constructivo de la armadura de cubierta de los cuerpos sur y oeste. Para el estudio se plantea una hipótesis del orden del proceso constructivo que posteriormente se verificará basándose en tres aspectos. En primer lugar teniendo en cuenta el estudio de la planimetría y fotografía histórica, donde se observa la evolución en el tiempo. En segundo lugar se analizarán insitu diferentes vestigios en el propio edificio que apoyan esta hipótesis. Y por último, se realizará un análisis de comprobación de la viabilidad estructural que corrobora la hipótesis planteada.

1. Objeto de estudio y marco de la investigación

El conjunto del Convento de Gracia en Ávila data del siglo XVI. Es a partir de entonces cuando comienza a levantarse en un largo periodo de tiempo, junto al cubo sureste de Muralla de Ávila, este Convento [1]. Las distintas fases de construcción por las que pasó aparentemente se deben a una cuestión económica y a la necesidad de ampliación del edificio debido al crecimiento de la Comunidad.

El objetivo de este artículo es analizar, a través de un análisis cronológico y constructivo, el uso de diferentes tipologías para las armaduras del bajo cubierta empleadas en los cuerpos Sur y Oeste de este complejo arquitectónico, para plantear una hipótesis del proceso crono-constructivo que se corroborará desde tres puntos de vista: planimetría y fotografía histórica, análisis in situ de vestigios en el propio edificio y comprobación de la viabilidad estructural.

2. Metodología de análisis

Para el análisis del espacio bajocubierta la metodología utilizada es por un lado desde el punto de vista histórico y por otro desde el análisis experimental insitu en el propio edificio, todo ello con una

capacidad de síntesis desde una perspectiva de arquitecto y teniendo en el horizonte los trabajos realizados para la restauración de este bajocubierta.

Se han consultado fuentes bibliográficas históricas [2] y junto a ellas también la memoria del Proyecto Básico de Restauración [3] y el Proyecto de Ejecución.

Se han realizado como trabajo de campo tomas de datos y mediciones insitu, con xilohigrómetro, para ver el contenido de humedad de la madera, además de ensayos no destructivos con penetrómetro WOOD Pecker DCR



Figura 1. Mediciones con el xilohigrómetro, izquierda. Ensayo con el penetrómetro, derecha. Fuente: Elaboración propia.

A partir de estos datos recopilados y la planimetría obtenida, se ha realizado un levantamiento del espacio para analizar y comprender los elementos que lo configuran.

3. Tipologías e hipótesis de proceso constructivo

3.1. Identificación de tipologías formales

Se trata de dos cuerpos de tipología formal a cuatro aguas y planta rectangular erguidos sobre unos muros de sillería y entramados de madera horizontales. El encuentro entre estos cuerpos se da en un único punto, teniendo el acceso al espacio completo de bajocubierta por una escalera situada en el este del cuerpo sur.

Alrededor del siglo XVI la técnica constructiva empleada en España para las armaduras de cubierta era de armadura de pares, según el criterio establecido por Fernández Cabo [4]. Esta técnica constaba de una serie de vigas de madera paralelas enfrentadas entre ellas, siguiendo la pendiente de la cubierta en forma de 'v' invertida. Los extremos descansan en un durmiente o estribo, repartiendo las cargas al apoyo horizontal sobre el que se levanta la cubierta, conformado por el entramado horizontal y el muro de sillería.

En el caso del Convento de Gracia nos encontramos con esta tipología constructiva de **armadura de par e hilera** en el cuerpo sur, en la zona donde se realiza el acceso. En el caso de las armaduras de par e hilera del cuerpo sur, los pares acortan su luz introduciendo un elemento de apoyo intermedio. Una carrera paralela a la hilera, apoyada sobre zapatas que distribuyen las cargas a unos pies derechos. En el encuentro la unión es de entalladura descansando el par con un corte en barbilla sobre la carrera. Contra el estribo el ensamble es de barbilla a tope [5].

En el cuerpo Oeste, encontramos una tipología diferente, la cubierta de **cerchas a la española**, se componen de pendolón y tornapuntas y un tirante. El ensamble se realiza también en barbilla. Las cerchas a la española no continúan a lo largo de todo el cuerpo Oeste, sino que se vuelve a desarrollar de nuevo la tipología de par e hilera.

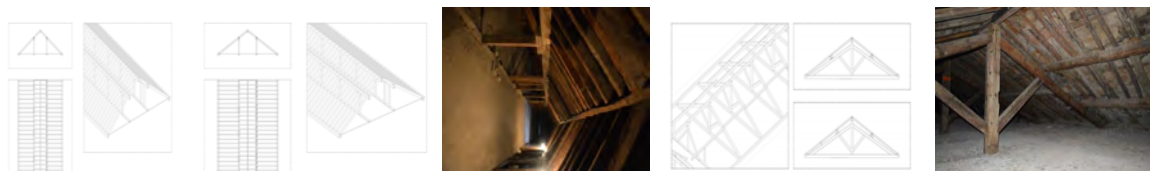


Figura 2. Levantamiento y fotografías de la estructura de par e hilera del brazo sur y detalle de encuentro en barbilla. (izquierda) y de la estructura de cubierta a la española del brazo oeste del bajocubierta (derecha) Elaboración propia.

3.2.Hipótesis de proceso constructivo

La hipótesis del proceso constructivo se centra en la unión del bloque Oeste, construido posteriormente, con el bloque Sur, ya existente. A continuación detallamos los pasos a seguir en esta hipótesis del proceso constructivo:

Se comienza por eliminar los pares situados en el punto de unión de ambos cuerpos y se corta la carrera intermedia de apoyo para los pares.

Se levanta un pie derecho, con dos diagonales a sus lados para evitar el pandeo y se dispone sobre este una zapata para apoyo la nueva cumbrera del cuerpo Oeste en perpendicular al cuerpo Sur.

Se colocan la cumbrera central y los apoyos intermedios. Las limahoyas que se generan entre los dos cuerpos se apoyan sobre la nueva cumbrera y los pares existentes.

Se coloca nuevamente los pares retirados en un inicio en el ala Sur apoyándose sobre las nuevas limahoyas

Se finaliza con la colocación de los pares de la zona oeste, los cuales se apoyan sobre las correas y cumbrera sustentadas por las cerchas en la zona más cercana a la unión y por estructuras de par e hilera en el resto.

4. Verificación de la hipótesis

4.1.Planimetría existente

Se consulta la planimetría histórica para corroborar que el cuerpo Oeste comienza a aparecer en los dibujos a partir de mediados del siglo XIX. La única comunicación existente del cuerpo Oeste con el cuerpo Sur, además del espacio bajo cubierta, se encuentra a cota de patio. Se deduce de ello que la construcción de ambos cuerpos fue en un lapso de tiempo distinto.

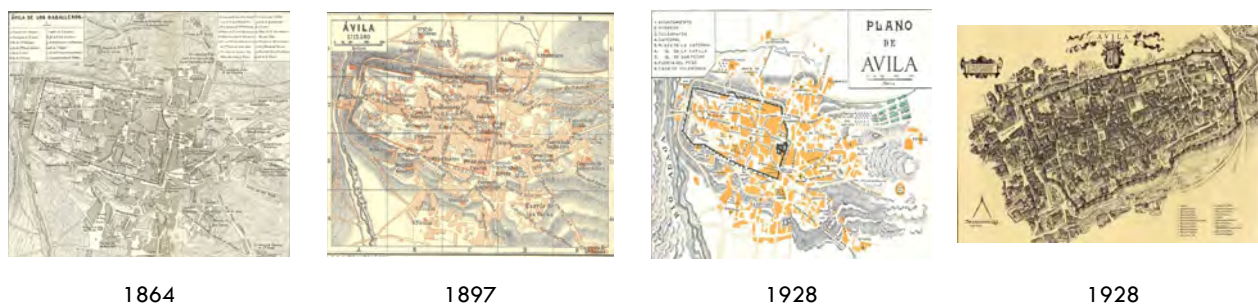


Figura 3. Cartografía histórica.a) Plano atlas diccionario geográfico estadístico histórico de España y sus posesiones de ultramar.Colección F Coello.b) Plano de guía de viaje: Spanien und Portugal Karl Baedeker_ Leipzig_Alemania. Geógrafos Wagner & Deves Arch. J. L. Pajares.c) Ávila. Plano de la ciudad. h. 1928 Enciclopedia Universal Espasa Archivo J. Luis Pajares. d) Vista aérea del recinto amurallado 1973_1974. Vista desde el norte. Archivo José Luis Pajares.

4.2.Vestigios in situ

El análisis de los distintos vestigios que se observan insitu lleva a corroborar la hipótesis que se plantea. En primer lugar se observan las cabezas de las vigas del forjado superior del muro norte del bloque Sur en el encuentro con Oeste.

En segundo lugar se observa el corte de la armadura existente en el bloque Sur para enlace de la armadura nueva, esto se hace más relevante en la ruptura de la inscripción que encontramos en la carrera intermedia norte del Bloque Sur. Esta inscripción además nos indica la fecha de construcción de esta zona [6].



Figura 4. Detalle de la inscripción en la carrera intermedia.(Izda)Detalle de las cabezas del forjado (dcha). Elaboración propia.

En tercer lugar la ejecución de las uniones varía de un cuerpo a otro. En el cuerpo sur la unión que se presenta es la de empalme a media madera, diferenciándose del empalme en pico de flauta u oblicuo en el cuerpo oeste.

4.3.Análisis estructural

Para realizar la comprobación estructural mediante cálculos, se toma como base madera de pino silvestre con una clase resistente C22 para considerar los valores característicos [7].Se considera una sección rectangular, se han realizado las comprobaciones pertinentes en ambas tipologías, par e hilera y cercha a la española [8]. Verificando como en ambas tipologías se resisten las cargas planteadas con las escuadrías existentes. Se confirma que mientras las escuadrías existentes en la tipología par el hilera son suficientes y aproximadas a las resultantes de los cálculos, las escuadrías de la cercha a la española está sobredimensionada.

5. Conclusiones

La primera conclusión es que se evidencia en este bajocubierta el desarrollo de las tipologías en el tiempo. La tipología de par e hilera de la zona sur, se corresponde con la técnica constructiva más empleada en un primer momento siendo más tardío el desarrollo o empleo de la cercha a la española utilizada en la zona Oeste. Esto apoya la hipótesis presentada.

En segundo lugar se comprueba que las cuestiones económicas o circunstanciales implican el uso de los elementos de material disponibles tanto como las técnicas. Esto se pone de relieve viendo distintas secciones en los pares de la cubierta, así como un elemento de apoyo intermedio de una carrera en vez de un nudillo como solución a la flexión de los pares. La primera zona construida, bloque Sur, estuvo dotada de mayores recursos que la segunda, bloque Oeste.

Por último podemos concluir también que se evidencia mediante un análisis estructural, como la tipología par e hilera es más rentable debido a que con menor empleo material consigue resistir las mismas cargas que la cercha española. Esta segunda tipología emplea escuadrías mayores que en la comprobación estructural se comprueban que están sobredimensionadas. Se considera que este pudo ser el motivo por el cual en el bloque Oeste hubo un cambio de tipología volviendo a la de par e hilera en la zona más alejada de la intersección con el bloque Sur.

Referencias

- [1] Cabrera González, B. (2021): Proyecto Intervención Arqueológica. Convento Nuestra Señora de Gracia (Ávila) Proyecto de rehabilitación, reforma y obra nueva en Convento Nuestra Señora de Gracia.
- [2] Gómez Moreno, M. (1900) Catálogo Monumental de España. Provincia de Ávila. 1900 a 1901 (ejemplar manuscrito en 1901).
- [3] Benito Pradillo, M^o Á.; García Palomo, L.C. (2020): Proyecto básico de rehabilitación, reforma y obra nueva en el Convento de Ntra. Sra. De Gracia para uso religioso, residencia, dependencias culturales y salón de actos en calle Cuesta de Gracia, nº4 (Ávila). COAAV nº reg: 20200264
- [4] Fernández Cabo, M.C. (1991): Armaduras de cubierta en la región leonesa: bases documentales y criterios para el análisis, clasificación y evolución de las tipologías estructurales de la cubierta en la región leonesa. Tesis (Doctoral). Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. p. 117.
- [5] Nuere, E. 2010. Dibujo, geometría y carpinteros en la arquitectura. Real Academia de Bellas Artes de San Fernando (Madrid).
- [6] Moreno Blanco, R. (2023) El Monasterio de Nuestra Señora de Gracia en Ávila: Nuevos Hallazgos en Pueblos y Culturas de la Prehistoria a la actualidad. Nº 115 de la colección Conocimiento Contemporáneo, pp. 744-775.
- [7] Carabaña Lozano, S. (2021): Estructuras históricas de madera: Armaduras de cubierta. Caso práctico: Convento Nuestra Señora de Gracia en Ávila. Trabajo de Fin de Grado. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid.
- [8] Argüelles, R.; Arriaga, F.; Esteban, M.; Iñiguez-González, G.; Argüelles, R.A. (2013) Estructuras de madera. Bases de cálculo. AITIM. Madrid. 570 p.

1099

HUT – INDOOR CLIMBING CENTRE, SKIEN, NORWAY

Kathleen Overton¹

¹ Degree of Freedom

Palabras clave / Palavras-chave:

Cross-laminated timber, Portal, Rib slab, Screws

Resumen / Resumo:

HUT, Høyt Under Taket, is an indoor climbing centre in Skien, Norway designed by Degree of Freedom in collaboration with the architect Snøhetta. The building combines a single-storey climbing hall, with a maximum clear height of 14.6m, and a three-storey annex. The architectural concept is based on a variable series of 12.5m wide timber portals forming the signature element of this building, the climbing hall. All structural members above ground level are timber, principally cross-laminated timber (CLT). CLT is also used both for the climbing hall façades and for the load bearing walls of the three-storey annex building. Glued laminated timbers are used as framing elements in the glazed façades at either end of the climbing hall, as part of the CLT rib slabs, and as long span beams supporting the annex roof. Structural analysis has been performed using a finite element model that models the CLT panels as shells and uses link elements to model the connection stiffnesses. Timber-to timber connections are principally realized using timber screws. All timber elements have been fabricated using a LOD400 BIM model fully coordinated with all other disciplines during the design process.

1. Introduction

HUT Skien is a signature building for the indoor activity centre Høyt Under Taket (High under the Roof), located in Skien, Norway. The load bearing structure is 100% timber above ground level. The project was developed in close collaboration with Snøhetta, Betonmast and Degree of Freedom. From the start there was a high level of ambition regarding both sustainability and innovation in timber construction. This paper is a case study describing how the architectural concept has been translated into a structural frame that reflects the original architectural vision. The timber structure was erected early in 2022 and the building was opened to the public in late 2022. The finished building can be seen in Figure 1.



Figure 1. HUT Skien – Finished building

2. Architectural concept

The building, named ‘Portal’ at its inception, was conceived by the architects as a low threshold entrance portal to provide access to indoor climbing for all skill levels. The result is a 1,500 m² climbing centre with a focus on activity and inclusion for the local community.

The aim was to have a recognizable profile, with internal activity visible from the outside through large glass façades. These large glass surfaces bring natural light into the building and provide extra airiness and connection to nature complemented by the extensive use of exposed timber surfaces throughout. Timber was chosen early in the concept design phase as the main material for both structural and architectural purposes. A key feature of the building are the frames, or portals, with a changing geometry as you move through the space. The starting architectural geometry is shown in Figure 2. At concept design phase the construction of these portals as cross-laminated, CLT, elements was proposed and evaluated to ensure that an adequate lateral stiffness could be achieved.



Figure 2. Portal concept geometry

3. Structural system

The building is divided into two parts, the climbing hall and the annex each with a different structural system. The climbing hall has a series of CLT portals as vertical load bearing elements. Portals are spaced at 6m centres generally, and with a single 9m end span. Portal height steps from 11m up to 14.5m. The portals are clad with CLT panels to provide out of plane stability with the portals having an in-plane stiffness to act as moment frames. The portals support the roof which is a combination of CLT slabs and CLT rib slabs. The rib slab is used for the single span where portals are separated 9m. Figure 3 shows an overview of the climbing frame structure once erected on site.

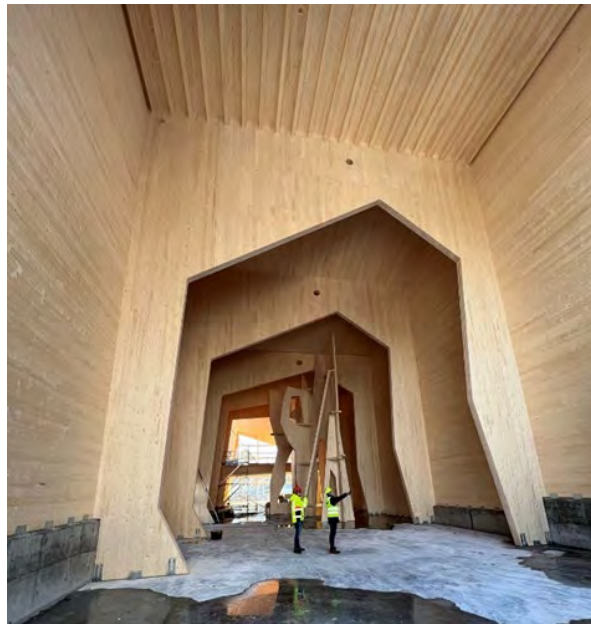


Figure 3. Climbing Hall structure.

Different thicknesses and build-up of CLT slabs are used in the building ranging from three-layer 100mm CLT panels as part of the roof CLT rib slab to seven-layer 240mm thick CLT panels for the tallest portal frames. Glulam elements are typically GL24h but with GL28h for the ribs of the CLT rib slab. The building contains 62m³ of glulam elements and 627m³ of CLT panels in total, of which 130m³ are in the portal frames. Structural analysis was carried out using a full 3D finite element model in SAP2000, shown in Figure 4. This model allowed for both ULS and SLS design of the CLT panels, and for the design of the connections.

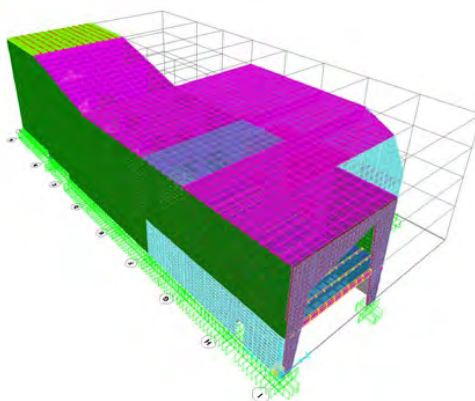


Figure 4. Finite element model – 3D view.

Verifications for the CLT panels were carried out for the Ultimate Limit State, the Serviceability Limit State and the fire design situation. For the 240mm thick CLT portal frames the horizontal displacement for the envelope of characteristic SLS load combinations is shown in Figure 5.

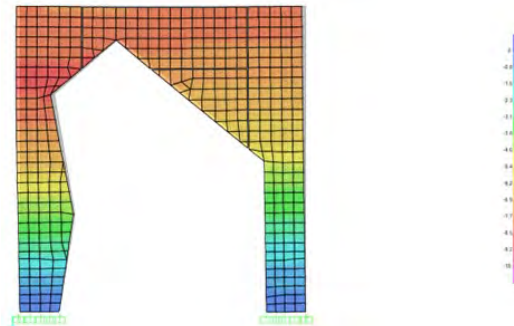


Figure 5. SLS verifications for 240mm CLT portal.

4. Building information modelling

From the initial concept phase through to the construction phase information was shared and coordinated between disciplines using BIM. Degree of Freedom produced the LOD400 model in Tekla as the basis for the timber fabrication model.

5. Construction

A combination of LOD400 production models for off-site fabrication, and the site-handling of lighter timber parts, facilitated a rapid erection process on site, despite the adverse weather conditions of the Norwegian winter. Total time for timber erection was five weeks. The use of timber elements also led to less environmental impact on and around the construction site with a reduced number of deliveries and a faster and cleaner construction method with significantly less noise.

6. Conclusions

This project successfully demonstrates how timber has been used to realise the original architectural vision whilst providing both a cost-effective design and a rapid site erection procedure. The load bearing structure has become multi-functional as it also forms part of the building finishes. The use of timber has given a solid, durable, natural and sustainable solution to this singular building.

Acknowledgement

This project has been realised in collaboration with the client, Høyt Under Taket, the architect, Snøhetta and the Contractors, Betonmast

Additional photographs by Kai-Otta Melau/Høyt & Lavt.

1100

IGLESIAS CON BÓVEDAS DE MADERA EN EL PAÍS VASCO: UNIDADES DE MEDIDA Y SU RELACIÓN CON LAS ESTRUCTURAS NAVALES DEL SIGLO XVI

Teresa Artola-guijarro¹; Alejandro Martínez De Arbulo²

¹ GPAC, UPV/EHU;

² Prof asistente Instituto Tecnológico Kyoto, Japon

Palabras clave / Palavras-chave:

Bóveda de madera, Patrimonio construido en madera, Arquitectura vasca, Carpintería de armar

Resumen / Resumo:

En CIMAD 11, Pedro Hurtado-Valdez nos presentó una interesante ponencia acerca de los mitos y verdades de la construcción de bóvedas de madera castellanas entre los siglos XVII y XVIII, intentando desmontar la creencia de que la génesis de las bóvedas de madera en España y en Hispanoamérica tuvo sus antecedentes en la construcción de navíos en las regiones vascas, y en la experiencia naval de algunos tratadistas de los siglos precedentes.

Un estudio más profundo acerca de la geometría de la estructura de las cubiertas de madera de las iglesias vascas de los siglos XV-XVI catalogadas en *Ars Ligneá* en 1996 por Alberto Santana y otros autores, era una tarea pendiente que desde aquella publicación apenas se había abordado.

En este artículo queremos presentar nuestras conclusiones acerca de la veracidad de esta hipótesis mediante la comparación del codo de ribera, medida estándar utilizada en la construcción de las naves desde 1590 en adelante, y las dimensiones de los pares curvos que forman las bóvedas de cañón de cuatro iglesias analizadas a través del laser escaner ubicadas en los valles del Gorbea: Santa Maria de Goikuria, San Bartolomé de Olarte, San Pedro de Zaloa y San Lorenzo de Ozeramendi.

1104

INFERÊNCIA DE PROPRIEDADES FLORESTAIS UTILIZANDO MÉTODOS NÃO DESTRUTIVOS E APRENDIZADO DE MÁQUINA

Rafael Mansini Lorensani¹; Stella Stopa Assis Palma¹; Raquel Gonçalves²

¹ Valora Madeira

³ FEAGRI/UNICAMP

Palabras clave / Palavras-chave:

Densidade básica, Florestas plantadas, Ultrassom, Resistência a perfuração

Resumen / Resumo:

Inferir propriedades de interesse de ativos florestais é uma ferramenta de vital importância para indústrias de transformação da madeira, uma vez que permite ações de acompanhamento desses ativos e possibilita a gestão otimizada dos recursos. A utilização de ensaios não destrutivos como uma ferramenta para inferir propriedades da madeira é um tema recorrente no campo científico, e os métodos de análise desses dados tem passado por revoluções, com o advento de algoritmos de aprendizado de máquinas. Nesse projeto, foram avaliadas 492 árvores de eucalipto, plantados no estado de São Paulo/Brasil, com idades variando de 3 a 7 anos e os dados coletados a partir de inventário florestal e medições com equipamentos não destrutivos foram analisados por meio de 5 algoritmos de aprendizado de máquina, com o objetivo de selecionar o melhor modelo de predição da densidade básica das árvores. O modelo com as melhores métricas de avaliação (R^2 e RMSE) foi o obtido através de Random Forest, com coeficiente de determinação de 81% e RMSE de 12,9 kgm⁻³.

1. Introdução

A determinação de propriedades das árvores ainda na floresta tem sido tema recorrente nas publicações internacionais, sendo as técnicas não destrutivas a alternativa viável para esse desafio, pois ao não afetar o material possibilita que seja repetido durante o crescimento do indivíduo arbóreo; pode ser realizado diretamente na árvore em pé e, por não ser necessária a retirada de amostras ou o corte de árvores, é mais econômico, simples e rápido, permitindo aumentar a amostragem.

A inferência de propriedades de interesse da madeira, seja ela destinada à produção de papel e celulose, seja ela destinada à produção de peças estruturais de madeira ou peças engenheiradas é de suma importância e quanto mais cedo essa inferência ocorrer, melhor para a gestão das empresas.

Assim, diversos grupos vêm desenvolvendo pesquisas utilizando variadas técnicas não destrutivas voltadas à inferência de propriedades, tais como a densidade (básica ou aparente) e a rigidez da madeira [1-12]. Esses métodos não destrutivos abrangem os que se utilizam de propagação

de ondas (ultrassom e ondas de tensão), de resistência a perfuração, de resistência a penetração, de espectrometria de massa, entre outros. Independentemente do tipo de equipamento ou da técnica utilizada, o foco das pesquisas é correlacionar os parâmetros mensurados nas árvores com propriedades da madeira, sendo a modelagem estatística a ferramenta normalmente utilizada para a obtenção da relação entre as variáveis para prever os resultados.

A capacidade de trabalhar com bancos de dados imensos e a possibilidade de conseguir generalizações, antes impossíveis quando se trata da estatística clássica, permitiu que um grande número de pesquisadores utilizasse as técnicas de aprendizado de máquina para a determinação do volume de madeira produzida por florestas plantadas e na inferência da densidade [13-18]. Porém, é consenso na área que para que a ferramenta se torne confiável para estimar propriedades da madeira, são necessários estudos com diferentes espécies e avaliações de mais variáveis e suas combinações.

O objetivo dessa pesquisa foi avaliar modelos de inferência da densidade básica de clones de eucalipto obtidos a partir de algoritmos de aprendizado de máquina.

2. Metodologia

Foram ensaiadas 492 árvores, com idades variando de 3 a 7 anos de idade, no estado de São Paulo/Brasil, cedidas pela empresa parceira. Durante as inspeções florestais foi realizado um inventário convencional, para coleta de informações de interesse da empresa parceira e foram realizadas medições em algumas árvores utilizando um equipamento de ultrassom (USLab, Valora Madeira, Brasil), pylodin, resistência a perfuração (IML, Alemanha), impacto esclerométrico (Schmidt, Suíça), amostradas por trado de incremento (Haglöf, Suécia) e de cada horto 3 árvores foram cubadas e sua densidade básica determinada pelo laboratório da empresa parceira. Além dos dados obtidos em um inventário clássico, foram também obtidos a velocidade de propagação longitudinal e radial nas árvores em pé, o impacto esclerométrico, a resistência a perfuração e a resistência a penetração do pylodin.

Os dados foram então avaliados pelos algoritmos de aprendizado de máquina: (KNN, Decision Tree, Random Forest, Gradient Boosting e Extreme Gradient Boosting), de forma a identificar quais variáveis possuíam maior relevância para explicar o fenômeno, por meio de algoritmos de seleção de atributos. Com as variáveis selecionadas foram definidas a variável alvo (densidade básica) e as variáveis preditoras, que foram então normalizadas.

Cada algoritmo de aprendizado de máquina passou por uma otimização de hiperparâmetros, que nada mais são do que parâmetros que controlam o comportamento dos algoritmos, de modo a evitar o sobreajuste ou enviesamento dos modelos. Durante a fase de treinamento dos modelos, o banco de dados foi dividido na proporção 80/20 e foi realizada a validação cruzada, que utiliza diferentes porções do banco de dados para treinar o algoritmo. Após a fase de treinamento, os algoritmos foram confrontados com o banco de dados de teste para gerarem as métricas de avaliação.

3. Resultados

A base de dados inicial que compunha as informações do inventário florestal possuía 18 variáveis (Tabela 1), compostas por variáveis numéricas e variáveis descritivas. Após a utilização de algoritmos de seleção de atributos as variáveis com maior relevância para a descrição da variável alvo foram definidas e estão marcadas na tabela 1 com um asterisco. Cada um dos modelos foi então avaliado de acordo com o coeficiente de determinação ajustado e pela raiz quadrada do erro médio (RMSE) (Tabela 2).

Tabela 1. Variáveis avaliadas por aprendizado de máquina.

Variável	Descrição
ID	Identificação
P	wParcela
Macro	Macroregião da parcela
Matgen	Material genético
Esp	Espaçamento [m x m]
Idade*	Idade [anos]
H/DAP*	Esbeltez [m/cm]
VL*	Velocidade longitudinal [m/s]
VR	Velocidade radial [m/s]
IE	Impacto esclerométrico [%]
Py	Penetração agulha [mm]
RP*	Resistência a perfuração [%]
Db	Densidade básica (tubetes) [g.cm ⁻³]
Db _{su}	Densidade básica laboratório [g.cm ⁻³]
VITCC	Volume individual da árvore [m ³]
VITCCR	Volume da unidade produtiva [m ³]
IMATCC*	Incremento médio anual [m ³ /ha.ano]

Tabela 2. Métrica de avaliação dos modelos após a aplicação do conjunto de treino.

Modelo	R ² aj	RMSE
KNN	53%	20,4
Decision Tree	78%	13,9
Random Forest	81%	12,9
Gradient Boosting	79%	13,6
Extreme Gradient Boosting	77%	14,4

Além do coeficiente de determinação e do RMSE, foram também avaliados os gráficos das respostas observadas versus as respostas ajustadas, bem como a dispersão dos resíduos, de forma a avaliar a qualidade dos ajustes e presença ou ausência de enviesamento (Figura 1).

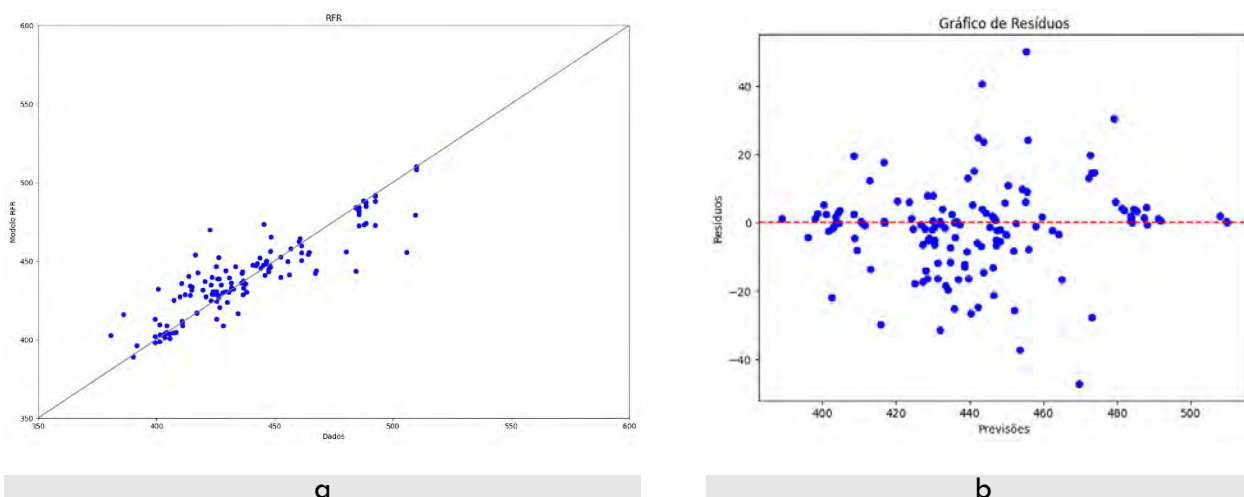


Figura 1. Gráfico observados versus previstos do algoritmo Random Forest (a) e Gráfico de dispersão dos resíduos do algoritmo Random Forest (b)

4. Conclusões

A utilização de métodos não destrutivos, aliados à metodologias de avaliação de dados baseados em aprendizado de máquina demonstra a viabilidade dessa técnica e a alta capacidade de generalização do método de análise, possibilitando novas formas de avaliação dos dados florestais.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer à empresa parceira, por apoiar a logística, por ceder o material genético e informações sobre os clones de eucalipto utilizados nessa pesquisa, e ao Laboratório de Ensaios Não Destrutivos da Universidade de Campinas pelo apoio nos ensaios florestais e laboratoriais.

References

- [1] Gendvilas, V. et al. Friction correction when predicting wood basic density using drilling resistance. *Holzforschung*, v. 75, n. 6, p. 508–516, 1 jun. 2021.
- [2] Nickolas, H. et al. Application of resistance drilling to genetic studies of growth, wood basic density and bark thickness in *Eucalyptus globulus*. *Australian Forestry*, v. 83, n. 3, p. 172–179, 2 jul. 2020.
- [3] Gonçalves, R. et al. Evolution of acoustical, geometrical, physical, and mechanical parameters from seedling to cutting age in *Eucalyptus* clones used in the pulp and paper industries in Brazil. *Forest Products Journal*, v. 69, n. 1, p. 5–16, 2019.

- [4] De Pádua, F. A. et al. Recommendation of non-destructive sampling method for density estimation of the Eucalyptus wood. *Maderas: Ciencia y Tecnología*, v. 21, n. 4, 2019.
- [5] Kharrat, W. et al. Intra-ringwood density and dynamic modulus of elasticity profiles for black spruce and jack pine from X-ray densitometry and ultrasonicwave velocity measurement. *Forests*, v. 10, n. 7, 1 jul. 2019.
- [6] Liu, F. et al. Use of time-of-flight ultrasound to measure wave speed in poplar seedlings. *Forests*, v. 10, n. 8, 2019.
- [7] Gonçalves, R. et al. Modeling of wood properties from parameters obtained in nursery seedlings. *Canadian Journal of Forest Research*, v. 48, n. 6, p. 621–628, 2018.
- [8] Downes, G. M. et al. Application of the IML Resistograph to the infield assessment of basic density in plantation eucalypts. *Australian Forestry*, v. 81, n. 3, p. 177–185, 3 jul. 2018.
- [9] Fundova, I.; FUNDA, T.; Wu, H. X. Non-destructive wood density assessment of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) using Resistograph and Pilodyn. *PLoS ONE*, v. 13, n. 9, 1 set. 2018.
- [10] Carrillo, I.; Valenzuela, S.; Elissetche, J. P. Comparative evaluation of Eucalyptus globulus and E. nitens wood and fibre quality. *IAWA Journal*, v. 38, n. 1, p. 105–116, 2017.
- [11] Soriano, J.; Da Veiga, N. S.; martins, I. Z. Wood density estimation using the sclerometric method. *European Journal of Wood and Wood Products*, v. 73, n. 6, p. 753–758, 1 nov. 2015.
- [12] Sandoz, J. L. Standing Tree Quality Assessments Using Ultrasound. *Acta Horticulturae*, n. 496, p. 269–278, set. 1999.
- [13] Aragão, M. De A.; Santos, J. S.; Da Silva, M. L. Marques. Técnica de mineração de dados aplicada a estimação de volume de árvores de eucalyptus. 5a Semana de Engenharia Florestal da Bahia. *Anais...Vitória da Conquista*: mar. 2018.
- [14] Lima, E.S. et al. Classificação do desenvolvimento inicial do eucalipto utilizando técnicas de mineração de dados. *Cerne*, v. 23, n. 2, p. 201–208, 2017.
- [15] CORDEIRO, M. A. et al. Estimativa do volume de Acacia mangium utilizando técnicas de redes neurais artificiais e máquinas vetor de suporte. *Pesquisa Florestal Brasileira*, v.35, n.86, p. 255-261, 2015.
- [16] Binoti, M. L. M. S. et al. Redes neurais artificiais para estimação do volume de árvores. *Revista Árvore*, Viçosa, MG, v.38, n.2, p. 283-288, 2014.
- [17] Demertzis, K. et al. Machine learning use in predicting interior spruce wood density utilizing progeny test information. *Neural Computing and Applications*, v. 28, n. 3, p. 505–519, 1 mar. 2017.
- [18] Iliadis, L.; Mansfield, S. D.; Avramidis, S.; El-Kassaby, Y. A. Predicting Douglas-fir wood density by artificial neural networks (ANN) based on progeny testing information. *Holzforschung* v. 67, n.7, p. 771-777, 2013.

1105

INFLUENCE OF THE USE OF UNDERUTILISED TREE AND SHRUB SPECIES ON FORMALDEHYDE EMISSIONS FROM PARTICLEBOARD

Tamara Coello-García¹; Eduardo Bordallo¹; Irene Mediavilla²; Werner Gerwin³; Steffi Schillem³; Ciprian Palaghianu⁴; Luis Saúl Esteban²

¹ CESEFOR

² CEDER-CIEMAT

³ Brandenburg Univ. of Technology Cottbus-Senftenberg

⁴ Universitatea Ștefan cel Mare

Palabras clave / Palavras-chave:

Wood extractives, Flask method, Perforator method, Lignin, Acetyl groups, PH

Resumen / Resumo:

The demand for wood for use in construction will multiply in the coming years with the emergence of new European policies pushing for a more carbon-efficient sector, but wood prices are increasing and availability is periodically threatened by different factors such as bark beetle outbreaks, climatic events and spruce decline. It becomes necessary to incorporate new wood species into engineered wood-based products to supply the industry, which is especially appealing in products such as particleboard, with less stringent requirements than other wood products in terms raw materials' quality. However, there is scarce knowledge on 1) how the introduction of new species affects formaldehyde emissions from boards (one of the main industry's sticking points), and 2) what is the role of the wood's main components (cellulose, hemicellulose, acetyl groups, lignin, extractives) in these emissions. Within the scope of the BeonNAT project, we manufactured particleboards from ten different tree & shrub species from Germany, Romania and Spain, we evaluated their formaldehyde emissions (EN-717-3) and we compared them with the emissions from particleboard made with the biomass used in a manufacturing plant. Besides, we explored the relationship between formaldehyde emissions and the biomass main components. Most of the boards made from the species under study produced less emissions than the boards from industrial biomass ($F(12,26)=15.02$, $p<0.05$), suggesting that all of them could be introduced as raw material without entailing an increase of formaldehyde emissions. Besides, we found a strong correlation ($p<0.01$) between wood extractives (%) and formaldehyde emissions.

1. Introduction

Formaldehyde (HCOH) emission is one of the main challenges of the wood-based panels industry. Current emission limit for low formaldehyde wood-based panels is ≤ 8 mg HCOH/ 100 g of dry board (measured using the "perforator method" UNE-EN ISO 12460-5), and will be reduced by half as of 2026[1]. At the same time, there is a growing interest in the industry to introduce alternative woody

biomass resources to face wood's increasing demand and prices as well as low availability, but there is scarce information on how the introduction of these alternative species will affect formaldehyde emissions from particleboards. While there is a deep understanding on the influence of process parameters and environmental variables on emissions, there is little information on the influence of the main components of the wood (cellulose, hemicellulose, acetyl groups, lignin, extractives and ash). It has been proposed that some wood extractives can act as HCOH scavengers by reacting with the HCOH from the adhesive[2], but this has not been investigated across a wide range of species. In the context of the BeonNAT project, and from the perspective of the cascade use of materials in a biorefinery approach where several underutilised tree & shrub species are grown and used for the manufacturing of different products (e.g., essential oils, herbal extracts), we have: 1) Produced particleboards from ten different species from different origins (twelve samples), measured their HCOH emissions and compared them with the emissions from boards manufactured with biomass used by a particleboard manufacturer; and 2) Investigated the relationship between HCOH emissions from the boards and the biomass main components.

2. Methodology

2.1. Biomass processing and characterization

Lignocellulosic biomass from three different origins (*Ulmus pumila*, *Cistus ladanifer*, *Juniperus communis* and *Rosmarinus officinalis* from Spain, *Rubus fruticosus*, *Cytisus scoparius*, *Betula pendula* and *Robinia pseudoacacia* from Germany; and *Robinia pseudoacacia*, *Betula pendula*, *Populus nigra* and *Carpinus betulus* from Romania) (Table 1) was harvested and processed as follows: all samples were first crushed (20 mm); next, the samples of *C. ladanifer*, *J. communis* and *R. officinalis* were steam distilled to produce essential oils; next, all samples (extracted and non-extracted) were sieved and blowed, and the coarse fraction from sieving (with a higher proportion of wood without bark) was milled (8 mm) and blowed again to remove dust. The remaining fraction was analysed in terms of moisture content, particle size and geometry, bulk and basic density, pH and bark content, and used for particleboard manufacturing. On the other hand, samples were also characterized in terms of cellulose, hemicellulose, acetyl groups, lignin and extractives in water and ethanol, and ash.

2.2. Particleboard manufacturing

Triplicate particleboards from each species were manufactured. Biomass particles were dried at 65 °C overnight to ensure a moisture content of 2-4% and blended in a paddle mixer to reach an adhesive load of 8% on a solid adhesive to oven dry wood basis. The adhesive mix consisted of 76% commercial urea-formaldehyde resin, 8% NH_4NO_3 as hardener, 8% paraffin and 9% water according to the typical resin addition levels[3]. 1.5 kg of resinated particles were used to manually produce one-layer particleboards using a 415 x 415 x 12 mm mould and then hot-pressed (2.5 MPa, 200 °C, 5 min). Upon conditioning for 6-7 days, the particleboards were sanded to a 10 mm thickness. Next, 25 x 25 x 10 mm test pieces were produced to measure HCOH emissions. The time elapsed between panel cutting and HCOH emissions measuring was always <72 h. For the sake of comparison, we asked for a sample of biomass from an industrial particleboard manufacturer (SAMPLE I.P., 75% recycled wood, 25% pine wood) and we followed the same procedure.

2.3. Formaldehyde emissions analysis

Formaldehyde emissions were measured following the standard method EN-717-3, “the flask method”. Triplicate 20 g of board samples were suspended on top of 50 ml of distilled water in closed bottles and incubated at 40°C for three hours, and formaldehyde was determined using the acetylacetone method. Results are expressed in g of HCOH per kg of dry board. While this method is widely adopted by research institutions because of its convenience and low cost, no official limits are published for it, so in order to know if the boards met the ≤ 8 mg HCOH/100 g of dry board limit, we established a comparison between the flask method and the perforator method (UNE-EN ISO 12460-5). Thus, a new set of triplicate particleboards per species were manufactured and measured with both methods. The measurement with the perforator method were outsourced to an industrial partner. Briefly, HCOH was extracted by boiling the test pieces in toluene at 110 °C for 2h, then extracted to water and detected photometrically with the acetylacetone method. Results are expressed in g of HCOH per 100 g of dry board and is corrected for a moisture content of 6.5%.

2.4. Statistical analysis

Data were analysed using RStudio. Variables and relationships between them were first inspected using boxplots, qqplots and scatterplots. One-way independent ANOVA was used to assess if particleboard manufactured from the studied species emitted less HCOH than particleboard manufactured with biomass from a particleboard manufacturer.

3. Results

3.1. Formaldehyde emissions

Measured formaldehyde emissions ranged between 19.80 and 50.20 g HCOH/ kg of dry board across samples (Figure 1).

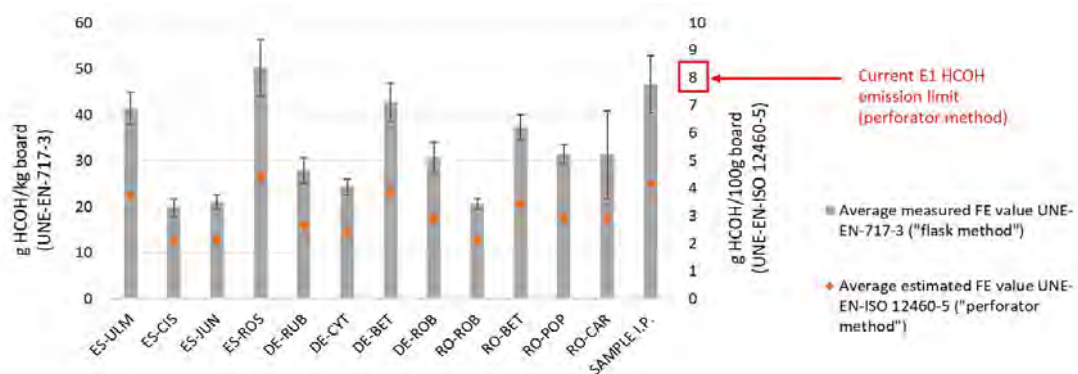


Figure 1. Formaldehyde emissions from particleboards from biomass samples of underutilized tree & shrub species.

Most of the boards from the species under study emitted significantly less formaldehyde (ANOVA, $F(12,26) = 15.02$, $p < 0.05$) than the boards made of woodchips from the industrial manufacturer. Only the emissions from the boards from *U. pumila*, *R. officinalis*, the German sample of *B. pendula* and

C. betulus were not significantly different from the one from the industrial partner's biomass. This suggests that, in principle, all the species studied could be used as raw material for particleboard manufacturing without entailing an increase of formaldehyde emissions, and that, for the same manufacturing conditions and adhesive mix, the use of some of the studied species could actually reduce them. Besides, we used the correlation equation we obtained from comparing the flask method and the perforator method (1):

$$Fv_{\text{perforator method}} = 0.079 Fv_{\text{flask method}} + 0.49 \quad (1)$$

($R^2=0.8596$), where *Fv perforator method* is the estimated value for HCOH emissions according to UNE-EN ISO 12460-5 (g of HCOH/100 g of dry board) and *Fv flask method* is the measured value for HCOH emissions using EN-717-3 (g of HCOH/kg of dry board), to estimate HCOH emissions for the perforator method, and we found that they would be well under the current E1 limit in all cases.

3.2. Formaldehyde emissions and biomass main components

Formaldehyde emission from wood-based panels is a complicated process which can be affected by factors related to the materials, the environment and the manufacturing process[4]. The presence of moisture in particleboard made with amino resins is directly related to HCOH emissions, since water molecules can break the methylene bridges formed between urea and HCOH during adhesive curing [5]. However, there is not much information on the influence of the wood main components on HCOH emissions from particleboard. We found a weak correlation between the board moisture content and HCOH emissions (Pearson coefficient, $r = 0.49$, $p < 0.01$). This means that board moisture content accounted for 24% of the variability in formaldehyde emissions ($R^2 = 0.24$) and suggests that there must be other variables that account for the remaining variability. Therefore, as an exploratory work, we carried on looking for associations between the wood composition (Table 1), and we found a moderate positive association between the % of lignin and HCOH emissions ($R^2=0.47$, $p<0.05$), a moderate positive association between the % of acetyl groups and HCOH emissions ($R^2=0.60$, $p<0.05$), a moderate negative association between pH and FE ($R^2=0.52$, $p<0.05$) and a strong negative association between the % of extractives and FE emissions ($R^2=0.69$, $p<0.01$). These results agree with previous research [6], [7] and suggest that the role of wood composition, especially extractives, on reducing formaldehyde emissions from particleboard made with amino resins should not be overlooked.

Table 1. Main components characterization of the biomass samples.

	Species	Sample code	Glucans	Hemicellulose		Acetyl Groups	Total Lignin	Total Extractives	Ash
				Xylan	A+G+M*				
Spain	<i>U. pumila</i>	ES-ULP	35.2 (0.9)	13.6 (0.3)	5.5 (0.0)	5.3 (0.0)	26.2 (0.9)	6.4 (0.8)	2.7 (0.2)
	<i>C. ladanifer</i>	ES-CIS	23.6 (0.1)	16.4 (0.1)	4.8 (0.1)	4.8 (0.0)	24.5 (0.3)	19.4 (0.2)	3.9 (0.2)
	<i>J. communis</i>	ES-JUN	26.9 (0.4)	5.6 (0.0)	11.3 (0.4)	2.0 (0.1)	27.6 (0.8)	21.4 (1.0)	2.0 (0.0)
	<i>R. officinalis</i>	ES-ROS	26.9 (1.1)	17.1 (0.7)	5.3 (0.1)	4.5 (0.2)	31.2 (0.2)	9.6 (0.4)	1.9 (0.1)
Germany	<i>R. fruticosus</i>	DE-RUB	31.9 (0.8)	15.8 (0.5)	5.1 (0.1)	5.0 (0.1)	25.0 (0.0)	9.5 (0.5)	3.3 (0.3)
	<i>C. scoparius</i>	DE-CYT	29.6 (0.6)	16.2 (0.0)	4.4 (0.8)	4.7 (0.1)	24.3 (0.2)	12.1 (0.1)	1.4 (0.1)
	<i>B. pendula</i>	DE-BET	26.4 (0.2)	20.1 (0.0)	4.6 (0.0)	6.1 (0.0)	29.9 (0.0)	7.9 (0.4)	1.4 (0.0)
	<i>R. pseudoacacia</i>	DE-ROB	35.7 (1.7)	14.1 (0.6)	4.4 (0.1)	5.1 (0.0)	24.4 (0.4)	10.7 (0.3)	2.7 (0.1)
Romania	<i>R. pseudoacacia</i>	RO-ROB	32.2 (0.5)	13.1 (0.1)	4.9 (0.2)	4.3 (0.0)	24.1 (0.4)	15.8 (0.3)	3.1 (0.2)
	<i>B. pendula</i>	RO-BET	29.5 (0.4)	18.6 (0.2)	4.8 (0.0)	5.6 (0.2)	30.4 (0.1)	9.4 (0.2)	1.6 (0.2)
	<i>P. nigra</i>	RO-POP	33.7 (0.3)	12.7 (0.2)	5.7 (0.0)	4.1 (0.2)	24.9 (1.0)	14.9 (0.7)	3.9 (0.1)
	<i>C. betulus</i>	RO-CAR	35.9 (0.8)	23.5 (0.7)	4.1 (0.1)	7.0 (0.0)	25.8 (0.3)	5.8 (0.3)	1.6 (0.0)

4. Conclusions

The introduction of alternative under-utilized tree & shrub species can be a tool to lower formaldehyde emissions of particleboard manufactured with amino resins. Our results, besides, support the idea that some wood extractives might be acting as formaldehyde scavengers by reacting with the free HCOH in particleboard.

Acknowledgement

This research has received funding from the Bio Based Industries Joint Undertaking (JU) under grant agreement No 887917 BeonNAT. The JU receives support from the European Union's Horizon 2020 research & innovation programme and the Bio Based Industries Consortium.



References

- [1] E. Comision, EUR-Lex - 32023R1464, amending Annex XVII to Regulation (EC) No 1907/2006 of the European Parliament and of the Council as regards formaldehyde and formaldehyde releasers. 2023.
- [2] E. Roffael, "Significance of wood extractives for wood bonding," Appl. Microbiol. Biotechnol., vol.100, no.4, pp. 1589–1596, Feb. 2016.
- [3] H. Thoemen, M. Irle, M. S.-A. I. for Specialists, and undefined 2010, "Wood-based panels," academia.edu.
- [4] J. Zhang, F. Song, J. Tao, Z. Zhang, and S. Q. Shi, "Research Progress on Formaldehyde Emission of Wood-Based Panel," Int. J. Polym. Sci., vol. 2018, 2018.
- [5] C. Frihart, J. Wescott, ... T. C.-F. P., and undefined 2012, "Formaldehyde emissions from urea-formaldehyde—and no-added-formaldehyde—bonded particleboard as influenced by temperature and relative humidity," meridian.allenpress.com, 2012.
- [6] U. Buyuksari, N. Ayrimis, E. Avci, and E. Koc, "Evaluation of the physical, mechanical properties and formaldehyde emission of particleboard manufactured from waste stone pine cones," Bioresour. Technol., vol. 101, no. 1, pp. 255–259, Jan. 2010.
- [7] J. Liang, J. Wu, and J. Xu, "Low-formaldehyde emission composite particleboard manufactured from waste chestnut bur," J. Wood Sci., vol. 67, no. 1, Dec. 2021.

1107

INFLUENCIA DE LA ESPECIE Y CALIDAD EN LA VELOCIDAD DE CARBONIZACIÓN EN MADERA DE RÁPIDO CRECIMIENTO

Daniel Godoy Machado¹; Luis Gallardi Favilla¹; Víctor Rosales Garcés²; Leandro Domenech¹; Juan José Fontana¹; Bruna Muniz¹; Vanesa Baño³

¹ Universidad de la Republica

² Pontificia Universidad Católica de Chile

³ InnovaWood

Palabras clave / Palavras-chave:

Estructuras, Pinus elliottii/taeda, Eucalyptus grandis, Eurocódigo 5, Uruguay

Resumen / Resumo:

Uno de los aspectos centrales en el diseño de estructuras es su comportamiento en una situación de incendio. En el caso de la construcción con madera este aspecto toma mayor relevancia al tratarse de un material combustible. En el caso del Uruguay no existe un código de diseño nacional de estructuras de madera, sino que se siguen las recomendaciones del Eurocódigo 5 europeo. En dicho código los valores de velocidad de carbonización están determinados en función de la especie (coníferas o frondosas) y la densidad. El objetivo del trabajo es determinar de manera experimental la velocidad de carbonización de especies de rápido crecimiento plantadas localmente, verificando si el valor obtenido resulta compatible con los valores del Eurocódigo. Los resultados mostraron la velocidad de carbonización para las especies de *Pinus elliottii/taeda* y *Eucalyptus grandis* fueron mayores que las propuestas por el Eurocódigo 5 para coníferas y frondosas con densidades entre 290 y 450 Kg/m³, respectivamente. Realizar un diseño estructural tomando los valores recomendados por el Eurocódigo no está dentro de la seguridad en el caso de estas especies.

1. Introducción

La construcción con madera en Uruguay es todavía un fenómeno reciente. Las primeras plantaciones en el país datan de la década del 90, y las primeras normas de clasificación estructural de las especies plantadas, del año 2018 [1, 2]. Sin embargo, la construcción con madera está alcanzando un relevante impulso en el país debido, entre otros motivos, a la formación de ingenieros y arquitectos en las universidades, la puesta en producción de la primera planta de producción de madera laminada encolada (GLT) y madera contralaminada (CLT), y las políticas públicas de fomento del uso de madera en construcción como respuesta al cambio climático.

Actualmente no existe un código de diseño nacional de estructuras de madera, sino que se siguen las recomendaciones del Eurocódigo 5 (EC 5) europeo [3], con los factores de modificación y requerimientos propuestos para las especies europeas. Aunque existe un primer borrador de un documento que actuaría como el “Anexo Nacional al Eurocódigo 5” (AN) para Uruguay, este todavía no ha sido presentado para su aprobación por el Instituto Uruguayo de Normas Técnicas (UNIT). Esto se debe, entre otros factores, a que todavía no se ha realizado investigación suficiente para definir todos los coeficientes o requisitos que el EC 5 deja a libertad de los AN.

Entre los temas que preocupan a los diseñadores de las primeras edificaciones con madera de procedencia nacional, principalmente en edificación en altura, están los requisitos de resistencia a fuego. El EC 5 establece unos valores de velocidad de carbonización (β_0) para especies coníferas (0,65 mm/min) y frondosas en función de su valor de densidad (0,65 mm/min para densidades entre 290 y 450 Kg/m³ y 0,5 mm/min para densidades mayores a 450 Kg/m³). Dado que tanto el pino como el eucalipto de Uruguay son especies de rápido crecimiento (19-24 m³/ha año), surge la duda de si los valores de β_0 recomendados por el EC5 son apropiados y están del lado de la seguridad a la hora de diseñar con estas especies.

Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo es determinar la influencia de la especie y la calidad de la madera en la velocidad de carbonización del pino (*P. elliottii/taeda*) y el eucalipto (*E. grandis*), y verificar cómo afecta al diseño estructural, contrastando los valores obtenidos de forma experimental con los indicados en el EC5.

2. Material y metodología

2.1. Material

Se analizaron dos tipos de madera comercial de eucalipto (*stud* para comercialización interna principalmente como pies derechos para estructuras de entramado ligero y *export* para exportación) y cuatro calidades de pino de acuerdo con las normas de clasificación y con las medidas detalladas en la Tabla 1. Los valores de contenido de humedad de las muestras variaron entre 10,2 y 13,7 %.

Tabla 1. Calidades y dimensiones de las probetas de ensayo

Especie	n	N	Tipo	Calidad	Clasificación	b (mm)	h (mm)	L (mm)
Eucalipto	30	60	Stud	EF1	UNIT 1262 [2]	39	89	390
	30		Export	EF1	UNIT 1262 [2]	35	120	
Pino	10	40	EC0	EC0	UNIT 1261 [1]	38	145	
	10		C14	EC1	UNIT 1261 [1]	35	145	
	10		C22	C22	EN 14081-2* [4]	50	150	
	10		C24	C24	EN 14081-2* [4]	50	200	

* Clasificación mecánica en línea instalados en planta industrial (aprobado por CEN TC 124 WG2 TG1)

2.2. Determinación de la velocidad de carbonización

Se realizaron ensayos de determinación de la velocidad de carbonización en un horno calefaccionado eléctricamente, siguiendo la curva tiempo-temperatura establecida en la Norma ISO 834-1 [5]. En el porta muestras se colocaron las piezas de madera separadas por una manta de fibra cerámica con el fin de reducir el redondeo de carbonización, tal y como se muestra en la Figura 1. Después de una exposición al fuego durante 45 minutos, y terminado el ensayo, se midió la profundidad de carbonización.



Figura 1. Configuración de las probetas de ensayo y de evaluación de resultados

3. Resultados y discusión

3.1. Velocidad de carbonización por especie

La velocidad de carbonización en la madera de pino ($\beta_0=0,78$ mm/min) resultó un 18,2% mayor que la de eucalipto ($\beta_0=0,66$ mm/min). En un análisis de la totalidad de las muestras por especie, tanto los valores de la madera de eucalipto (con valor de densidad $\rho_k=372$ Kg/m³) como de pino (con valor de densidad $\rho_k=412$ Kg/m³) superaron los propuestos por el EC 5 para coníferas y para frondosas.

Estas diferencias con respecto a los valores del EC5 se observaron por otros autores en otras especies de rápido crecimiento, como el pino radiata de chileno ($\beta_0=0,95$ mm/min, $\rho_m=370$ Kg/m³) [6], el álamo de Chile ($\beta_0=1,08$ mm/min, $\rho_m=340$ Kg/m³) [7], o el eucalipto grandis de Brasil ($\beta_0=0,58$ mm/min, $\rho_m=640$ Kg/m³) [8].

3.2. Influencia de la calidad en la velocidad de carbonización

El elevado valor del coeficiente de variación en la velocidad de carbonización de la madera de eucalipto llevó a pensar que la calidad de la madera podría estar afectando la velocidad de carbonización. Con el fin realizar esta evaluación, se realizó un análisis de la velocidad de carbonización de ambas especies discriminando por tipo o calidad de madera.

El valor de la velocidad de carbonización de la madera de eucalipto comercializada como *stud* ($\beta_0=0,75$ mm/min, $\rho_{05}=365$ Kg/m³) resultó ser un 31,6% más alta que la madera clasificada como *export* ($\beta_0=0,57$ mm/min, $\rho_{05}=524$ Kg/m³). Esta diferencia en velocidad de carbonización entre las dos calidades fue observada también en los valores de densidad, menor en el *stud*. Sin embargo, la actual norma de clasificación estructural de la madera de eucalipto (UNIT 1262) sólo establece una única calidad, por lo que parece de interés su revisión para incluir más calidades. Esto se ve alineado con los resultados observados en la calidad de la madera de eucalipto de exportación utilizada en la construcción del MACA [9], con valores de densidad entre 475 y 485 Kg/m³.

En la madera de pino, el valor de la velocidad de carbonización resultó mayor a medida que disminuía la calidad y también la densidad: C24 ($\beta_0=0,67$ mm/min, $\rho_{05}=493$ Kg/m³); C22 ($\beta_0=0,74$ mm/min, $\rho_{05}=451$ Kg/m³); C14 ($\beta_0=0,80$ mm/min, $\rho_{05}=416$ Kg/m³); y EC0 ($\beta_0=0,91$ mm/min, $\rho_{05}=406$ Kg/m³). Sin embargo, no se observó una tendencia lineal entre la velocidad de carbonización y la densidad, posiblemente debido al reducido número de muestras analizado o a que otros factores diferentes a la densidad afecten a la velocidad de carbonización.

4. Conclusiones

La velocidad de carbonización para las especies de *Pinus elliottii/taeda* y *Eucalyptus grandis* fueron mayores que las propuestas por el Eurocódigo 5 para coníferas y frondosas con densidades entre 290 y 450 Kg/m³, respectivamente, al igual que otras especies de rápido crecimiento en Sudamérica reportada en otros trabajos. Aplicar los valores del EC5 redundaría en un diseño estructural con estas especies que no está del lado de la seguridad.

No se encontró una relación lineal entre los valores de velocidad de carbonización y densidad para ambas especies. Sin embargo, se observó una velocidad de carbonización mayor en calidades estructurales más bajas. Estos resultados pueden ser debidos a otras características asociadas a las calidades bajas de madera. Por esto, se plantea la necesidad de realizar más ensayos y de medir otras características o propiedades de la madera, como pueden ser la anchura de anillos de crecimiento, porosidad, permeabilidad al aire, el módulo de elasticidad u otros, con el fin de analizar su relación con la velocidad de carbonización.

En la madera de eucalipto, la madera clasificada para exportación resultó en valores de velocidad de carbonización más similares a los propuestos por el Eurocódigo 5 que la madera clasificada para comercialización interna. En la madera de pino, la clase resistente C24 aportó valores de velocidad de carbonización muy próximos a los propuestos por el Eurocódigo.

A falta de un mayor número de ensayos, se podría pensar que estas dos especies de rápido crecimiento presentan un comportamiento frente al fuego que no está previsto en los valores de velocidad de carbonización propuestos por el Eurocódigo.

Agradecimientos

Este trabajo es parte de los resultados del proyecto de investigación “Resistencia estructural al fuego de madera aserrada y de productos de ingeniería de madera uruguayos”. Financiado por la Comisión Sectorial de Investigación Científica (CSIC), Universidad de la República, Uruguay. También se agradece al proyecto ANID BASAL FB210015 por la colaboración científica mediante el apoyo de uno de sus investigadores.

Referencias

- [1] UNIT 1261:2018. Madera aserrada de uso estructural. Clasificación visual. Madera de pino taeda y pino ellioti (*Pinus taeda* y *Pinus elliotii*), (2018). Instituto Uruguayo de Normas Técnicas.
- [2] UNIT 1262: 2018. Madera aserrada de uso estructural. Clasificación visual. Madera de eucalipto (*Eucalyptus grandis*), Instituto Uruguayo de Normas Técnicas.
- [3] EN 1995-1-2: Eurocódigo 5: Proyecto de estructuras de madera. Parte 1-2: Reglas generales. Proyecto de estructuras sometidas al fuego.
- [4] UNE-EN 14081-2:2019+A1:2023. Estructuras de madera. Madera estructural con sección transversal rectangular clasificada por su resistencia. Parte 2: Clasificación mecánica. Requisitos complementarios para los ensayos de tipo.
- [5] ISO 834-1:1999 Fire-resistance tests Elements of building construction. Part 1: General requirements
- [6] Rosales, V. et al. (2019) Resistencia al fuego en elementos muro y losa de CLT fabricados con Pino radiata en Chile. 4° Congreso Latinoamericano de estructuras en madera, Montevideo, Uruguay
- [7] Wagner, M. (2018) Comportamiento al fuego de elementos constructivos de madera. Diseño contra incendios, IDIEM, Universidad de Chile
- [8] Pinto, Edna Moura (2005). Determinação de um modelo pra taxa de carbonização transversal a grã para a madeira de *E. citriodora* e *E. grandis* / Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos/Instituto de Física de São Carlos/Instituto de Química de São Carlos-Universidade de São Paulo, 2005.
- [9], Baño V., Domenech L., Mazzei C, Vieillard T, Journot J.B. (2023). Hardwood glulam in complex structures: design and construction of the MACA museum in Uruguay. Proceedings of the World Conference on Timber Engineering 2023, Oslo

1108

INFLUENCIA DE LAS INTERVENCIONES EN VIVIENDAS DE MADERA CON PISOS VENTILADOS EN LA APARICIÓN DEL HONGO *SERPULA LACRYMANS*

Rodrigo Alejandro Espinoza Maldonado¹; Luis Ariel Bobadilla Moreno¹; Carlos Rubio Bellido²

¹ Universidad del Bío-Bío

² Universidad de Sevilla

Palabras clave / Palavras-chave:

Hongo de pudrición Serpula lacrymans, Viviendas de madera, Monitorización de variables ambientales, Pudrición parda en viviendas, Basidiomicetos en viviendas

Resumen / Resumo:

Serpula lacrymans es considerado el hongo más agresivo de su especie, y es causante de miles de pérdidas anuales en los edificios a nivel mundial. Las causas más probables de la aparición en edificaciones, son fundamentalmente producto de fuentes de humedades internas y/o externas, y su proliferación depende del contenido de humedad de los materiales, de las condiciones ambientales, y de la disposición de nutrientes. El objetivo de este estudio corresponde a la determinación de las causas de la aparición del hongo *Serpula lacrymans* en sector bajo piso ventilado de viviendas de madera de la ciudad de Valdivia, Chile. La metodología, se basa en el análisis y monitorización de las variables de temperatura del aire, humedad relativa, y niveles de ventilación bajo piso ventilado en 2 viviendas de madera; una afectada y otra que nunca ha manifestado presencia del hongo. Los resultados muestran que las alteraciones del diseño higrotérmico de viviendas de madera, producto de mejoramientos y ampliaciones, generaron ambientes propicios para la aparición del hongo de pudrición. Esta técnica puede ser aplicada como metodología experimental para determinar las condiciones ambientales de desarrollo del hongo, y/o utilizada en el campo de la diagnosis de falla para determinación de causas de origen higrotérmico en viviendas de madera existentes.

1. Introducción

El hongo *Serpula lacrymans*, pertenece al grupo de los basidiomicetos [1], es un hongo saprófito que ataca principalmente la celulosa y hemicelulosa de la madera [2]. Es el causante de la pudrición parda o cúbica de la madera, proporcionándole un color superficial más oscuro, con tonos parduzcos, y conforme progresa su acción destructiva, se agrieta de forma horizontal y vertical, formando paralelepípedos o cubos bien definidos [3]. La variante *lacrymans* es de distribución cosmopolita, y se ha registrado en edificaciones de clima templado de Asia, Australia, Nueva Zelanda, Europa y América del Norte y del Sur [4, 5]. Ataca preferentemente las maderas coníferas de los edificios, pero también maderas duras, y materiales lignocelulósicos, como placas de revestimientos, papel, textiles, y otros [6]. Es considerado el hongo de pudrición más agresivos en el ataque a las construcciones de madera a nivel mundial [7, 8], y es responsable de pérdidas millonarias en edificios de madera de EE.UU., norte y centro de Europa, Australia, Japón y otras regiones templadas [9].

En Chile, en el año 2004, se registró la primera aparición documentada del hongo *Serpula lacrymans* en viviendas de madera de la ciudad Temuco y Puerto Montt [10, 11]. En el año 2018 el Servicio de Vivienda y Urbanismo de la Región de Los Ríos, y el Servicio Agrícola Ganadero SAG, reportan la presencia y daños causados por el hongo de pudrición en un centenar de viviendas de madera con piso ventilado de la ciudad de Valdivia. A esa fecha se desconocen las causas de la aparición de este hongo.

Este artículo tiene por finalidad el estudio de las causas de la aparición del hongo *Serpula lacrymans* en sector bajo piso ventilado de viviendas de madera ubicadas en la ciudad de Valdivia, Chile, y se basa en la aplicación de una metodología experimental de monitorización y determinación de variables ambientales de temperatura del aire, humedad relativa, y renovaciones de aire por hora.

2. Metodología

Para el desarrollo de esta investigación, se utilizaron técnicas experimentales de monitorización y determinación de variables ambientales. Se midieron simultáneamente las variables interiores y exteriores de temperatura del aire, humedad relativa, y los caudales de ventilación en espacios bajo piso ventilado de las viviendas. Se estudió 1 vivienda afectada por el hongo *S. lacrymans*, y 1 vivienda control (referencia comparativa), que nunca había manifestado presencia de este hongo. A continuación, se explica la metodología empleada:

2.1. Monitorización y determinaciones

La monitorización de variable ambientales, fue realizada simultáneamente, en ambas viviendas, entre el 04 al 10 de noviembre 2019. La determinación de las tasas de ventilación de las 2 viviendas, se realizó el día 28 de noviembre de 2019.

Las variables interiores de humedad relativa, y temperatura del aire, se midieron cada 10 minutos, durante un periodo de 7 días. Se utilizó un kit de sensores adquisidores de datos digitales, marca HOBO UX120-006M de 4 canales, que midieron humedad relativa ambiental en porcentaje (%), y temperaturas del aire en grados Celsius (°C). Las variables exteriores de humedad relativa (%) y temperatura del aire (°C), se recogieron mediante una estación meteorológica marca Davis 6163 Vantage Pro 2 Plus.

La determinación de caudales de ventilación natural bajo piso ventilado, se realizó midiendo presiones de aire (Pa) con un tubo Pitot digital normalizado, de tipo deprimógeno, marca Minneapolis modelo DG-1000. A partir de dichas mediciones y conociendo las propiedades del aire y el área de las aberturas, se calculó la velocidad, el caudal y las renovaciones. Los datos se recogieron cada 15 segundos durante un periodo de una hora.

2.2. Viviendas evaluadas

Se inspeccionaron 9 viviendas de madera con piso ventilado, 7 viviendas con presencia activa del hongo *S. lacrymans*, y 2 viviendas que nunca habían manifestado presencia de este hongo. Para este estudio, se analizaron 2 viviendas, una con problemas y una sin problema, ambas del mismo tipo, orientación, edad, y ubicadas en el mismo sector, diferenciadas únicamente en el área de abertura de las troneras de ventilación bajo piso, y la solución de piso. Para la selección, se utilizó un muestreo por conveniencia, no probabilístico, debido principalmente a la disponibilidad de los propietarios.

Las viviendas originalmente estaban estructuradas en base a madera de pino radiata y vigas de piso de raulí, revestidos por un entablado de piso. La vivienda 1, sin problemas, conservaba aun el entablado de

piso, y sus elementos de ventilación (troneras) originales. La vivienda 2 afectada por el hongo de pudrición, modificó su solución de piso original, por una solución térmica tipo sándwich con terminación de piso flotante, y mantuvo sólo una de las troneras de ventilación en servicio, la otra se encontraba obstruida (*Figura 1*).

Vivienda 1 sin signos de hongos bajo piso,
calle Lago Llanquihue N°3030, Valdivia

Vivienda 2 con signos de hongos bajo piso,
calle Lago Malleco N°570, Valdivia



Figura 1: Ensayo in situ para determinar tasas de renovación de aire bajo piso. Vivienda 1 sin signos de hongos bajo piso, y Vivienda 2 con signos de hongos bajo piso

3. Resultados

3.1. Humedades relativas

En la vivienda 1 (testigo), sin presencia de hongos, la humedad no superó el 90% y su promedio alcanzó 85% de humedad relativa. En la vivienda 2, con presencia extendida del hongo, la humedad ambiental se mantuvo 100% del periodo semanal sobre el 90% (*Figura 2*), niveles que se consideran óptimos para el desarrollo del hongo [12].

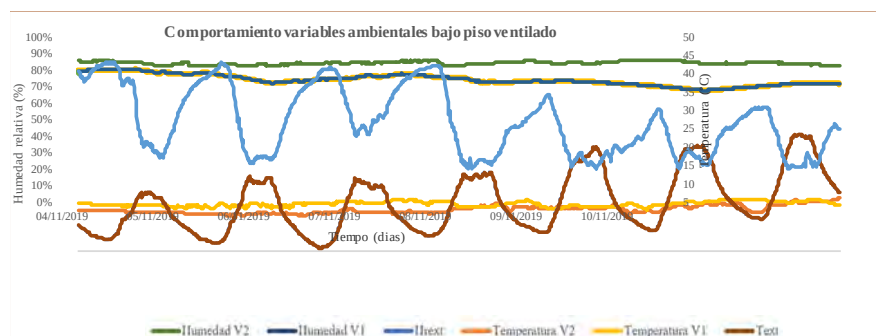


Figura 2: Comportamiento de la humedad relativa y temperatura ambiental bajo piso

3.2. Temperaturas ambientales

Respecto a las temperaturas, se observa que la vivienda 1, alcanzó temperaturas promedio de 15,4°C, mínima de 14,2°C y máxima de 16°C, mientras que la vivienda 2, presentó una temperatura promedio de 14,2°C, mínima de 12,2°C, y máxima de 16,6°C (Figura 2). Ambas viviendas presentan temperaturas por debajo del óptimo de crecimiento del hongo [13], pero, aun así, se encuentran dentro de los rangos de crecimiento del micelio, es decir entre 3°C y 26°C [14, 15].

3.3. Ventilación bajo piso

La medición arrojó que la tasa de ventilación para la vivienda 1, fue en promedio de 1,035 (1/h), con una máxima de 3,145 (1/h), y mínima de 0,000 (1/h), mientras que para la vivienda 2 el promedio fue de 0,364 (1/h), máxima de 1,454 (1/h), y una mínima de 0,000 (1/h). La vivienda 1 presenta más del doble de la capacidad de ventilación que la 2, aun cuando la velocidad media del viento exterior de la vivienda 1, fue menor que la vivienda 2 (Tabla 1).

Tabla 1: Caudales y tasas de renovación de aire bajo piso. Determinaciones cada 15 segundos, durante 60 minutos

Descripción	Viv.1 sin signos de hongos bajo piso de calle Lago Llanquihue N°3030 Tronera 1: Diámetro 75mm, Dirección N-O Tronera 2: Diámetro 71mm, Dirección Sur	Viv.2 Con signos de hongos bajo piso de calle Lago Malleco N°570 Tronera 1: Diámetro 75mm, Dirección Sur Tronera 2: Tapada
Frecuencia de Tasa de Ventilación (1/h)		
Tasa Promedio (1/h)	1,035	0,364
Tasa Máxima (1/h)	3,145	1,454
Tasa Mínima (1/h)	0,000	0,000
Valores característicos tiempo local durante el periodo examinado		
Periodo	Entre las 14.30 y 15:30 de 28-10-2019	Entre las 13.30 y 14:30 de 28-10-2019
Vel. M. Viento (m/s)	0,3	2,3
Dir. Predominante	NE (29%), N (27%), NO (43%), otros (1%)	NE (57%), SE (20%), SO (9%), E (4%), otros (10%)

4. Conclusiones

Los resultados muestran que la vivienda 2, afectada por la presencia activa del hongo *Serpula lacrymans*, presentó durante todo el periodo, humedades relativas por sobre el 90%, y niveles de ventilación promedio por debajo del 0,5 (1/h), condiciones óptimas para desarrollo de este hongo. Las intervenciones realizadas en los pisos ventilados de las viviendas, modificaron su capacidad de ventilación, y por consiguiente su comportamiento higrotérmico, generando las condiciones ideales para el desarrollo del hongo *S. lacrymans*. Esta metodología puede ser aplicada en el campo de la diagnosis de falla para éste u otros hongos de pudrición. Finalmente, como futuros trabajos, se propone la elaboración de criterios de diseño higrotérmicos en viviendas de madera para la no ocurrencia de hongos de pudrición.

Referencias

- [1] Gabriel, J., & Švec, K. (2017). Occurrence of indoor wood decay basidiomycetes in Europe. *Fungal Biology Reviews*, 31(4), 212-217.
- [2] Balasundaram, S. V., Hess, J., Durling, M. B., Moody, S. C., Thorbek, L., Progida, C., LaButti, K., Aerts, A., Barry, K., Grigoriev, I.-V., Boddy, L., Högborg, N., Kauserud, H., Eastwood, D.C. & Skrede, I. (2018). The fungus that came in from the cold: dry rot's pre-adapted ability to invade buildings. *The ISME journal*, 12(3), 791-801.
- [3] Gadd, G., Watkinson, S. C., & Dyer, P. S. (Eds.). (2007). *Fungi in the Environment* (Vol. 25). Cambridge University Press.
- [4] Hallenberg N, Eriksson J. 1985. The Lachnocladiaceae and Coniophoraceae of north Europe. Oslo, Norway: Fungiflora.
- [5] White TJ, Bruns T, Lee S, Taylor J. 1990. Amplification and direct sequencing of fungal ribosomal RNA genes for phylogenetics. In: Innis MA, Gelfand DH, Sninsky JJ, White TJ, eds. *PCR protocols, a guide to methods and applications*. San Diego, California: Academic Press. p 315–322.
- [6] Brownlee, C., & Jennings, D. H. (1982). Long distance translocation in *Serpula lacrymans*: velocity estimates and the continuous monitoring of induced perturbations. *Transactions of the British Mycological Society*, 79(1), 143-148.
- [7] Schmidt, O. (2007). Indoor wood-decay basidiomycetes: damage, causal fungi, physiology, identification and characterization, prevention and control. *Mycological Progress*, 6(4), 261-279.
- [8] Steenkjær, A., Green, F., Clausen, C., and Jensen, B., (2005) 'Tolerance of *Serpula lacrymans* to copper-based wood preservatives', *International Biodeterioration and Biodegradation*, 56(3), pp. 173–177. doi: 10.1016/j.ibiod.2005.06.008.
- [9] Singh, J., Bech-Andersen, J., Elborne, S. A., Singh, S., Walker, B., & Goldie, F. (1993). The search for wild dry rot fungus (*Serpula lacrymans*) in the Himalayas. *Mycologist*, 7(3), 124-130.
- [10] Valenzuela, E. and Osorio, M. *Serpula lacrymans* a rot wood fungus. En: *XXI Congreso Sociedad Chilena de Fitopatología*, pag. 81. Puerto Varas – Chile 2012.
- [11] Briseño, E., Morales, R. (18 de octubre de 2019). *Serpula lacrymans*: el enemigo silencioso de las casas. <https://agrarias.uach.cl/serpula-lacrymans-el-enemigo-silencioso-de-las-casas/>
- [12] Palfreyman, J.W., White, N.A., Buultjens, T.E.J. and Glancy, H. The impact of current research on the treatment of infestations by the dry rot fungus *Serpula lacrymans*. *International Biodeterioration & Biodegradation*, Volume 35, Issue 4, 1995, Pages 369-395, ISSN 0964-8305, [https://doi.org/10.1016/0964-8305\(95\)00064-3](https://doi.org/10.1016/0964-8305(95)00064-3).
- [13] Segmüller, J., Wälchli, O. (1981). *Serpula lacrymans* (Schum. ex. Fr.) SF Gray. Some wood-destroying basidiomycetes. IRG/WP, Boroko, Papua New Guinea, 141-159.
- [14] Maurice, S., Coroller, L., Debaets, S., Vasseur, V., Le Floch, G., & Barbier, G. (2011). Modelling the effect of temperature, water activity and pH on the growth of *Serpula lacrymans*. *Journal of Applied Microbiology*, 111(6), 1436-1446.
- [15] Kauserud, H., Svegård, I. B., SÆTRE, G. P., Knudsen, H., Stensrud, Ø., Schmidt, O., ... & Högborg, N. (2007). Asian origin and rapid global spread of the destructive dry rot fungus *Serpula lacrymans*. *Molecular Ecology*, 16(16), 3350-3360.

1109

INFLUENCIA DEL CONTENIDO DE HUMEDAD EN LA MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD DE ONDA DE ULTRASONIDO EN *CUPRESSUS LUSITÁNICA* Y *TECTONA GRANDIS*

Viviana Paniagua Hernández¹; Cindy Torres Quirós¹; Beatriz González Rodrigo²

¹ Universidad de Costa Rica

² Universidad Politécnica de Madrid

Palabras clave / Palavras-chave:

Ciprés, Contenido de humedad, Factor de corrección, Teca, Técnicas no destructivas

Resumen / Resumo:

El ensayo de ultrasonido es considerado una técnica no destructiva (NDT) muy utilizado para evaluar el estado de las piezas de madera y la degradación de este material a lo largo del tiempo. La velocidad de la onda en el interior de la madera se ve influida por varios factores, el más importante el contenido de humedad (CH) del espécimen ensayado. Investigaciones previas muestran que los modelos que aproximan la velocidad de la onda a un CH estándar (12%) a partir de lecturas en piezas con diferente grado de humedad dependen de la especie de madera ensayada. El objetivo de este estudio es establecer un factor de corrección que permita aproximar la lectura de la velocidad de ultrasonido a la estándar cuando las probetas presentan diferentes porcentajes de humedad. Se trabajó con probetas libres de defectos de dos especies maderables comerciales costarricenses *Tectona grandis* L.F (teca) y *Cupressus lusitanica* M. (ciprés) verificando la velocidad durante la desorción desde el punto de saturación de la fibra (PSF) hasta el estado de secado al horno. El modelo propuesto y el factor de corrección para determinar velocidad del ultrasonido a la CH estándar fue contrastada con los disponibles en la literatura para coníferas y latifoliadas.

1. Introducción

Los ensayos de ultrasonidos constituyen uno de las técnicas no destructivas (NDT) ampliamente empleados para estimar las propiedades elásticas de la madera [1]. Este método utiliza la medición de la velocidad de onda y la densidad (ρ) de las piezas, para estimar el módulo de elasticidad dinámico (MOE_{din}), el cual presenta una correlación lineal lo suficientemente ajustada con el módulo estático [2]. Por consiguiente, este método NDT es una alternativa valiosa para la evaluación estructural. Los ensayos de ultrasonidos resultan especialmente atractivos en la inspección de elementos patrimoniales y el monitoreo de la degradación de diversos especímenes, dado que no requieren fallar la pieza analizada y, por lo tanto, pueden ser ensayadas a lo largo del tiempo [3]–[9].

La velocidad de la onda en el interior de la madera se ve influida por varios factores, siendo el contenido de humedad (CH) del espécimen ensayado el más significativo. Debido a esto, diversas investigaciones han obtenido factores de corrección empíricos para predecir la velocidad estándar (V_{12}) a partir de la velocidad obtenida en diferentes niveles de contenido de humedad (V_H). Estos factores varían en función de la especie ensayada [10], [11]

En las últimas décadas, en Costa Rica, se ha realizado un notable esfuerzo en aumentar el área maderable del país y promover el consumo de madera estructural procedente de plantaciones forestales [10]. Para lograr este propósito, se ha llevado a cabo numerosas investigaciones. Los ensayos de ultrasonidos se han empleado para determinar de la influencia del ambiente ácido volcánico en la degradación de la madera sometida a climas tropicales [11], ya que permiten evaluar una misma pieza en el tiempo. Esta investigación se realizó en la madera de *Tectona grandis* L.F (teca) y *Cupressus lusitanica* M. (ciprés), dos especies comúnmente utilizadas en la construcción en Costa Rica, procedentes de plantaciones locales. El objetivo de este estudio consiste en determinar los modelos y los factores de corrección de la velocidad de onda obtenida a distintos contenidos de humedad para estas dos especies maderables. Estos coeficientes permitirán comparar los resultados con un CH estándar.

2. Métodos

Esta investigación se llevó a cabo con 62 especímenes libres de defectos. Las muestras se suministraron en estado verde (recién cortadas), como madera de plantaciones obtenidas de aserraderos locales ubicados en La Rita, Guápiles, Limón, (teca) y Paso Llano, San José de la Montaña, Heredia (ciprés). Las edades de la plantación fueron 14 (teca) y 40 años (ciprés) respectivamente, debido a que representan la madurez con la que estas se comercializan localmente. Las dimensiones de los especímenes fueron 1x1x16" (25(b) x 25(h) x 410(l) mm, según ASTM-D143, 2014 [12]

Los especímenes fueron llevados al laboratorio con un CH superior al PSF, se secaron dentro de una cámara climatizada. La primera medida válida fue la lectura a $28\% \pm 1\%$ CH, porcentaje recomendado para ultrasonido por [13]. Los especímenes fueron sometidos al monitoreo sistemático durante las etapas de desorción desde el PSF hasta el 5% de CH. La densidad aparente ρ se calculó a partir del peso y el volumen a cada CH correspondiente. La velocidad de propagación de la onda longitudinal V_H de cada espécimen se midió repetidamente tres veces [8]. Se extrajo una muestra de 5 cm, cuya masa fue medida húmeda y seca [14], para obtener el CH real de las muestras en las diferentes etapas de prueba (%)

La velocidad ultrasónica V_H se midió con un equipo de ultrasonido portátil (Sylvatest duo-Lausanne, Suiza), midiendo el tiempo de vuelo (ToF) de la onda ultrasónica entre el transmisor y el receptor con una frecuencia de 54 kHz. Las mediciones se obtuvieron en la dirección longitudinal y con la posición de contacto directo, es decir con los transductores confrontados (en las testas) en el centro de la sección transversal.

Para este estudio la temperatura ambiente 20°C (fue el rango funcional del modelo) para no introducir esta variable en el modelo, ya que el espectro de frecuencia de la señal transmitida se ve ligeramente afectado por la temperatura [15]. El porcentaje de la variación de velocidad por cada 1% de variación de CH, V_H de la relación V_{12} que se presenta en la ecuación 1, a partir de investigaciones previas [16]–[20].

$$V/V_{12} = 1 + k_u (MC - 12)V_H/V_{12} = 1 + k_u (MC - 12) \quad (1)$$

donde V_{12} = velocidad al 12% de CH, V_H = velocidad obtenida en madera con CH por debajo de FSP, k_u = factores de ajuste para cada especie de madera.

3. Resultados y conclusión

La **Figura 1** muestra la relación entre CH y la velocidad del ultrasonido desde PSF hasta la condición de secado al horno para teca y ciprés, respectivamente. Se encontró que la velocidad del ultrasonido aumenta continuamente a medida que disminuye el CH ajustándose a un comportamiento lineal.

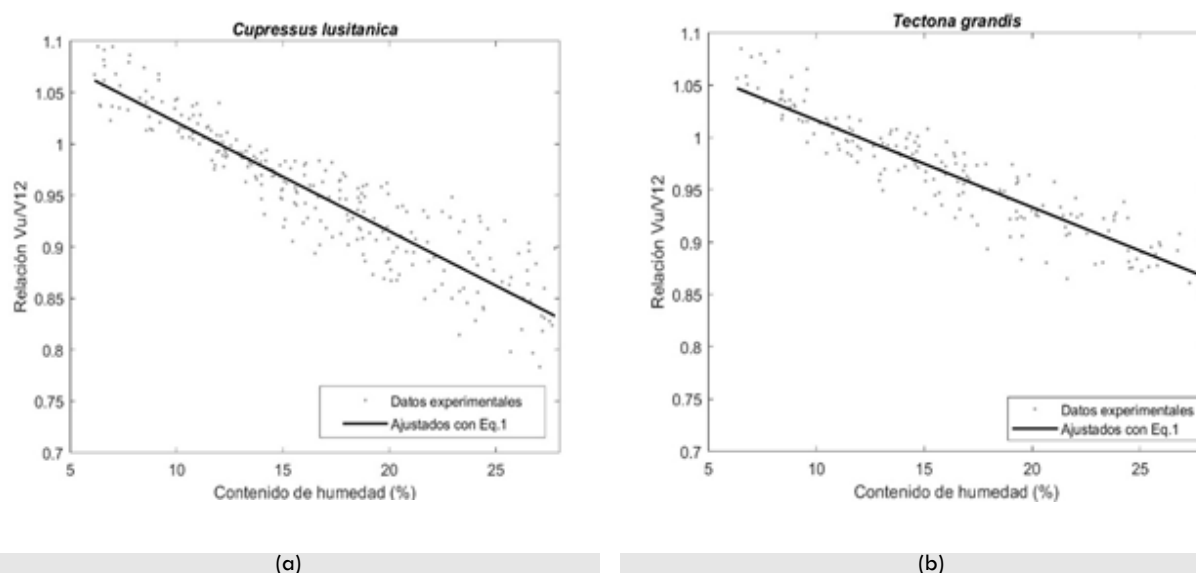


Figura 1. Correlación entre CH y medición de velocidad de ultrasonido V_H (5% -28%) en Ciprés (Figura 1a) y en Teca (Figura 1b)

La presente investigación proporciona una función de ajuste para comparar las propiedades mecánicas de la madera de teca y ciprés obtenidas en diferentes CH empleando mediciones de ultrasonido. El coeficiente de corrección obtenido es $k_u=0.0083$ para teca y $k_u=0.0106$ para ciprés (ecuación 1) con un coeficiente de determinación superior al 84% para ambas especies estudiadas.

Durante la desorción de PSF en la condición de secado al horno, la velocidad del ultrasonido en la dirección longitudinal se puede corregir, por cada 1% en CH en 43,9 m/s para teca y 50,5 m/s para ciprés. La influencia del CH sobre la velocidad del ultrasonido puede considerarse ligeramente superior para el ciprés (conífera) que para la teca (frondosas). Si bien la diferencia con el factor de ajuste propuesto es pequeña para ciprés (634,62 m/s), corresponde al 13,54% y teca (554,01 m/s) al 10,73%.

Los modelos obtenidos fueron comparados con los propuestos previamente por diversos investigadores para especies de coníferas y frondosas. La teca presenta un buen ajuste con el modelo *Corymbia citrodora* [20] y el ciprés con el propuesto para madera de pino español [21].

Referencias

- [1] E. A. Mascarenhas, A. R. P., de Melo, R. R., Pimenta, A. S., Stangerlin, D. M., de Oliveira Corrêa, F. L., Scotti, M. S. V., & de Oliveira Paula, "Ultrasound to estimate the physical-mechanical properties of tropical wood species grown in an agroforestry system," *Holzforschung*, vol. 75, 2020.
- [2] S. Chauhan and A. Sethy, "Differences in dynamic modulus of elasticity determined by three vibration methods and their relationship with static modulus of elasticity," *Maderas. Cienc. y Tecnol.*, vol. 18(2), pp. 373-382., 2016, doi: 10.4067/S0718-221X2016005000034.
- [3] M. Casado, L. Acuña, L. A. Basterra, G. Ramón-Cueto, and D. Vecilla, "Grading of structural timber of *Populus × euramericana* clone I-214," *Holzforschung*, vol. 66, no. 5, pp. 633-638, Jul. 2012, doi: 10.1515/HF-2011-0153.
- [4] T. Marhenke et al., "Modeling of delamination detection utilizing air-coupled ultrasound in wood-based composites," *NDT E Int.*, vol. 99, pp. 1-12, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.ndteint.2018.05.012.
- [5] J. Neuenschwander, S. J. Sanabria, P. Schuetz, R. Widmann, and M. Vogel, "Delamination detection in a 90-year-old glulam block with scanning dry point-contact ultrasound," *Holzforschung*, vol. 67, no. 8, pp. 949-957, Dec. 2013, doi: 10.1515/HF-2012-0202.
- [6] N. Sobue, "Simulation study on stress wave velocity in wood above fiber saturation point," *J. Japan Wood Res. Soc. (Japan)*, vol. 39(3), pp. 271-276., 1993.
- [7] S. Y. Wang, C. J. Lin, and C. M. Chiu, "The adjusted dynamic modulus of elasticity above the fiber saturation point in Taiwania plantation wood by ultrasonic-wave measurement," *Holzforschung*, vol. 57, no. 5, pp. 547-552, 2003, doi: 10.1515/HF.2003.081.
- [8] M. Yamasaki, C. Tsuzuki, Y. Sasaki, and Y. Onishi, "Influence of moisture content on estimating Young's modulus of full-scale timber using stress wave velocity," *J. Wood Sci.*, vol. 63, no. 3, pp. 225-235, Jun. 2017, doi: 10.1007/S10086-017-1624-5.
- [9] S. Y. C. Wang, "Experimental data correlation of the dynamic elastic moduli, velocity, and density of solid wood as a function of moisture content above the fiber saturation point," *Holzforschung*, vol. 54, pp. 309-314., 2000.
- [10] E. Moya-Roque, R., Muñoz-Acosta, F., Salas-Garita, C., Berrocal-Jiménez, A., Leandro-Zúñiga, L., & Esquivel-Segura, "Tecnología de madera de plantaciones forestales: Fichas técnicas," *Rev. For. Mesoam. Kurû*, vol. 7, pp. 18-19, 2010.
- [11] V. Paniagua-Hernández, C. Torres, B. González-Rodrigo, and Z. Sasa, "Methodology to analyze the degradation of structural timber in acidic atmospheres," in *World Conference of Timber Engineering on Timber Engineering*, 2021.
- [12] ASTM-D143, "ASTM-D143 Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber." ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2014.
- [13] H. Unterwieser and G. Schickhofer, "Influence of moisture content of wood on sound velocity and dynamic MOE of natural frequency- and ultrasonic runtime measurement," *Eur. J. Wood Wood Prod.*, vol. 69, no. 2, pp. 171-181, May 2011, doi: 10.1007/s00107-010-0417-y.
- [14] ASTM-D4442-16, "Standard Test Methods For Direct Moisture Content Measurement Of Wood And Wood-Based Materials." ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2016.

- [15] R. E. Kang, H., & Booker, "Variation of stress wave velocity with MC and temperature," *Wood Sci. Technol.*, vol. 36, no. 1, pp. 41–54, Feb. 2002, doi: 10.1007/s00226-001-0129-x.
- [16] R. Steiger, "Versuche an Fichten-Kanthölzern: Biegemoment- Normalkraft-Interaktion," Zürich, (Swiss), 1995.
- [17] J. L. Sandoz, "Moisture content and temperature effect on ultrasound timber grading," *Wood Sci. Technol.*, vol. 27, pp. 373–380, 1993.
- [18] H. Unterwieser and G. Schickhofer, "Influence of moisture content of wood on sound velocity and dynamic MOE of natural frequency- and ultrasonic runtime measurement," *Eur. J. Wood Wood Prod.*, vol. 69, no. 2, pp. 171–181, May 2011, doi: 10.1007/s00107-010-0417-y.
- [19] G. Arriaga, F. Llana, D. F., Esteban, M., & Íñiguez-González, "Influence of length and sensor positioning on acoustic time-of-flight (ToF) measurement in structural timber," *Holzforschung*, vol. 71(9), pp. 713-723., 2017, doi: <https://doi.org/10.1515/hf-2016-0214>.
- [20] R. Gonçalves, R. Lorensani, and C. B. Pedroso, "Moisture-related adjustment factor to obtain a reference ultrasonic velocity in structural lumber of plantation hardwood.," *Wood Mater. Sci. Eng.*, vol. 13, no. 5, pp. 254–261, Oct. 2017, doi: 10.1080/17480272.2017.1313312.
- [21] D. F. Llana, G. Íñiguez-González, M. Esteban, E. Hermoso, and F. Arriaga, "Timber moisture content adjustment factors for nondestructive testing (NDT): acoustic, vibration and probing techniques," *Holzforschung*, vol. 74, no. 9, pp. 817–827, 2020, doi: 10.1515/hf-2019-0187.

1111

INNOVACIÓN ACÚSTICA EN LA PROTECCIÓN DE PATRIMONIO DE MADERA: DETECCIÓN DE LARVAS DE *HYLOTRUPES BAJULUS* L. CON TECNOLOGÍA MEMS

Roberto D. Martínez López¹; Alberto Izquierdo Fuente¹; Juan José Villacorta Calvo¹; Lara Del Val Puente¹; Milagros Casado Sanz¹; Patricia Vallelado Cordobés¹; Alfonso Bastera Bastera¹

¹ Universidad de Valladolid

Palabras clave / Palavras-chave:

Array acústico, Carcoma gigante, Métodos no destructivos, Beamforming

Resumen / Resumo:

Este estudio aborda el problema global de la degradación de la madera estructural por insectos xilófagos, enfocándose en la detección y localización de las larvas de *Hylotrupes bajulus* L. Se desarrolló un sistema de detección acústica no invasivo, de bajo costo, basado en un array de micrófonos MEMS para identificar la presencia y localización de estas larvas en madera de pino. Este sistema integra un array acústico, un sistema de adquisición y pre-procesamiento basado en FPGA/procesador, y una aplicación de análisis y visualización en PC. El estudio utilizó larvas implantadas en piezas de madera de pino, donde se llevó a cabo una amplia recolección de datos acústicos. Se implementó un algoritmo especializado para procesar las señales acústicas y localizar las larvas. Los resultados indicaron que, aunque la presencia de anomalías en la madera como grietas y nudos puede afectar la precisión de localización, el sistema logró detectar y localizar las larvas dentro de la unidad mínima de tratamiento antixilófago. Este sistema representa un avance en el control de infestaciones de xilófagos, permitiendo tratamientos más selectivos y localizados.

1. Introducción

La degradación de la madera estructural por ataques de insectos xilófagos representa un problema global significativo. La madera, sensible a las leyes de supervivencia de la naturaleza, está particularmente expuesta a hongos y diversas especies de insectos bajo ciertas condiciones, generando costos económicos enormes a nivel mundial una vez que el ataque ha ocurrido. Entre estos, La carcoma gigante (*Hylotrupes bajulus* L.), es notable por sus larvas que habitan y se alimentan en maderas con bajo contenido de humedad. Estas larvas, que prefieren maderas coníferas, requieren de métodos de detección y tratamiento específicos.

Los sistemas de inspección visual tradicionales para detectar estas larvas se basan en la identificación de desechos, agujeros de salida y el sonido que producen al morder la madera, pero estos métodos pueden ser subjetivos. Por otro lado, las emisiones acústicas (AE) han sido utilizadas para identificar ataques

de insectos en madera, pero con limitaciones en cuanto a la colocación de sensores y la inactividad temporal de las larvas.

Este trabajo se centra en el desarrollo y la implementación de un sistema de detección acústica de bajo costo y sin contacto, utilizando un array de micrófonos MEMS. Este sistema no solo detecta la presencia de larvas activas, sino que también localiza su posición dentro de la madera. Su objetivo es controlar infestaciones, permitiendo tratamientos selectivos y localizados, y verificando su eficacia.

2. Material y métodos

2.1.Descripción del Sistema de Adquisición

El sistema de adquisición desarrollado se compone de tres elementos clave: primero, un array acústico formado por micrófonos MEMS (Sistemas Microelectromecánicos), diseñado para capturar de manera precisa las señales acústicas. El segundo componente es un sistema de adquisición y pre-procesamiento, basado en una plataforma FPGA/Procesador, que gestiona eficientemente los datos recogidos. Finalmente, se incluye una aplicación de análisis y visualización basada en PC, que facilita la interpretación y representación de los datos de forma comprensible y útil.

Este sistema destaca por la integración y coordinación efectiva entre sus componentes de hardware y software. La selección y diseño cuidadoso de cada elemento aseguran una solución robusta y precisa para la detección de actividades acústicas específicas. La flexibilidad del sistema permite su adaptación a una variedad de aplicaciones, abriendo nuevas posibilidades en el análisis acústico.

El título debe alinearse a la izquierda y redactarse en tamaño de fuente 14 pt, negrita y mayúsculas. Úsele interlineado simple y que no supere tres líneas de extensión.

2.2.Configuración de la Prueba

Para la configuración de la prueba, se seleccionaron seis larvas de *Hylotrupes bajulus* L., con un peso que oscila entre 0,22 y 0,35 gramos. Estas larvas fueron implantadas en cuatro piezas de madera de pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.), cada una con medidas de 90x140x1200 mm y acondicionada a un 12% de contenido de humedad. Las larvas procedían de madera demolida de edificios históricos en Valladolid, España.

Para la implantación, se perforó un orificio en el lado opuesto de cada pieza de madera, situando el extremo del orificio a 10 mm del lado de observación. Las larvas se colocaron en el interior de estos orificios, los cuales fueron sellados con papel de seda. Esta disposición permitió estudiar diversos fenómenos de propagación del sonido en la madera, como el efecto de borde, entre otros.

Una vez implantadas, se marcó la posición inicial de las larvas en las piezas de madera con una etiqueta amarilla. Posteriormente, las muestras de madera se montaron en un marco para facilitar su estudio simultáneo, lo que permitió simular la presencia de varias infestaciones al mismo tiempo. Las larvas se aclimataron durante 30 días antes de comenzar las pruebas de escucha.

2.3. Algoritmo de Procesamiento

Se implementa un algoritmo de procesamiento que se caracteriza por una secuencia de sub-algoritmos funcionales y especializados. Este diseño es esencial para la detección y localización precisa de larvas de *Hylotrupes bajulus* L. en la madera.

El proceso inicia con la captura de señales acústicas filtradas en el tiempo. Posteriormente, se analizan estas señales, con un enfoque particular en su espectro promedio. Cada fase del algoritmo ha sido desarrollada meticulosamente para asegurar la máxima precisión en la identificación de las señales acústicas emitidas por las larvas. Este método avanzado no solo facilita la detección de la presencia de las larvas, sino también la determinación de su ubicación exacta dentro de la madera, lo cual es fundamental para un tratamiento eficaz de la infestación.

3. Resultados

Durante un período de dos meses, se llevaron a cabo aproximadamente 2,5 millones de capturas acústicas, de las cuales 500.000 mostraron actividad de las larvas implantadas, representando el 2% del total de capturas. En este apartado, se analizan primero las imágenes acústicas obtenidas a partir del algoritmo descrito anteriormente. Posteriormente, se verifica el comportamiento de las larvas y la extensión de las galerías que excavaron durante el período de análisis.

Cabe destacar que la actividad de cada larva y sus movimientos fueron variables, lo que resultó en dispersiones distintas para cada una. Es importante señalar que el sonido producido por las larvas tiene mecanismos de propagación complejos. La madera, al no ser un medio homogéneo, y las galerías internas creadas por las larvas, implican que el sonido se genere en un punto y salga a la superficie de la viga por otro punto. Este último punto ha sido comprobado experimentalmente que está cerca de la posición interna donde se generó el sonido.

Además, la presencia de nudos y grietas en las vigas puede alterar el punto de salida del sonido. Por lo tanto, es evidente que los puntos de salida del sonido están próximos a la posición de las larvas, pero si existen desviaciones significativas de las fibras, nudos o grietas en las vigas, el sonido también puede salir por ellos. Se requiere una inspección visual para descartar una zona de emisión de sonido si hay una fenda o nudo cerca y así asegurar que las zonas detectadas identifiquen claramente la posición de las larvas dentro de ellas.

4. Conclusiones

Se ha desarrollado un sistema acústico no invasivo y de bajo coste basado en un array de micrófonos MEMS, sensible a las señales acústicas producidas por larvas de cerambícidos al alimentarse, que permite la detección y localización precisa de múltiples individuos dentro de piezas de madera de tamaño estructural. El estudio revela que anomalías en la madera, como grietas y nudos, pueden afectar la localización de las larvas, causando errores o divisiones en la localización. No obstante, el error se mantiene dentro del internudo de la madera, que se considera la unidad mínima para el tratamiento antixilófago.

5. Futuras líneas de investigación

Teniendo en cuenta que el crecimiento de las larvas no es lineal y su tamaño al eclosionar es tan pequeño que no pueden ser detectadas auditivamente, futuras investigaciones podrían centrarse en cómo el tamaño de la larva afecta la capacidad de detección del sistema o en definir el umbral de detección. Además, el estudio podría extenderse a la detección de patrones de alimentación y galerías de otros organismos xilófagos, como carcomas o termitas, y realizar pruebas de campo para evaluar su rendimiento fuera del laboratorio. A futuro, el sistema podría identificar el tipo específico de xilófago responsable del deterioro mediante el uso de aprendizaje automático o técnicas equivalentes basadas en la información temporal y de frecuencia de los eventos sonoros detectados, permitiendo tratamientos curativos más focalizados y localizados

Agradecimientos

Esta investigación fue financiada por la Junta de Castilla y León, cofinanciada por la Unión Europea a través del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) (ref. VA228P20).

Referencias

En la comunicación completa se aportarán las correspondientes citas bibliográficas y el listado de referencias.

1113

INSPECCIÓN Y PROPUESTA DE INTERVENCIÓN EN ESTRUCTURA DE MADERA DE CABANA DE TEITO PARA USO TURÍSTICO

Soledad Rodríguez¹; Covadonga Prendes¹; David Martínez²; Alberto Gonzalez³; Abel Vega¹

¹ Fundacion CETEMAS

² Grupo DEX

³ Alberto González Arquitecto

Palabras clave / Palavras-chave:

Rehabilitación, Patrimonio etnográfico, Láser escáner terrestre, Arquitectura sostenible, Turismo de experiencia

Resumen / Resumo:

El Plan de Sostenibilidad Turística (PST) del concejo asturiano de Somiedo contempla dentro de sus actuaciones la valorización de las “cabanas de teito”, importante elemento arquitectónico, etnográfico y cultural de la región, mediante un proyecto de desarrollo de turismo de experiencia. El proyecto piloto asociado a esta actuación contempla la intervención sobre una cabaña ubicada en la Braña de la Pornacal (Somiedo, Asturias), englobando dos fases principales: la inspección estructural y posterior rehabilitación y, en segundo lugar, la adecuación interior con el objetivo de adaptarlo a un uso ecoturístico. El objetivo final del proyecto es la puesta en marcha de un ecoturismo experiencial, que sirva de demostrador de un tipo de turismo sostenible en la región, además de favorecer la divulgación y la conservación de tan importante elemento etnográfico y patrimonial. La fase de inspección estructural fue planteada incluyendo un análisis visual para la estimación del estado de conservación de la madera, el levantamiento tridimensional de la estructura mediante láser escáner terrestre (TLS) y la comprobación mediante cálculo estructural.

1. Introducción

Las cabanas de teito de escoba (Parque Natural de Somiedo) surgen como medio necesario para el aprovechamiento de los pastos de diente en altura, siendo utilizadas como refugio tanto para el ganado como para el “*brañeiro*” que pastorea a los animales. La tipología de las cabanas obedece a unos estándares comunes: muros de carga de piedra sobre los que se sitúa una viga durmiente llamada “*palma*”, y en la que se apoyan las vigas, llamadas “*cabrios*”. Sobre los cabrios se sitúa un entramado de varas gruesas, en las que se van enlazando progresivamente capas de escoba (*Cytisus sp*) que hace la función de techumbre [1]. La progresiva desaparición de los modos de vida tradicionales, así como la complejidad y costo de las labores de mantenimiento de las cabanas ha supuesto la pérdida de numerosos de estos elementos de alto valor etnográfico durante las últimas décadas [2].

El Plan de Sostenibilidad Turística (PST) del concejo asturiano de Somiedo desarrolla en su “Eje 3: Planificación, gobernanza y gestión sostenible del turismo en Somiedo”, distintos tipos de actuaciones y líneas estratégicas que se concentran en los retos clave que debe abordar Somiedo para configurar un destino turístico sostenible. Desde el Ayuntamiento de Somiedo y dentro el Plan de Sostenibilidad Turística, conscientes del problema de pérdida de estos elementos etnográficos y de la urgente necesidad de actuación, se ha propuesto la creación de un producto ecoturístico piloto y de experiencia, llamado “Brañas de Somiedo”, que puede contribuir al mantenimiento de un número significativo de cabanas. El objetivo final del mismo es la elaboración y puesta en marcha de un proyecto de adecuación arquitectónica interior de las cabanas para proporcionar un entorno adecuado al turismo de experiencia buscado. La primera fase de intervención en la cabana de teito consistió en la realización de una inspección estructural para evaluar el estado de conservación de los elementos de madera de la cubierta y proponer las actuaciones necesarias. Para esta inspección, se emplearon distintas tecnologías avanzadas para el levantamiento y el diagnóstico estructural. Los siguientes apartados del artículo describen la metodología y resultados de la inspección efectuada para la determinación de los trabajos de rehabilitación necesarios.

2. Descripción de la cabana objeto de estudio

La cabana objeto de inspección (figura 1) se ubica en la Braña de la Pornacal, encontrándose catalogada en el “Estudio-Inventario de las construcciones de cubierta vegetal y de los corros redondos del Parque Natural de Somiedo” [1] con el número 368. Posee forma rectangular, con una pequeña edificación auxiliar adosada, habitual en esta braña y a la que llaman “*cabanín*” o “*casetu*”. Cuenta con una parcela anexa de forma semicircular, de unos 110 m², rodeada por un muro de mampuestos de piedra derruido parcialmente [2].



Figura 1. Cabana objeto del proyecto (Braña de la Pornacal, Somiedo)

Dentro de las estructuras de madera presentes en la cabana pueden distinguirse dos tipologías: forjado (el denominado “treme” en este tipo de cabanas) y cubierta. El forjado se compone por vigas de sección irregular, sin escuadrar, de madera haya que apoyan en las “palmas”, elementos longitudinales que descansan sobre los muros de piedra. Sobre estas vigas, de sección y separación

intereje variable, descansa el entretejido de material vegetal de diversa tipología que hace las veces de suelo del piso superior. Por su parte, la cubierta está formada por una serie de “cabrios” que se encajan en las “palmas” en su parte inferior y en la cumbrera en la superior, formando faldones de gran inclinación (aproximadamente 55°). De nuevo, un sistema de varas entrelazadas se sitúa sobre los “cabrios”, y sirven de base para la colocación de la capa de material vegetal (escoba) que servirá de elemento exterior de la cubierta

3. Metodología

3.1. Inspección visual

Fue realizada en primer lugar una inspección visual mediante métodos clásicos (instrumentación de medición de dimensiones y distancias, xilohigrómetros, extracción de muestras para determinación de especie y densidad, etc.) para el diagnóstico estructural de los elementos de madera. La inspección fue realizada en las dos zonas correspondientes a las tipologías mencionadas: forjado o “treme” y cubierta. El objeto de la inspección visual fue la detección de daños por agentes xilófagos y/o presencia de fallos estructurales.

3.2. Levantamiento tridimensional

Fue empleado un láser escáner (modelo Trimble X7) para el levantamiento tridimensional de la estructura. Se efectuaron un total de 17 escaneos, tanto del interior de la cabana (incluyendo la primera planta bajo cubierta) como del exterior para obtener una nube de puntos con coordenadas XYZ. De forma simultánea a cada escaneo se tomó una foto panorámica que se utilizó para realizar un modelo fotogramétrico sobre la nube (figura 2). Las medidas de las dimensiones y distancias de los elementos estructurales de interés se realizaron en gabinete sobre la nube de puntos con ayuda de un visor específico para tal fin [3][4].

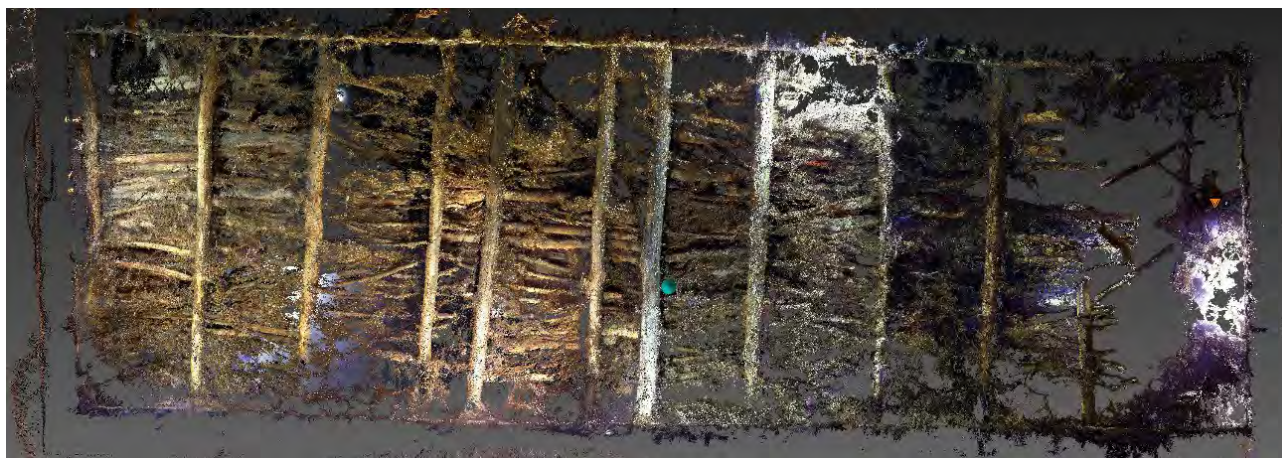


Figura 2. Modelo 3D del forjado/treme obtenido a partir del levantamiento TLS

3.3.Cálculo estructural

Fueron realizados los cálculos estructurales de comprobación del “treme”/forjado y la cubierta mediante el método de los Estados Límite Último (ELU) y Estados Límite de Servicio (ELS) de acuerdo con el Eurocódigo 5 (UNE-EN 1995) [5]. Los cálculos fueron realizados considerando madera de haya (la especie identificada en todos los elementos estructurales presentes en la estructura) y una clase resistente D35. El objetivo del cálculo fue la determinación de las cargas máximas admisibles en el forjado y por tanto la definición de las limitaciones de uso en la propuesta de adecuación arquitectónica interior, así como la comprobación de las cargas de la cubierta.

4. Resultados

La inspección visual de la estructura permitió identificar en primer lugar una zona de la cubierta, correspondiente al extremo noroeste con fallos estructurales grave, en la cual es necesaria la sustitución total de los pares de vigas o “cabrios” y cobertura de escoba, así como la reparación puntual de ciertos segmentos de la “palma” (viga longitudinal sobre la que apoyan éstos). Del mismo modo, las últimas dos vigas del forjado o treme se encontraron en estado avanzado de deterioro y fallo estructural. El análisis del resto de elementos de madera dio como resultado una valoración positiva del estado de conservación, a pesar de que los contenidos de humedad de las vigas, especialmente en las zonas cercanas al apoyo, se encontraban en valores relativamente cercanos al riesgo de aparición de hongos (18-23%).

El levantamiento tridimensional de la cabana permitió obtener el modelo 3D para su visualización y uso para tareas de difusión/divulgación, así como para su uso como gemelo digital relativo al estado inicial previo a la actuación de rehabilitación. Por otro lado, la digitalización tanto interior como exterior permitió la creación de planos de precisión y el dimensionado de los elementos de madera componentes del forjado y la cubierta, difícilmente cuantificables mediante mediciones clásicas. Estas mediciones permitieron la realización de los cálculos estructurales de comprobación para garantizar la seguridad estructural ante el uso previsto. El cálculo estructura realizado concluyó, para la estructura del forjado/treme, la necesidad de añadir nuevas vigas de sección circular con el objeto de reducir el intereje actual en la zona que se pretende habilitar para el acceso a la parte superior. En el caso de la cubierta, el comportamiento actual de los elementos no indica la necesidad de sustitución o aumento de estos, si bien es necesaria la reconstrucción completa en la zona próxima al “cabanín” ya mencionada. Los nuevos elementos a incluir se plantean con madera de castaño (*Castanea sativa* Mill.), de alta durabilidad y con el objetivo de minimizar los riesgos de daños derivados de degradaciones fúngicas y de insectos xilófagos.

5. Conclusiones

Se ha propuesto la creación de un producto ecoturístico piloto y de experiencia, llamado “Brañas de Somiedo” dentro del Plan de Sostenibilidad Turística en Somiedo, cuyo objetivo principal es dinamizar la actividad turística en el concejo de forma sostenible, y proporcionar alternativas que permitan fomentar el mantenimiento de las cabanas de teito, actualmente en una situación crítica debido al abandono y la dinámica regresiva del medio rural en las últimas décadas. La primera fase del proyecto piloto consistió en la realización de una inspección estructural en una de estas cabanas

para evaluar el estado de conservación de los elementos de madera de la cubierta y proponer las actuaciones necesarias. Para esta inspección, se emplearon distintas tecnologías avanzadas para el levantamiento y el diagnóstico estructural, incluyendo la creación de un modelo digital 3D a través de láser escáner.

Agradecimientos

Los autores de este trabajo agradecen el apoyo de las entidades que impulsan y apoyan el Plan de Sostenibilidad Turística en Somiedo: Secretaría de Estado de Turismo del Ministerio de Industria, Comercio y Turismo, Consejería de Cultura, Política Llingüística y Turismo del Principado de Asturias y Ayuntamiento de Somiedo.

Referencias

- [1] García A. 2009. Estudio-Inventario de las Construcciones de Cubierta Vegetal y de los Corros Redondos del Parque Natural de Somiedo. Ayuntamiento de Somiedo.
- [2] Paredes A. 2022. Corpus de Arquitectura tradicional Asturiana: Las Brañas. Braña la Pornacal (Somiedu). Consejería de Cultura, Política Llingüística y Turismo del Principado de Asturias. Catálogo: 1507BR-01/C-0Bertoldo, C. (2014)
- [3] Moyano J, Justo-Estebarez Á, Nieto-Julián J E, Barrera A O, & Fernández-Alconchel M. 2022. Evaluation of records using terrestrial laser scanner in architectural heritage for information modeling in HBIM construction: The case study of the La Anunciación church (Seville). *Journal of Building Engineering*, 62, 105190.
- [4] Tysiac P, Sieńska A, Tarnowska M, Kedzierski P, Jagoda M. 2023. Combination of terrestrial laser scanning and UAV photogrammetry for 3D modelling and degradation assessment of heritage building based on a lighting analysis: case study—St. Adalbert Church in Gdansk, Poland. *Heritage Science*, 11(1), 1-14.
- [5] UNE-EN 1995-1-1:2016. Eurocódigo 5. Proyecto de estructuras de madera. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación. AENOR. Asociación Española de Normalización y Certificación

1115

LA IGLESIA SAN PEDRO DE NINACACA: CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS DE LAS PRIMERAS CUBIERTAS MESTIZAS DE MADERA Y CAÑA EN PERÚ DURANTE EL SIGLO XVI

Pedro Hurtado-Valdez¹; Tania Cerrón Oyague¹

¹ Universidad San Ignacio de Loyola, Lima, Perú

Palabras clave / Palavras-chave:

Arquitectura, Estructura, Armadura, Cubierta

Resumen / Resumo:

En Perú casi no existen evidencias de los iniciales edificios levantados por alarifes españoles en el siglo XVI, debido a terremotos, incendios y guerras que asolaron el territorio durante las centurias siguientes, los cuales produjeron el colapso de dichos edificios o su permanente reconstrucción con enormes modificaciones que hacen irreconocibles las características originales. Recientemente se ha podido identificar en una zona rural del departamento de Pasco en Perú la iglesia San Pedro de Ninacaca, como una edificación que corresponde al siglo XVI, la cual mantiene hasta hoy en día las características constructivas de origen, principalmente de su singular cubierta de madera y caña. Precisamente la presente comunicación muestra el levantamiento y análisis constructivo de la cubierta, lo que permitió desentrañar las interesantes soluciones que dieron los carpinteros españoles junto a la mano de obra local para la elaboración de armaduras de cubierta en la zona altoandina peruana durante el siglo XVI.

1. Introducción

Es raro encontrar evidencias de las obras realizadas por alarifes españoles en Perú durante el siglo XVI, debido a que se perdieron en las centurias siguientes por los continuos seísmos que asolaron el territorio, o en su defecto por haber sufrido grandes modificaciones que las hacen irreconocibles hoy en día. La ausencia de ejemplos ha motivado la constante especulación sobre las características constructivas que tuvo esta arquitectura, siendo patente en el caso de las armaduras de cubiertas. Sin embargo, en recientes exploraciones los autores consiguieron identificar la iglesia San Pedro de Ninacaca, situada en un área rural de los Andes centrales peruanos, como una construcción que muestra los espacios representativos de la arquitectura religiosa del siglo XVI según antiguos cronistas. Aunque la iglesia ha sido parcialmente reconstruida el año 1983 luego que un rayo provocase un incendio, aún mantiene los rasgos constructivos originales de sus cubiertas realizadas en madera y caña. A partir de este hallazgo se ha desarrollado una investigación de su sistema constructivo con la finalidad de salvar el vacío documental de lo que fueron estas edificaciones del siglo XVI en Perú.

2. Método

El método se basó en un trabajo de exploración en archivos históricos y documentos de cronistas con la finalidad de encontrar descripción de las técnicas constructivas en Perú empleadas durante el siglo XVI. Seguidamente se efectuó el levantamiento arquitectónico de la armadura de cubierta de la iglesia San Pedro de Ninacaca. La intención de estas labores fue localizar data con la cual verificar similitudes o diferencias entre los textos históricos y la realidad, permitiendo dilucidar vacíos sobre las construcciones efectuadas en el siglo XVI, que aún no habían sido esclarecidos y que incluso los documentos de archivo no lograron definir explícitamente.

3. Las cubiertas de las iglesias de los andes centrales de Perú durante el siglo xvi

La zona central altoandina de Perú vio florecer iglesias que las diversas órdenes religiosas levantaron con el propósito de evangelizar a la población autóctona del lugar. Estos templos forjaron un tipo constructivo fruto del mestizaje entre las directivas de los constructores españoles y la mano de obra local. Lamentablemente la mayoría de los edificios se perdieron en el tiempo al ser impactados por terremotos, incendios y guerras, o por las notables modificaciones que se introdujeron en ellas posteriormente, como resultado también de los cambios de estilos arquitectónicos, principalmente con el advenimiento del barroco en el siglo XVII.

3.1. La carpintería de armar en el siglo xvi en Perú

Durante el siglo XVI existían pocos alarifes españoles presentes en el virreinato de Perú [1]. Los constructores debían de desplazarse entre diferentes localidades, ya sea por el desierto costero o por las frías punas, para abastecer la demanda de las nacientes urbes españolas replicando técnicas similares. Incluso la ordenanza de Carpinteros de Lima de 1575 mencionaba que en aquella fecha había una carencia de maestros carpinteros en esta ciudad "...por no haber al presente más que tres o cuatro maestros expertos en el dicho oficio si se ausentasen o muriesen no quedaría después quien pudiese encargarse de obras primas y necesarias..." [2].

Vargas Ugarte refiere que el censo de 1612 reconocía la existencia en el virreinato de cinco carpinteros de procedencia indígena [3], denotando la difusión recién en el siglo XVII de las técnicas de carpintería empleadas en España, que no eran conocidas en el mundo prehispánico, como el escuadrado de la madera, el uso de clavos, la elaboración de ensambles y empalmes o el empleo del torno [4].

4. La cubierta de la iglesia san pedro de ninacaca

La iglesia San Pedro de Ninacaca se sitúa en el departamento de Pasco, en los Andes centrales peruanos, a 4.172 msnm. Los inicios de su construcción datan aproximadamente de 1582 y constituye uno de los edificios más antiguos de época virreinal que se ha mantenido con las características originales. La envergadura del edificio medido desde el exterior tiene correspondencia con el sistema de medida empleado en el virreinato de Perú que era la vara castellana (0,84 m). El templo tiene 41,90 m (50 varas) de longitud y 14,80 m (17 $\frac{3}{4}$ varas) de anchura (ver Figura 1). Presenta una planta de estilo Gótico Isabelino de una sola nave con un arco toral que separa la sala de fieles del presbiterio. Exenta a la iglesia aparece una torre campanario de 25 m (30 varas) de altura. Este tipo edilicio corresponde con las características de las primeras iglesias que los constructores españoles realizaron en Perú permitiendo confirmar la antigüedad de su construcción.



Figura 1. Exterior de la iglesia San Pedro de Ninacaca con la cubierta de paja.



Figura 2. Armadura de par y nudillo de rollizos con uniones amarradas

4.1.Sistema constructivo. Maderas y cañas empleadas

Constituye una armadura de par y nudillo realizado con aliso (*Alnus acuminata*) en rollizos, que es la especie endémica de la zona. Sobre los que se ha dispuesto cañas enteras (*Chusquea aff. dombeyana Kunth*), unidas mediante cintas de fibra vegetal o piel en amarre cuadrado y diagonal. El empleo de amarres parecidos a finales del siglo XVI en la iglesia San Juan de Letrán de Juli [5], indicaría la difusión de esta técnica en la región sur del altiplano andino.

Cada cinco pares se ha colocado un tirante de madera rolliza. Los pares se arriostran lateralmente mediante cuatro correas de caña entera que recorren toda la cubierta. La armadura se une al muro mediante rollizos dispuestos horizontalmente, a modo de solera, sobre la parte alta de los muros laterales y orientados hacia el interior de la nave (ver Figura 2).

En la parte superior de la armadura se ha dispuesto un rollizo perpendicularmente a los pares actuando como hilera. Para conseguir el vuelo de la cubierta se han colocado sobrepares de rollizos que parten desde la segunda correa y llegan hasta el borde del muro por el lado orientado hacia el exterior, generando una figura triangular, siendo revestida con caña partida (ver Figura 3). Sobre toda la armadura se han acomodado un grupo de tres cañas enteras en sentido horizontal que cierran toda la estructura y sirven de apoyo a manojos tejidos de ichu (*Stipa ichu*) que protege el edificio de las lluvias. En los hastiales se han colocado salientes pétreos de forma cilíndrica que sirven para sujetar la armadura al muro de fachada.



Figura 3. Solución del vuelo de la cubierta con los sobrepares apoyados en los pares.

4.2.El mestizaje de las cubiertas inclinadas en Perú durante el siglo XVI

El empleo de las estructuras de par y nudillo realizadas con rollizos estaba muy difundido en el área andina a finales del siglo XVI como aporte de la arquitectura hispana, como se observa en las cubiertas de iglesias situadas en el altiplano puneño o en la cubierta de la iglesia San Pedro de Andahuaylillas en Cusco. Por otro lado, Guamán Poma publicó en 1615 dibujos de edificios en poblados andinos como Conchucos o Castrovirreyna [6], en donde se aprecian cubiertas de par y nudillo con una inclinación aproximada de 60° , parecidas a la de San Pedro de Ninacaca (ver Figuras 4 y 5). Normalmente estos dibujos muestran sobre las cubiertas una variedad de opciones para la protección de las lluvias, como son tejas planas y curvas, así como la terminación en paja. Este tipo de elementos en la conformación de cubiertas Incas fueron hallados en las kallancas de Ollantaytambo [7].



Figuras 4 y 5. Armadura de par y nudillo con rollizos, gran pendiente y perfil de sobrepares (Guamán Poma, 1615, f.30, f.1037).

5. Conclusiones

Interesa anotar que las estructuras de par y nudillo no eran empleadas en el mundo prehispánico, sino sólo los de par e hilera, revelando la presencia de la técnica hispana. Pero también la fuerte pendiente muestra la influencia de la mano de obra indígena, ya que corresponde con la pendiente de las cubiertas de paja de origen inca, como el tipo de uniones para la madera determinado sólo por los atados sin empleo de clavos y la colocación de salientes de piedra en los hastiales.

Referencias

- [1] San Cristóbal, A. (1993). Los alarifes de la Ciudad en Lima durante el siglo XVII. Laboratorio de Arte, 6. Pp.129-155.
- [2] Alruiz, C.; Fahrenkrog, L. (2020). Las ordenanzas del oficio de carpintero de la ciudad de Los Reyes (Perú, siglo XVI). Resonancias vol. 24, 47. Pontificia Universidad Católica de Chile. Pp.169-80.
- [3] Vargas Ugarte, R. (1968). Ensayo de un diccionario de artífices de la América meridional. Burgos: Imprenta de Aldecoa.
- [4] Alonso, J.; Fernández-Cabo, M. (2015). Breves comentarios sobre técnicas y herramientas en la carpintería de armar tradicional. Actas del noveno congreso nacional y primero hispanoamericano de historia de la construcción. S. Huerta, P. Fuentes (ed.), vol. 2, Instituto Juan de Herrera. Madrid. Pp.593-602.

- [5] Vela Cossío, F. (2009). Carpintería de armar y albañilería de tradición española en la arquitectura peruana del siglo XVI. Algunos casos singulares del altiplano puneño. Actas del sexto congreso nacional de historia de la construcción. S. Huerta, R. Marin, R. Soler, A. Zaragoza (ed.), vol. 2, Instituto Juan de Herrera. Madrid. Pp.1441-1446.
- [6] Guamán Poma de Ayala, F. (2017) [1615]. Nueva corónica y buen gobierno. Carlos Aranibar (ed.), vol.3. Biblioteca Nacional del Perú. Lima.
- [7] Proetzen, J. (2014). Arquitectura y construcción Inca en Ollantaytambo. Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima.

1116

LA REGULARIDAD EN LA ANCHURA DE ANILLOS DE CRECIMIENTO Y SU EMPLEO EN LA CLASIFICACIÓN VISUAL DE LA MADERA PARA SU ASIGNACIÓN AL SISTEMA EUROPEO DE CLASES RESISTENTES

Guillermo Riesco Muñoz¹

¹ Universidad de Santiago de Compostela

Palabras clave / Palavras-chave:

Anatomía de la madera, Flexión axial, Madera maciza, Propiedad mecánica, Rigidez, Tecnología de la madera

Resumen / Resumo:

La homogeneidad en la anchura de anillos de crecimiento de la madera es característica reconocida por su utilidad en la clasificación visual de la madera aserrada con fines resistentes. Sin embargo, la influencia de la homogeneidad en la resistencia de la madera no ha sido cuantificada. En este trabajo se analizaron estadísticos de dispersión de la variable anchura de anillos para determinar su valor predictivo sobre la resistencia y elasticidad en vigas de madera de roble europeo (*Quercus robur* L.) En una muestra de 52 vigas de roble de dimensiones nominales 2.000×100×50 mm se obtuvieron el módulo resistente a flexión axial, el módulo elástico a flexión axial, la densidad y humedad de la madera, el porcentaje de albura en la sección transversal de cada viga, el tamaño y posición de los defectos de la pieza así como la anchura de cada anillo de crecimiento medida en la sección transversal. Las piezas con anillos homogéneos presentaban módulo elástico significativamente mayor, siendo más débil la correlación con módulo resistente. Las variables descriptivas de la homogeneidad en cuyo cálculo intervienen todos los datos de anillos de la viga estaban más relacionadas con las propiedades mecánicas. El valor de las correlaciones no justifica la construcción de un modelo predictivo de la resistencia mecánica con la homogeneidad en anchura de anillos como única variable predictora. Sin embargo, la homogeneidad de anillos afecta al comportamiento mecánico por lo que puede incluirse en las normas de clasificación visual de la madera de roble con fines resistentes.

1. Introducción

La madera de roble europeo es muy apreciada como material estructural por su resistencia mecánica y durabilidad [1-3]. La madera aserrada de roble fue la segunda más demandada en España por proyectistas y prescriptores en 2022, solo por detrás de la madera de pino insigne (*Pinus radiata* D. Don) [4]. Las normas europeas de clasificación visual de la madera aserrada por su aptitud resistente se basan en características externas de las piezas [5-8]. La variabilidad en la anchura de anillos de crecimiento es una característica externa que afecta a la resistencia de la madera de roble [9-10] pero, sin embargo, es un rasgo anatómico no considerado en las normas de clasificación visual europeas [6].

En este trabajo se evalúa la influencia de la homogeneidad en la anchura de anillos sobre la elasticidad y resistencia de vigas de roble sometidas a flexión axial, como un criterio adicional para la clasificación visual de la madera de roble para construcción, posibilitando la inclusión de las clases visuales de roble en el sistema europeo de clases resistentes [7].

2. Material y métodos

Para el estudio se apearon 26 robles en Galicia, región que encabeza la producción española de este tipo de madera [11]. Los árboles fueron troceados y aserrados, seleccionando 52 tablones, obtenidos por despiece radial, tangencial o mixto. Los tablones fueron secados al aire y posteriormente fueron cepillados y canteados hasta obtener vigas de dimensiones nominales 2.000×100×50 mm. Se obtuvo el módulo resistente a flexión axial (*MOR*) y el módulo elástico a flexión axial (*MOE*) según [5]. Sobre una rebanada obtenida de cada viga se obtuvo la densidad aparente según [8], la humedad según [12], el porcentaje de albura y la anchura de cada anillo de crecimiento según [13]. La posición y dispersión de los datos de anchura de anillos se cuantificaron mediante los estadísticos de la tabla 1.

Las relaciones entre variables se analizaron de forma gráfica y mediante el coeficiente de correlación de Pearson (*R*). Los análisis estadísticos se ejecutaron mediante Microsoft Excel 2013 e IBM SPSS Statistics (version 29.0).

3. Resultados y discusión

La densidad correspondía a una madera pesada según [14]. Para maderas densas, en las que es difícil llegar a una humedad de ensayo del 20 % o inferior, la norma [5] admite efectuar ensayos con humedades mayores, como sucedió en este trabajo (Tabla 1). A pesar de que la densidad era relativamente uniforme, *MOE* y *MOR* presentaban la variación esperable en una muestra de vigas de calidad heterogénea, con humedades diversas, desigual presencia de albura y anillos de crecimiento cuya orientación y dispersión de anchuras eran también diversas (Tabla 1).

Tabla 1. Estadísticos descriptivos de las variables obtenidas en ensayos de flexión sobre vigas de roble de dimensiones nominales 50×100×2.000 mm (norma UNE-EN 408:2011) [5]. Tamaño de muestra: 52 vigas. CV: coeficiente de variación

Variable		Unidad	Media	Mínimo	Maximo	CV (%)
Módulo de elasticidad a flexión (<i>MOE</i>)		N/mm ²	9.419	2.903	16.737	34
Resistencia a flexión (<i>MOR</i>)		N/mm ²	44,1	16,7	75,8	34
Humedad		%	21	18	33	14
Densidad aparente al 12 % de humedad		Kg/m ³	811	603	1.006	9
Superficie de albura en la sección transversal		%	16	0	100	149
Anchura de anillos	media	mm	2,76	0,77	6,54	51
	desviación típica	mm	1,24	0,39	3,92	57
	varianza		2,02	0,16	15,38	125
	mínimo	mm	0,96	0,12	3,88	84
	máximo	mm	5,48	2,41	14,10	46
	rango (máximo - mínimo)	mm	9,58	3,97	13,94	29
	cociente (máximo/mínimo)		9,57	1,94	37,51	86
	rango intercuartílico	mm	1,84	0,43	7,05	69

Las variables *MOE* y *MOR* presentaban valores significativamente más altos en las vigas con anillos de crecimiento de anchura más homogénea. Los indicadores de distribución de anillos más relacionados estadísticamente con el comportamiento mecánico fueron: desviación típica, varianza, rango intercuartílico y máxima anchura de anillo. Las correlaciones fueron mayores en *MOE* que en *MOR* (Figura 1, Tabla 2). La presencia de albura en la viga daba lugar a mayores coeficientes de correlación ($R = -0,54^{**}$ entre *MOE* y varianza de la anchura de anillos; $R = -0,51^{**}$ entre *MOR* y varianza de la anchura de anillos). La relación entre varianza y propiedades mecánicas no fue atribuida a un efecto indirecto de variables vinculadas al comportamiento mecánico de la madera como son la densidad [15] o la humedad, ya que ambas variables no estaban correlacionadas significativamente con la varianza de la anchura de anillos (Tabla 2). Los resultados obtenidos permiten considerar que una norma de clasificación visual de roble para uso estructural tendrá más valor predictor si interviene la homogeneidad de anchura de anillos como criterio de clasificación, y no solo considerando la anchura *media* de anillos como fuente de variación de propiedades mecánicas [16-18].

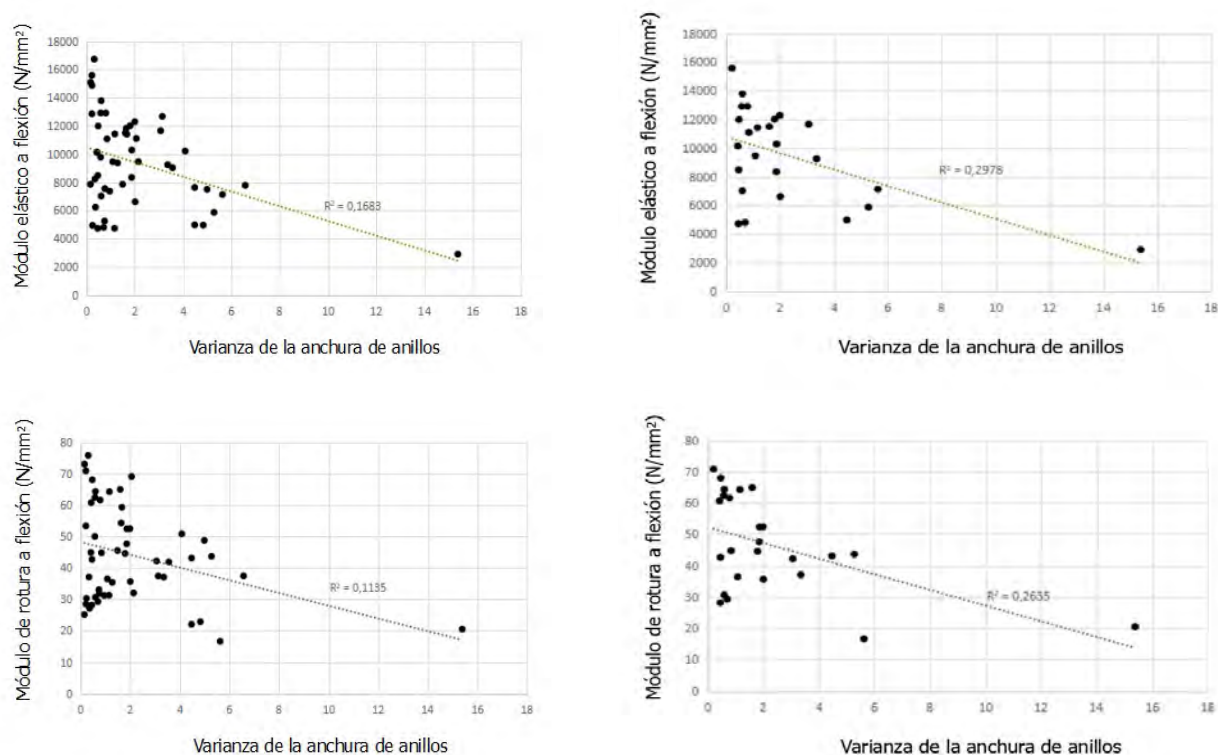


Fig. 1 Nubes de puntos y coeficientes de correlación de Pearson para las variables mecánicas analizadas en madera de roble respecto de la varianza de la anchura de anillos. (Izquierda: muestra completa; derecha: muestra de vigas con presencia de albura).

Tabla 2. Matriz parcial de coeficientes de correlación de Pearson (R) en las propiedades de la madera de roble. Primera columna: variables descriptivas de la posición y dispersión de la distribución de anchura de anillos. *MOE*: módulo de elasticidad a flexión; *MOR*: resistencia a flexión; *H*: contenido de humedad; D_{12} : densidad al 12 % de humedad de la madera; *Alb%*: porcentaje de albura en la sección transversal; * significativo al $p \leq 0.05$; ** significativo al $p \leq 0.01$; n.s.: no significativo.

	<i>MOE</i>	<i>MOR</i>	<i>H</i>	D_{12}	<i>Alb%</i>
media	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0,34*
desviación típica	-0,40**	-0,32*	n.s.	n.s.	n.s.
varianza	-0,41**	-0,34*	n.s.	n.s.	n.s.
mínimo	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0,33*
máximo	-0,35*	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
rango (máximo - mínimo)	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
cociente (máximo/mínimo)	n.s.	n.s.	0,28*	0,39**	n.s.
rango intercuartílico	-0,35*	-0,32*	n.s.	n.s.	n.s.

4. Conclusiones

Una alta heterogeneidad en la anchura de los anillos de crecimiento de la madera, visibles en la sección transversal, reduce la elasticidad y la resistencia mecánica en vigas de roble sometidas a flexión axial. La varianza en la anchura de anillos de crecimiento es un útil parámetro predictor del comportamiento mecánico a flexión, sobre todo si la albura está presente en la pieza, por lo que las normas de clasificación visual de madera de roble para uso estructural pueden mejorar si este rasgo anatómico se incorpora como criterio de clasificación.

Agradecimientos

A la ERDF, a la Oficina de Investigación y Tecnología de la Universidad de Santiago de Compostela y a la Xunta de Galicia, por haber proporcionado la financiación necesaria para realizar este trabajo de investigación.

Referencias

- [1] Gutiérrez Oliva, A.; Plaza Pulgar, F. (1967) Características físico-mecánicas de las maderas españolas. IFIE. Madrid. 103 p.
- [2] Jablonski, M.; Matejak, M.; Niemz, P. (1998) Untersuchungen zum Einfluss von Luftschadstoffen auf die Eigenschaften von Holz. Holzforschung und Holzverwertung [Investigaciones sobre la influencia de los contaminantes del aire en las propiedades de la madera]. 50(4):75-77.
- [3] Van Acker, J.; Militz, H.; Stevens, M. (1999) The significance of accelerated laboratory testing methods determining the natural durability of wood. Holzforschung 53(5):449-458
- [4] López Corralo, D. (2022) La guerra en Ucrania ya está afectando a las cadenas de transporte y suministro en varios países. Madera Sostenible.
- [5] European standard (2012) UNE-EN 408:2011+A1:2012. Timber structures. Structural timber and glued laminated timber. Determination of some physical and mechanical properties. European Committee of Standardization (CEN), Brussels, Belgium.
- [6] European standard (2013) UNE-EN 1912:2012/AC:2013. Structural timber. Strength classes. Assignment of visual grades and species. European Committee of Standardization (CEN), Brussels, Belgium.
- [7] European standard (2017) UNE-EN 338:2016. Structural timber. Strength classes. European Committee of Standardization (CEN), Brussels, Belgium.
- [8] European standard (2023) UNE-EN 384:2016+A2:2023. Structural timber. Determination of characteristic values of mechanical properties and density. European Committee of Standardization (CEN), Brussels, Belgium.
- [9] Duplat, P. (1996) Sylviculture du chêne pédonculé [Selvicultura del roble europeo]. Office National des Forêts, Bulletin Technique. 31:15-19.

- [10] Sevrin, E. (1997) Les chênes sessile et pédonculé. Les guides du sylviculteur [Los robles sésil y pedunculado. Las guías del selvicultor]. Institut pour le Développement Forestier. París. 96 p.
- [11] MITECO (2022) Anuario de estadística forestal 2020. Ministerio para la transición ecológica y reto demográfico. Madrid. 180 p.
- [12] European standard (2019) UNE-EN 13183-1:2002. Moisture content of a piece of sawn timber. Part 1: Determination by oven dry method. European Committee of Standardization (CEN), Brussels, Belgium.
- [13] Stokes, M.A.; Smiley, T.L. (1996) An introduction to tree-ring dating and measurement. University of Arizona Press. Tucson.
- [14] Norma española (1978) UNE 56540:1978. Interpretación de los resultados de los ensayos. Instituto Nacional de Racionalización y Normalización (IRANOR), Madrid, España.
- [15] Lachenbruch, B.; McCulloh, K.A. (2014) Traits, properties, and performance: how woody plants combine hydraulic and mechanical functions in a cell, tissue, or whole plant. *New Phytol.* 204(4):747-764.
- [16] Zhang, S.Y. (1995) Effect of growth rate on wood specific gravity and selected mechanical properties in individual species from distinct wood categories. *Wood Sci. Technol.* 29(6):451-465.
- [17] Han, M.S.; Lee, C.J.; Park, B.S.; Kim, B.R. (2014) Studies on wood quality and growth of *Quercus rubra* (24 years old) in Korea. Physical and mechanical properties. *Journal of the Korean wood science and technology* 42(3):327-338.
- [18] Jeong, J.H.; Kim, B.R. (2015) Wood quality and growth of *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn. in Korea. Compressive and bending strength properties. *Journal of the Korean wood science and technology* 43(3):287-294.

1118

LAS ESCUELAS TALLER EN LA IMPLEMENTACIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN CON MADERA Y BAMBÚ EN CONTEXTOS EN DESARROLLO

María Del Mar Barbero-Barrera¹; Yolanda Ambrosio-Torrijos¹; Beatriz González Rodrigo¹

¹ Universidad Politécnica de Madrid

Palabras clave / Palavras-chave:

Madera, Cadena de valor, Escuelas taller, Habitabilidad básica, Industrialización

Resumen / Resumo:

En contextos de precariedad, uno de los aspectos esenciales en la construcción y diseño de edificaciones consiste en adoptar soluciones técnicas que sean apropiadas al contexto, esto es, que sirvan para dar una respuesta adecuada a la situación y convertirse en una herramienta eficaz contra la pobreza, pero al mismo tiempo, dicha tecnología ha de ser apropiable, en cuanto a que pueda ser utilizada por la población de tal forma que use materiales locales disponibles y asequibles, permita adaptaciones locales y preservar la cultura, pero además que pueda ayudar a la creación de pequeñas industrias asociadas que fomenten la calidad de las construcciones y su seguridad estructural y durabilidad (uno de los criterios básicos de habitabilidad básica). La extracción y uso de madera y bambú de forma sostenible y la creación de un tejido industrial contribuirá a obtener puestos de trabajo, valor añadido a la materia prima y comprensión de la utilidad del bosque y la no deforestación para sustituir por otros usos actualmente más rentables. En esta comunicación, se expone el interés de la implementación de la formación en construcción con madera y/o bambú en las escuelas taller desde la visión holística del uso de la madera, esto es, desde la cadena de valor basada en la gestión sostenible hasta el diseño constructivo y estructural y el planteamiento de su mantenimiento, explotación, montaje, reciclaje o reutilización al final de la vida útil.

1. Introducción

Uno de los aspectos clave en el diseño y construcción de edificaciones en contextos de vulnerabilidad es la selección de materiales de construcción propios de la zona de actuación, esto es, que sean apropiables por parte de la población local, de cara a que no sólo puedan mantenerlos en el tiempo y repetirlos, si fuera preciso, sino también que puedan fomentar la creación de pequeñas microempresas de industrialización que mejoren y sistematicen procesos de construcción, de tal forma que se garantice la calidad de las edificaciones y su adecuación a las exigencias funcionales y técnicas locales [1]. El uso de la madera en este tipo de contextos se torna de gran importancia, teniendo en cuenta que las áreas de concentración de la pobreza, a nivel mundial, se encuentran ubicadas en la franja tropical. En éstas se dispone de distintos materiales de origen vegetal que pueden emplearse en la construcción, esto es, tanto madera como bambú. En este sentido, el desarrollo de sistemas constructivos que empleen estos materiales se torna de gran utilidad para la reproducción

de prácticas constructivas extrapolables a distintos contextos y que permitan generar empleos locales. Al mismo tiempo presentan un gran interés si se tiene en cuenta todo el proceso productivo, esto es, desde la cadena de valor de dichos elementos vegetales, esto es, la gestión y uso de las materias primas hasta qué sucede con los residuos y su reutilización en la cadena productiva. Por otra parte, los elementos vegetales disponen de una ventaja en la generación de sistemas constructivos en estos territorios que, comúnmente se ven afectados por sismos. En efecto, los sistemas constructivos de madera o bambú son ligeros y pueden ser diseñados para disponer de ductilidad media o alta, circunstancia para la que es esencial prestar atención a las uniones.

En la presente comunicación se aborda la importancia del uso de la madera y el bambú en contextos de cooperación con criterios de sostenibilidad y la disponibilidad de este material desde distintas perspectivas: económica, social, cultural pero también ambiental, teniendo en cuenta una visión holística. En este caso concreto, se pone como caso de estudio Ecuador por la gran disponibilidad de los recursos naturales y de la importancia de su uso sostenible como forma de preservarlos.

2. Contexto geográfico

Ecuador se encuentra estructurado en cuatro regiones principales: Costa, Sierra, Amazonía e Insular, consecuencia del sistema geofísico del país. Esta diversidad de regiones también conlleva una gran variedad de climas y de recursos naturales disponibles que quedan reflejados en la arquitectura vernácula [2]. En él, la cadena de valor de la madera aporta en torno al 3% al PIB, genera más de 220.000 puestos de trabajo directos e indirectos y supone 300 millones de dólares anuales en exportaciones. Por cada dólar que invierte el Estado Ecuatoriano en el Programa Nacional de Incentivos Forestales con Fines Comerciales, se recupera, a valor presente, 16 dólares. A esto hay que añadir que dichos bosques suponen una reserva de carbono ingente no sólo para el país sino también para el planeta, con los beneficios que esto redunda en la globalidad [3].

Tanto en Ecuador como en otros países con condiciones similares, los actores que intervienen en la cadena de valor [3] son, entre otros, comunidades indígenas, propietarios, finqueros, empresas que ejecutan la corta, elaboración y extracción, transportistas, comerciantes de madera, suministradores de industrias de madera, industrias (tablero, contrachapado, pallets, astillas...), empresas de construcción de casas y la administración forestal. Actualmente el uso que se hace de la madera se presenta en la Figura 1. En construcción, controlada por el sistema de administración forestal, se emplea solo el 0,7%. La mayor parte de la madera se utiliza para hacer contrachapado, seguido del tablero aglomerado y del aserrado y depósitos.

Figura 2. Principales destinos de la madera en el país según información disponible en el Sistema de Administración Forestal (SAF).

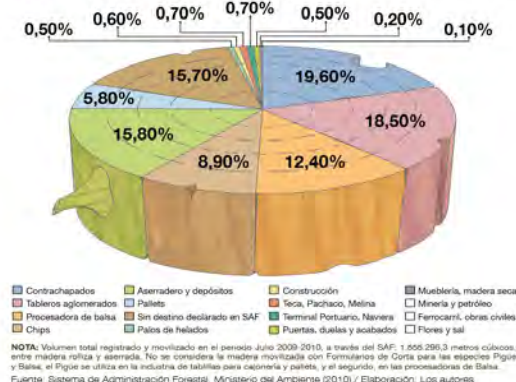


Figura 1. Principales destinos de la madera en Ecuador. Fuente: sistema de administración Forestal de Ecuador, Ministerio de Ambiente

La madera se puede extraer de dos fuentes de suministro diferentes: de plantaciones o de aprovechamientos en bosques primarios. Si se considera que solo se puede extraer de plantaciones hay un reto: aumentar la superficie de plantaciones para disminuir la presión sobre los bosques primarios. Si se intenta realizar el aprovechamiento en bosque primarios de forma sostenible, como ya se hace actualmente en algunas zonas, se obtienen dos beneficios: garantizar el suministro continuo y sostenible y asegurar, si la población comprueba que el bosque primario es rentable, no intente el cambio de uso del suelo a usos más rentables.

3. La madera como material apropiado y apropiable

En efecto, atendiendo al apartado anterior, la disponibilidad de la madera en los contextos precarios y, en concreto, en ciertas áreas de Ecuador, le permite convertirse en un recurso natural apropiado ya que está localizado de forma distribuida por el territorio, está disponible y su fomento conlleva beneficios en distintos aspectos esto es, sociales, económicos, culturales y ambientales, especialmente, si se tiene en cuenta la capacidad de adaptación a los efectos del cambio climático por parte de las especies vegetales promovidas.

Adicionalmente, la madera puede entenderse como un recurso óptimo para contextos precarios [4]. En primer lugar, es apropiable por parte de la población porque permite a ésta empoderarse de la tecnología al tiempo que procura una forma de trabajo que propicie los métodos de construcción hacia soluciones más duraderas y seguras. Es más, el apoyo a este material que, comúnmente está ligado a la arquitectura vernácula, implicaría una puesta en valor de la tradición cultural, en la transmisión de conocimientos (know-how) y la capacitación a partir de experiencias aprehendidas. El hecho de que implique tecnología asequible también influye en la obtención de productos de calidad con un menor coste. Su adecuación al contexto queda patente en la sencillez de los procesos de manufactura, a diferencia de otros materiales de construcción imperantes como el bloque-cemento, y que, además, como se ha mencionado, puede promocionar la creación de industrias rentables que proporcionen forma de vida mantenidas en el tiempo en las áreas rurales y evitando las migraciones masivas hacia las ciudades y el crecimiento de las bolsas de pobreza en éstas.

Las empresas e industrias que mantiene la actividad en un sector mejoran la realización del trabajo [5], investigan para el uso óptimo del material, para reducir los residuos o para reutilizar esos residuos. En definitiva, ha de incentivarse la profesionalización del sector pero sin olvidar que las actividades han de ser rentables para mantenerlas en el tiempo e incluso mejorarlas para alcanzar mayores rendimientos con menor impacto ambiental y garantizando una mayor durabilidad que es un parámetro clave en la Habitabilidad Básica que redunde en la mejora de las condiciones de vida de la población, también desde la visión global de “conjunto de equipamientos capaces de colmar las necesidades esenciales de cobijo que tienen todas las personas. Su satisfacción requiere que se cubran las urgencias residenciales del vivir: no sólo las que conciernen al mero cobijo individual, sino también a los espacios públicos, infraestructuras y servicios elementales que constituyen, en conjunto, un asentamiento propicio para la reproducción vital” [6]. En este proceso, la formación es esencial para garantizar una formación mínima para la realización de los trabajos y las Escuelas Taller se convierten en una herramienta eficaz.

3.1.Capacitación local

Las Escuelas Taller pretenden formar a jóvenes en oficios con rápida inserción laboral. A pesar de que, en origen, a mediados de los años 90 la financiación de este tipo de formación (al menos desde la cooperación española) se destinaba a la recuperación del patrimonio cultural, lo cierto es que, éstas se han convertido en una herramienta para la mejora de los procesos constructivos y la formación especializada. En efecto, en éstas se pone en valor la visión holística de la actividad que se desarrolla, pero también se definen las condiciones adecuadas para que el trabajo se realice en condiciones de seguridad para el trabajador o trabajadora y para la mejora de la calidad del producto final. El objetivo último de este tipo de formaciones es que se incluyan en programas formativos del Ministerio de Educación para progresar en los intereses del mercado laboral, desarrollo empresarial e industrias de importancia para el país. En el caso de la construcción con madera y bambú, como se ha puesto de manifiesto, uno de los puntos singulares es la resolución de uniones, para los que la formación especializada y conocedora de la función de éstos es esencial para garantizar la durabilidad y la adecuación de las construcciones a las exigencias y requisitos locales, especialmente, en caso de sismos. Por lo tanto, este tipo de Escuelas Taller pueden servir de base o incluso integrarse en las titulaciones de capacitación profesional.

En Ecuador, inicialmente se crearon tres Escuelas Taller aunque el éxito alcanzado en la transformación social y económica de las regiones, impulsó la creación de otras nuevas en los últimos años que, además, se centran en la construcción sostenible con materiales locales naturales. Éste es el caso de la Escuela Taller de Manabí, especializada en construcción con bambú y que ha logrado fortalecer la totalidad de la cadena de valor asociado a este tipo de construcciones [7].

4. Conclusiones

Entre los materiales apropiados y apropiables en contextos de precariedad hemos de destacar el uso de la madera y del bambú, por su accesibilidad en estos contextos, ubicados especialmente en áreas de clima tropical. Sin embargo, su empleo implica imprescindiblemente abordarlo desde una visión holística que incorpore desde la gestión y uso responsable hasta las distintas actuaciones y soluciones para garantizar que la edificación o la construcción se realice con parámetros de seguridad y de durabilidad.

En este contexto, la creación de escuelas taller en las que se imparte formación especializada y se sensibiliza sobre el uso de estos materiales se considera imprescindible ya que, en ellas se puede controlar los procesos constructivos y las soluciones que se aportan creando incluso una pequeña industria que capacita a la población para el fomento de una construcción con criterios y garantías adecuadas para su seguridad, salud y mantenimiento a largo plazo.

Referencias

- [1] Salas Serrano, Julián. 2016. 'De Habitat II a Habitat III: Construyendo Con Recursos Escasos En Latinoamérica'. Ministerio de Fomento. Instituto Juan de Herrera, ETSAM, UPM 1–542. Retrieved 31 August 2021 (<http://oa.upm.es/44100/>).

- [2] Arteaga Solorzano, D. (2021). Evaluación y adecuación de sistemas constructivos vernáculos de Ecuador. El caso de Esmeraldas. Trabajo Fin de Grado. UPM, disponible en: <https://oa.upm.es/68296/>
- [3] Romero, M. y Velasteguí, D. (2011). Descripción de las Cadenas Productivas de Madera en el Ecuador. Informe Técnico. Ministerio del Ambiente. Ecuador.
- [4] Salas Serrano, J.; Oteiza Sanjosé, I. (2008). La industria de materiales básicos de construcción ante las ingentes necesidades actuales de edificación. *Materiales de Construcción* 58 (292): 129-148. Disponible en: <https://oa.upm.es/2883/>
- [5] Salas Serrano, J. (2010). De los sistemas de prefabricación cerrada a la industrialización sutil de la edificación: algunas claves del cambio tecnológico. *Informes de la Construcción* 60 (512): 19-34. Disponible en: <https://oa.upm.es/2882/>
- [6] Serrano Salas, J. (2008). Tugurización y necesidades de habitabilidad básica, rémoras de la cohesión social en Latinoamérica. *Pensamiento Iberoamericano* 1: 207-230. Disponible en: <https://oa.upm.es/2880/>
- [7] Escuela Taller de Manabí. Disponible en: www.bambu.com.ec/escuela-taller/

1119

LCA OF HARVESTED WOOD PRODUCTS (HWP): A REVIEW ON CARBON STORAGE INCLUDING EXAMPLES OF GOOD PRACTICE IN EGYPT

Mohammed Hamdallah¹; Zannat Ara Dilshad Shangi¹; Paula Maria Ribeiro Levi¹; José Amorim Faria¹

¹ University of Porto

Palabras clave / Palavras-chave:

Product declaration (EPD), Egypt forest, Harvested wood products (HWP), Sustainability

Resumen / Resumo:

Wood, recognized for its circularity attributes such as resilience and resource efficiency, encounters significant challenges in production and industry engagement, hindering its full potential. Allocation methods concerning Harvested Wood Products play a substantial role in environmental outcomes, urging the need for standardized reporting and transparent datasets. This paper aims to investigate diverse Life Cycle Assessment methodologies focused on carbon storage within the forestry and wood products sector. Additionally, it outlines a review paper's structure and showcases exemplary forest development practices in Egypt. These studies emphasize the necessity for transparent, standardized, and enriched data in Life Cycle Assessment methodologies to guide sustainable practices, raise environmental awareness, and inform decision-making in the Harvested Wood Products sector.

1. Introduction

The construction industry's staggering 37% contribution to CO₂ emissions in 2020 accentuates the need to integrate wood as a renewable resource and carbon sink into the construction sector [1]. Strategies within the circular economy, such as reusing, repairing, refurbishing, waste reduction, recycling, and leveraging wood by-products for energy, offer potential avenues to maximize wood's advantages while addressing circularity hurdles [2]

Research regarding Global Warming Potential (GWP) and Life Cycle Assessment (LCA) is lacking in the forestry industry. Products made from raw wood, defined as Harvested Wood Products (HWP), are "carbon neutral" and the importance of taking long-term carbon losses must be considered in the sector, referencing land-use scenarios, and understandably presenting replacement credits, and utilizing pertinent indicators are essential to quantify the impact of climate change regarding carbon storage and the timing of emissions [3].

An LCA-focused study on normative standards for wooden constructions and the utilization of Harvested Wood Products (HWP) as a sustainable material base highlights the necessity of adapting Life Cycle Assessment (LCA) for routine decision-making in the building sector. This adaptation proves advantageous for informed decision-making. Moreover, the study emphasizes the importance of transparent datasets and standardized reporting systems. These measures aim to enhance comparability and minimize confusion in environmental assessments of wood products [4].

2. EU standards

The EN 15804:2012+A2:2020/AC:2021 [5] considers the sustainability of construction works, Environmental Product Declaration (EPDs), and rules for the product category in construction. One of the core environmental impact indicators is 'Global Warming Potential total (GWP-total)' and the Unit is kg CO₂ eq. under the impact category of 'Climate change- total'.

The EN 16485:2014 [6] is about Product Category Rule (PCR) for construction materials made of wood derivatives aims to provide a consistent and empirically supported framework for EPDs including health-related pollutants during the building's use stages. These EPDs seek to give quantified environmental information for products or related services. Additionally, EN 16485:2014 outlines Product Category Rules (PCR) for wood derivative-based construction materials, aiming to establish a consistent framework for EPDs that includes health-related pollutants during building use stages shown in Table 1.

Table 1. Wood's end-of-life process and wood-based products

	Landfill	Thermal waste treatment	Energy recovery	Use of secondary fuel	Recycling
Criterion 1	Flow does not reach end-of-waste status			Flow reaches end-of-waste status	
Criterion 2	[not applicable]	R1 value of incineration facility < 0,6	R1 value of incineration facility > 0,6	[not applicable]	[not applicable]
Resulting attribution of processes to information modules					
C1	Deconstruction/ Demolition	Deconstruction/ Demolition	Deconstruction/ Demolition	Deconstruction/ Demolition	Deconstruction/ Demolition
C2	Transport to landfill	Transport to the incineration site	Transport to the incineration site	Transport to the sorting platform	Transport to the sorting platform
C3			Crushing, site operation and wood combustion	Sorting and crushing at the platform	Sorting and crushing at the platform
C4	Landfilling (waste operation, leachate treatment and landfill gas combustion)	Crushing, site operation and wood combustion			
D	Avoided impact of electricity production and/or thermal energy recovery from landfill gas recovery	Avoided impact of electricity production and thermal energy recovery	Avoided impact of electricity production and thermal energy recovery	Site operation and wood combustion and avoided impact of electricity production and thermal energy recovery	Avoided impact of forestry, harvesting, wood chips preparation and drying

NOTE 5 The same attribution of processes related to waste processing and benefits and loads beyond the system boundary applies to waste from modules A4, A5 and B2 to B5.

3. Representative values of carbon storage in hwp

HWPs are materials derived from forests and transformed into furniture, plywood, and paper. These materials play an important role in mitigating climate change by acting as a repository for carbon and replacing harmful sources of materials and energy such as fossil fuels. Incentives to increase its use are being provided and consequently reduce carbon dioxide emissions [7]. Carbon stored in HWPs has implications for Greenhouse Gas (GHG) inventories, in which the production and end use of it play a crucial role. Additionally, the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) offers guidance on carbon accounting for HWPs, and this accounting is responsive to potential future changes in socio-economic factors, such as population, income, and trade [8].

4. Carbon storage: an example of egypt

Egypt, known for its sparse 70,000-hectare forest cover, primarily relies on cultivated woodlands irrigated with treated wastewater on marginal lands. The *Serapium* plantation is situated in northeastern Egypt near Ismailia town and adjacent to the Suez Canal and *Serapium* village, as shown in Figure 1, and spans 373.3 feddans, hosting a diverse array of 10 tree species. Lemon-scented gum and *Casuarina* exhibit annual CO₂ sequestration rates of 53 and 43 t/ha at 15 years old, while African Mahogany reaches a similar rate ten years later [9].

These regions play a crucial role in storing carbon within the country, acting as a barrier against desertification, a problem evident in the Nile Delta, illustrated in Figure 2. The absence of forests in Egypt stems not only from climatic challenges but also from urbanization and the emphasis on food production for a growing population. The National Program for the Safe Use of Treated Sewage Water for Afforestation in the mid-1990s, led to a significant 3.3% annual increase in forest cover area between 1990 and 2000, surpassing other African countries [9].

Remarkably, the yield of tree species in Egyptian plantations appears 4.5 times faster than in Germany, Europe's leading forestry country. With Egypt producing a substantial volume of sewage water annually, an estimated 5.5 billion m³ could afforest over 650,000 hectares of desert lands and store more than 25 million tons of CO₂ annually in new plantation forests. This afforestation program aligns with efforts to stabilize greenhouse gas concentrations and tackle environmental challenges [9].

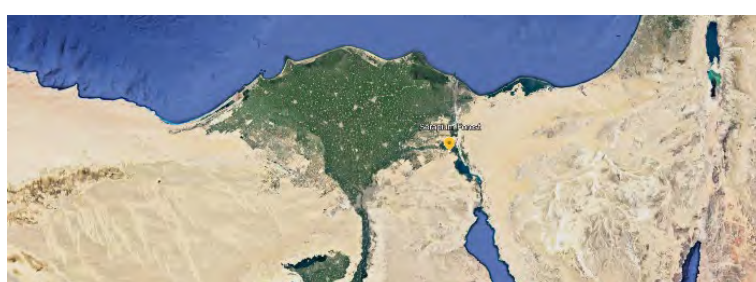


Figure 1. The project location; Source: Google Maps.

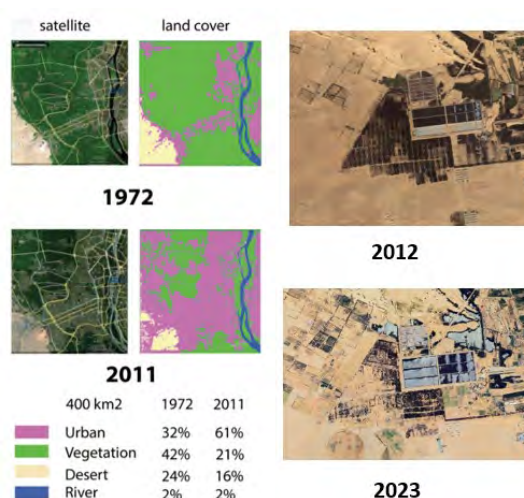


Figure 2. Delta land lost and Serapium forest degradation; Source: References [10], [11], and Google Maps.

5. Conclusion

Egypt shows great potential for vast afforestation, capitalizing on ample sewage water reserves and expansive desert lands. This utilization of treated sewage water as a resource for wood production, biofuel crops, and carbon trading indicates strong environmental, social, and economic prospects. Forecasts predict over 12% returns by afforesting 1,000 hectares across the desert using 14 tree species. Additionally, this large-scale afforestation might aid cloud formation, addressing the urgent need for rainfall, expanding agricultural zones, and easing population concentration. However, mismanagement since 2012 has degraded plantation areas, necessitating ongoing observations, innovative strategies, and tailored management plans to meet diverse afforestation goals, encompassing carbon sequestration, timber, and biomass production, environmental benefits, and recreation [9].

While *Serapium* forest has not yet produced Harvested Wood Products, other private forests like Paulownia Egypt have already done it and continue to be essential to control desertification. However, establishing a strong wood industry in Egypt requires standardized practices and proper forest management.

REFERENCES

- [1] Y. Ding *et al.*, “Emerging Engineered Wood for Building Applications,” *Chem Rev*, vol. 123, no. 5, pp. 1843–1888, 2023, doi: 10.1021/acs.chemrev.2c00450.
- [2] M. Ghobadi and S. M. E. Sepasgozar, “Circular economy strategies in modern timber construction as a potential response to climate change,” *Journal of Building Engineering*, vol. 77, 2023, doi: 10.1016/j.jobe.2023.107229.
- [3] D. Klein, C. Wolf, C. Schulz, and G. Weber-Blaschke, “20 years of life cycle assessment (LCA) in the forestry sector: state of the art and a methodical proposal for the LCA of forest production,” *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 20, no. 4, pp. 556–575, 2015, doi: 10.1007/s11367-015-0847-1.
- [4] L. Lauri, H. Roope, T. Atsushi, V. Tuovi, and D. Olli, “Environmental product declaration of timber products: The impact of allocation method to the impact categories,” *J Clean Prod*, vol. 256, p. 120386, May 2020, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2020.120386.
- [5] T. C. C. 198 Sustainability of construction works, “UNE-EN 15804:2012+A2:2020/AC Sustainability of construction works Environmental product declarations Core rules for the product category of construction products.”
- [6] T. C. A. 56 Wood and cork, “UNE-EN 16485 Round and sawn timber Environmental Product Declarations Product category rules for wood and wood-based products for use in construction,” July. [Online]. Available: www.aenor.es
- [7] A. Grêt-Regamey, E. Hendrick, S. Hetsch, K. Pingoud, and S. Rüter, “Challenges and Opportunities of Accounting for Harvested Wood Products,” *Harvested Wood Products in the Context of Climate Change Policies*.
- [8] C. M. T. Johnston and V. C. Radeloff, “Global mitigation potential of carbon stored in harvested wood products,” *Proc Natl Acad Sci U S A*, vol. 116, no. 29, pp. 14526–14531, 2019, doi: 10.1073/pnas.1904231116.
- [9] H. El Kateb *et al.*, “SILVICULTURAL EXPERIMENTS German-Egyptian Collaboration to Afforestation in

Desert Lands of Egypt: Information Summary and Description of the Field Experiments Establishment of Plantation Forests and Development of Sustainable Forestry in Desert Lands of Egypt Using Sewage Water Education and Research Establishment of Plantation Forests and Development of Sustainable Forestry in Desert Lands of Egypt Using Sewage Water Education and Research,” [Online]. Available: www.karlgayer.de.

- [10] H. El Kateb, “From sewage water to plantation forests in desert lands of Egypt Establishment of Plantation Forests and Development of Sustainable Forestry in Desert Lands of Egypt Using Sewage Water Education and Research.”
- [11] A. Kress, “Forestry Department SPATIAL ANALYSIS REPORT OF THE PLANTATION AREA FOR THE FOREST MANAGEMENT PLAN 2013-2022,” 2012. [Online]. Available: www.fao.org/forestry

1120

LIFE CYCLE ASSESSMENT OF MARITIME PINE SAWNWOOD

André M. A. Dias¹; Alfredo M. P. G. Dias²

¹ SerQ

² Universidade de Coimbra

Palabras clave / Palavras-chave:

Life Cycle Assessment, Maritime pine, Sustainability, Sawnwood

Resumen / Resumo:

The life cycle assessment methodology aims to quantify the environmental impacts of a product, process or service throughout its life cycle, from the extraction of raw materials to its end-of-life. With increasing environmental concerns around the world, this methodology has been used in many studies to quantify and compare the environmental impacts of construction products. In these studies, wood products have shown environmental advantages, mainly due to photosynthesis processes. In the Iberian Peninsula, Maritime pine sawnwood has a high potential for use in construction due to its mechanical properties. Despite its importance, there are no studies that apply the life cycle assessment methodology to quantify the environmental impacts of Maritime pine sawnwood. This study aims to use the life cycle assessment methodology to quantify the environmental impacts of sawn maritime pine timber. The life cycle operations of phases A1, A2 and A3 are modelled, i.e. from planting to the mill gate.

1. Introduction

A study of LCA is divided into four phases: goal and scope definition, inventory analysis, impact assessment and interpretation [1][2]. One of the main advantages of the LCA methodology is the life cycle perspective of products, materials or production processes, which allows the identification and evaluation of the life cycle phases that most affect the environmental performance. It is thus possible to identify “environmental hotspots” in the life cycle of products and enable the increase of their environmental performance [3].

Wood is a renewable material that is produced by natural forest ecosystems and has been used as a construction material for thousands of years around the world. From an environmental perspective, the use of wood in construction when compared with other construction materials, represents some benefits particularly in the consumption of non-renewable energy and cumulative energy demand [4]. The carbon sequestration capacity of wood can be considered in the Global Warming Potential (GWP) and represents an advantage over other construction materials [5].

Based on Takano et. al [6], the wood-based materials life cycle is usually divided in four stages: product stage; construction stage; use stage and end-of-life stage. This definition is complemented with an “informative module” related to the benefits and loads beyond the product system boundary.

Several studies have already studied and quantified the environmental impacts of maritime pine Sawnwood [7–9]. Dias et al. [10] have already quantified the environmental impacts of maritime pine round wood and compared them with the environmental impacts of eucalyptus, and cryptomeria from Portuguese forests. The results showed that Eucalyptus had the highest impacts on the majority of environmental indicators. On the other hand, Cryptomeria had the lowest.

Although the environmental impacts of Roundwood from Maritime Pine timber have been quantified, no study has yet applied the Life Cycle Assessment methodology to the production phases (mainly the phase A3) of maritime pine Sawnwood from Portugal, using data collected at the mill. This study aims to present the data collection methodology.

2. Methodology

2.1.Goal and scope definition

The functional unit for the production of structural products was: 1 m³ of product at the gate of the production factory. According to the nomenclature given by Figure 1 of EN 15804+A2 [11], the system boundaries of this study are from “cradle-to-grave and module D”. These boundaries include: the production stage (A1-A3), the construction stage (A4-A5), the use stage (B1-B7), the end-of-life stage (C1-C4), and a stage that takes into account the benefits and loads beyond the system boundary (Module D). The production stage of wooden products begins in the forest, with the tree’s growth, and ends at the gate of the structural products’ factory. This stage was divided into: forest operations (stage A1), transport from forest to production factory (stage A2), and production of structural products (stage A3). This study focuses on transport from forest to production factory (stage A2) and production of structural products (stage A3), but the data from phase A1 collected previously was also considered.

The roundwood, after being placed at the forest roadside, is transported to the sawmill and/or other wood processing industries. These transportation processes are usually performed with cargo trucks equipped, or not, with cranes.

Maritime-pine sawnwood was modelled through inquiries to a Maritime pine sawnwood production company. The study analysed a company located in Sertã (Centro region of Portugal) and the technology was representative of the national practice. The data was representative of the year 2016 (avoiding the influence of wildfires in the Centro region during the year 2017). The system boundary of this scenario covered: unloading of roundwood, debarking, sawing, burning of wooden chips for heat production, drying, marking, storage, packaging and loading of sawnwood into trucks. The inputs of the system boundary considered were roundwood, electricity, water, diesel, lubricant, and packaging film. The main outputs of the system boundary were sawnwood, sawdust, wood chips and bark. Some of the wood chips co-produced are used by the boiler plant to heat the drying oven. The emissions of the boiler were also considered in the system boundary. The wastes generated during the sawmilling of Maritime pine sawnwood, such as mineral oil waste and hazardous waste, were also taken into account. The system boundary is shown in Figure 1.

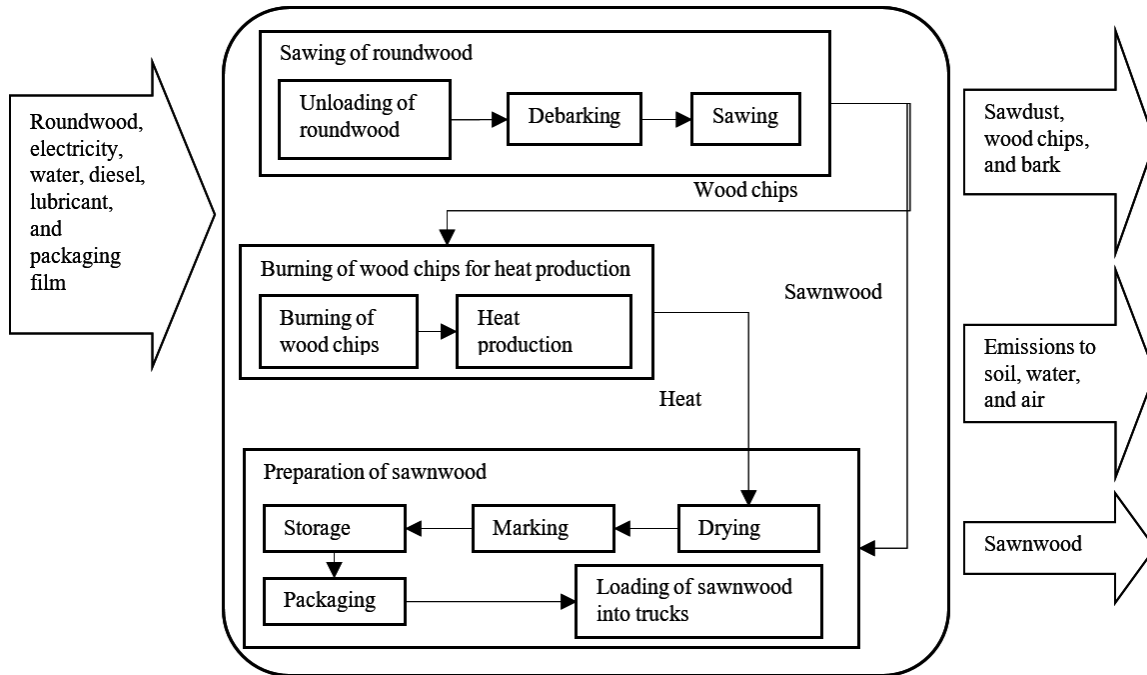


Figure 1 – System boundary of maritime pine sawnwood production

2.2.Life Cycle Inventory

The data for modelling procedures the processes of transport of Portuguese Maritime Pine from the forest to the sawmill was calculated through inquiries to the sawmill inventoried in stage A3. The mean distances from forests (in Centro region) to the sawmill (Sertã) were considered. The mean distance from Maritime pine forests to the sawmill was 210 km.

The inventory of Maritime pine sawnwood production processes was performed through inquiries to a sawmill company located in Sertã, Portugal. This company consumed 358 451 cubic meters of roundwood under bark during 2016, which represents approximately 20% of the wood that was consumed by Portuguese sawmills [12]. The inputs and outputs were quantified by data collection sheets developed based on Annex A of ISO 14044 [2]. The inventoried company stated that the main origin of the roundwood consumed was from naturally regenerated forests. The background processes (such as water production, energy production, etc.) were modelled using the Ecoinvent database processes. The inputs of LCI were: Maritime Pine Roundwood; Electricity, low voltage {PT} | market for | Cut-off, U; Tap water {RER} | market group for | Cut-off, U; Diesel, burned in building machine {GLO} | processing | Cut-off, U; Packaging film, low density polyethylene {GLO} | market for | Cut-off, U; Lubricating oil {RER} | market for lubricating oil | Cut-off, U. The emissions and waste generated were: Particulates, unspecified; Carbon monoxide; Nitrogen oxides; Organic substances, unspecified; Waste mineral oil {Europe without Switzerland} | treatment of waste mineral oil, hazardous waste incineration | Cut-off, U; Hazardous waste, for incineration {GLO} | market for | Cut-off, U

The data directly collected from the company was not reported in this study due to confidentiality issues.

3. Results

The environmental impacts were calculated with SimaPro 9.1 software [13]. SimaPro assigned the LCI results to the selected impact categories (classification) and calculates the corresponding results based on characterization factors given by EN 15804+A2. The software has a database of the most common LCIA methods where the category indicators and characterization, normalization and weighting factors are given.

This study calculates therefore the environmental impact categories given by the EN 15084+A2 [11]. The categories, its abbreviations, units and impact values are given in **Table 1**.

Table 1 - categories, its abbreviations, units and impact values of maritime pine sawnwood

Abbreviation	Category	Units	Maritime Pine
GWP-t	Climate change	kg CO ₂ eq	-9.58E+02
ODP	Ozone depletion	kg CFC11 eq	1.12E-05
AP	Acidification	mol H ⁺ eq	4.61E-01
EP-f	Eutrophication, freshwater	kg P eq	6.22E-03
EP-m	Eutrophication, marine	kg N eq	1.36E-01
EP-t	Eutrophication, terrestrial	mol N eq	1.56E+00
POCP	Photochemical ozone formation	kg NMVOC eq	5.44E-01
ADP-f	Resource use, fossils	MJ	8.93E+02
ADP-m	Resource use, minerals and metals	kg Sb eq	1.12E-04
WDP	Water use	m ³ depriv.	1.84E+01
PM	Particulate matter	disease inc.	3.40E-06
IRP	Ionising radiation	kBq U-235 eq	3.20E+00
ETP-fw	Ecotoxicity, freshwater	CTUe	6.89E+02
HTP-c	Human toxicity, non-cancer	CTUh	8.15E-07
HTP-nc	Human toxicity, cancer	CTUh	2.08E-08
SQP	Land use	Pt	9.78E+04

4. Acknowledgments

The authors are grateful to the Institute for Sustainability and Innovation in Structural Engineering—ISISE Coimbra, the Department of Civil Engineering of the University of Coimbra, the Innovation and Competence Forest Centre—SerQ, and all the funding bureau agencies in the name of FCT—Foundation for Science and Technology.

References

- [1] ISO, ISO 14040: Environmental management – Life Cycle Assessment — Principles and framework, Int. Organ. Stand. 2006 (2006).
- [2] ISO, ISO 14044: Environmental management - Life Cycle Assessment - Requirements and Guidelines, Int. Organ. Stand. 1 (2006).
- [3] M. Bouman, R. Heijungs, E. Van Der Voet, J.C.J.M. Van Den Bergh, G. Huppes, Material flows and economic models: An analytical comparison of SFA, LCA and partial equilibrium models, *Ecol. Econ.* 32 (2000) 195–216. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(99\)00091-9](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(99)00091-9).
- [4] F. Werner, K. Richter, Wooden building products in comparative LCA: A literature review, *Int. J. Life Cycle Assess.* 12 (2007) 470–479. <https://doi.org/10.1065/lca2007.04.317>.
- [5] R. Sathre, S. González-García, Life cycle assessment (LCA) of wood-based building materials, *Eco-Efficient Constr. Build. Mater. Life Cycle Assess. (LCA), Eco-Labeling Case Stud.* (2013) 311–337. <https://doi.org/10.1533/9780857097729.2.311>.
- [6] A. Takano, A. Hafner, L. Linkosalmi, S. Ott, M. Hughes, S. Winter, Life cycle assessment of wood construction according to the normative standards, *Eur. J. Wood Wood Prod.* 73 (2015) 299–312. <https://doi.org/10.1007/s00107-015-0890-4>.
- [7] S. González-García, M.T. Moreira, A.C. Dias, B. Mola-Yudego, Cradle-to-gate Life Cycle Assessment of forest operations in Europe: environmental and energy profiles, *J. Clean. Prod.* 66 (2014) 188–198. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.11.067>.
- [8] A.C. Dias, L. Arroja, Environmental impacts of eucalypt and maritime pine wood production in Portugal, *J. Clean. Prod.* 37 (2012) 368–376. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.07.056>.
- [9] J. Ferreira, D. Jones, B. Esteves, L. Cruz-Lopes, H. Pereira, I. Domingos, Life Cycle Assessment of Maritime Pine Wood: A Portuguese Case Study, *J. Sustain. For.* 40 (2021) 431–445. <https://doi.org/10.1080/10549811.2020.1768871>.
- [10] A.M. Dias, A.G. Dias, J. Silvestre, J. Brito, Influence of the timber strength classes on the environmental impacts of housing floors, 5 (2021) 1–7.
- [11] CEN, EN 15804+A2:2019 - Sustainability of construction works — Environmental product declarations — Core rules for the product category of construction products, 2019.
- [12] C. Pinus, A Fileira do Pinho em 2016, (2017).
- [13] M. Goedkoop, M. Oele, J. Leijting, T. Ponsioen, E. Meijer, Introduction to LCA with SimaPro, PRé Consultants, 2016.

1121

LOSETAS NERVADAS DE MADERA

Susana Torán Reyes¹; Luis Gallardi Favilla¹

¹ Universidad de la República; Facultad de Arquitectura Diseño y Urbanismo

Palabras clave / Palavras-chave:

Cooperativas, Cubiertas, Elemento estructural, Entrepisos, Viviendas

Resumen / Resumo:

La madera es un material renovable que se utiliza en la construcción sin dañar el ambiente. La disponibilidad anual de un millón/m³ de madera de pino (*Pinus taeda, elliottii*) es más de lo que el mercado interno de Uruguay puede consumir. En este trabajo se presenta un producto de madera destinado a la construcción de viviendas.

Una loseta nervada de 61x18x330 cm prefabricada con madera aserrada de pino y tablero de virutas orientadas para entresijos o cubiertas que pueden manufacturarlas las Cooperativas de viviendas por ayuda mutua, con herramientas sencillas y mano de obra no calificada.-

En el mercado local no es frecuente encontrar madera de pino para uso estructural de la calidad visual definida en la norma uruguaya 1261:2018 para trabajar a flexión, siendo necesario seleccionar cada escuadría.

Para caracterizar las propiedades resistentes de las losetas se ensayaron 11 probetas a flexión estática con la norma americana E 72:2015. En el ensayo la carga se incrementa gradualmente, se obtienen las deformaciones iniciales, a los 5 minutos y las residuales en el período elástico. Luego, sin medir la deformación se carga la loseta en forma continua hasta romperla. Con los valores carga/deformación se obtiene el módulo de elasticidad medio, durante el ensayo se registran los alabeos, comportamiento de los clavos, daños locales y forma de rotura.

Se verificó que las losetas fabricadas con madera de pino a menores cargas, presentan deformaciones instantáneas y residuales mayores que las losetas fabricadas con eucalipto (*Eucalyptus grandis*) ensayadas en un proyecto anterior.

1. Introducción

En Uruguay no ha existido una tradición de construir con madera, los montes nativos estaban compuestos por árboles achaparrados de poca altura, de especies poco resistentes no aptas para uso estructural (Chebataroff y Loustau, 2003). En 1987, con la aprobación de la Ley Forestal nro. 15939, el sector foresto-industrial cobró nuevo impulso. La ley priorizó las plantaciones con especies de rápido crecimiento como pinos y eucaliptos destinadas para la producción de celulosa.

Si bien la plantación de pinos ha disminuido en los años recientes lo que está plantado asegura la disponibilidad de un importante volumen de madera para los próximos veinte años. La capacidad instalada de los aserraderos permite procesar anualmente 1 millón/m³ de madera aserrada de pino, es más de lo que el mercado interno puede consumir, (Revista Forestal 30, 2021), por lo que es necesario desarrollar nuevos productos destinados a la industria de la construcción.

El país se ha propuesto avanzar hacia una estrategia nacional de desarrollo transformando la matriz productiva del sector forestal, incorporando tecnologías sostenibles e innovadoras en los procesos de industrialización de la madera para la construcción de viviendas. El gobierno actual, declaró de interés general la “promoción del uso de la madera con fines constructivos en vivienda, carpintería de obra y mueblería” (Ley nro. 19889 de Urgente Consideración, 2020).

La promoción de los sistemas constructivos en madera es uno de los objetivos específicos planteados en el Plan Quinquenal de Vivienda 2020-2024 del Ministerio de Vivienda y Ordenamiento Territorial (MVOT) como solución ante la crisis habitacional y los efectos negativos del cambio climático. Es así que la madera cobra mayor protagonismo por sus beneficios como material renovable que secuestra carbono, que requiere baja energía incorporada en su producción y tiene un escaso impacto en el ambiente (Ibáñez et al, 2019).

El uso de la madera en la construcción de viviendas en Uruguay es aún incipiente, representa menos del 0,5 % del total de la construcción residencial (Oficina de Planeamiento y Presupuesto, 2018). Su aplicación en la última década se ha dado preferentemente en los programas de Realojos del Ministerio de Vivienda. Es probable que su uso se extienda cuando el MVOT y los Gobiernos Departamentales regulen su construcción con una única normativa nacional.

Por otra parte, los avances tecnológicos han permitido mejorar y crear nuevos productos derivados de la madera y perfeccionar su desempeño cuando se usa combinada con otros materiales. La posibilidad de unir piezas de madera en forma confiable aumenta la calidad de los productos constructivos (Argüelles, R. et al. 2013) De este modo, se está intentando ampliar el uso de madera en Uruguay, ejemplo de ello es la instalación en 2021, de la primera planta para la producción industrial de *Mass Timber* con madera de pino en el norte del país.

En 2019 el equipo de investigación “Tecnología de la construcción en madera” de la Facultad de Arquitectura Diseño y Urbanismo desarrolló una loseta nervada fabricada con madera de eucalipto y tableros de virutas orientadas (OSB), para las viviendas de interés social además, definió dos modelos teóricos para calcular las losetas: con uniones flexibles (clavadas) y con uniones rígidas (encoladas).

En ese proyecto se recomendó ampliar el estudio a losetas fabricadas con madera de pino, clavadas y encoladas de calidad visual EC1 recomendada en la norma uruguaya 1261:2018 para trabajar a flexión.

El objetivo de este trabajo es desarrollar un producto nuevo para incorporar mayor valor agregado a la madera aserrada de pino que dispone el país; caracterizar las propiedades resistentes de las losetas; definir las uniones entre ellas y con otros componentes constructivos; elaborar las recomendaciones técnicas para su fabricación y uso además de fomentar una práctica constructiva con madera, sencilla y fácil de aplicar por las Cooperativas de vivienda por ayuda mutua.

2. Las losetas prefabricadas con madera de pino

Las losetas nervadas en madera son sistemas superficiales que cumplen función estructural y de terminación a la vez, están fabricadas con dos vigas de madera maciza de pino separadas cada 30,5 cm cubiertas por ambos lados con un tablero OSB de 1,5 mm de espesor, los elementos se vinculan con clavos y adhesivo de acetato de polivinilo, conformando una loseta nervada de sección compuesta trabajando a flexión.

Previo a su fabricación, se clasificó la madera proveniente de una empresa forestal y de una barraca, se controlaron los defectos permitidos en la norma 1261:2018. Esta norma establece un procedimiento para clasificar visualmente la madera aserrada de sección rectangular para uso estructural cultivada en Uruguay clasificada en seco, es decir, con un contenido medio de humedad inferior o igual al 20%, sin que ninguna medida exceda del 24%.

Debido a la gran variabilidad de la madera ofertada en el medio local y a la dificultad de encontrar madera de calidad EC1, se recurrió a la norma española UNE 56544:2011, ya que la calidad ME-2 es una calidad intermedia entre las dos clases estructurales; EC1 y ECO de la norma uruguaya. Ambas normas se basan en el principio de la determinación de grados estructurales en función de la limitación de las singularidades (defectos) referidos a la anatomía de la madera.

3. Metodología

Antes de armar la loseta se verifica el porcentaje del contenido de humedad (% CH) de cada viga, con un xilohigrómetro digital Delmhorst J-2000 y mediante un ensayo no destructivo, con un equipo Sylvatest se determina el Módulo de elasticidad medio (E_m) de las vigas aplicando la fórmula (1). Posteriormente, se compara el resultado obtenido con la clasificación visual.

$$E_m = \frac{c^2 \rho}{g} \quad (\text{Kg/cm}^2) \quad (1)$$

Donde E_m = módulo de elasticidad medio c = velocidad de propagación de la onda ρ = densidad media madera de pino g = constante de aceleración gravitacional.

3.1. Fabricación de las losetas

Se fabricaron 6 losetas de 61cm x 330 cm, con 2 vigas de pino de sección 2" x 6", clasificada visualmente como ME-2 o ECO, unidas al tablero OSB con clavos de 2 1/2" cada 10 cm en toda la longitud y adhesivo PVA, tal como muestra la Figura 1.

En este artículo se analizan los resultados de los ensayos de 6 losetas fabricadas con madera de pino proveniente de una barraca de Montevideo (las barracas ofertan madera de diferentes aserraderos).

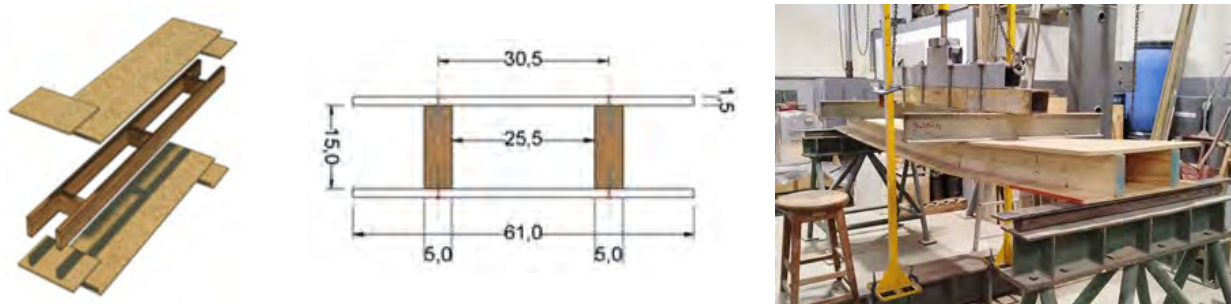


Figura 1. a. Loseta con 2 vigas y dimensiones. b. Ensayo a flexión estática hasta la rotura en el Pórtico de carga .

3.2. Ensayos físicos y mecánicos

Se realizaron 3 tipos de ensayos: a) Ensayo para determinar la densidad y el contenido de humedad (CH) en pequeñas probetas libres de defectos según las normas uruguayas UNIT 237:2007 y 223-2:2007. b) Ensayos a flexión estática a tamaño real de las vigas de pino según norma nacional UNIT 1191:2010 y c) Ensayos a flexión estática hasta la rotura, para conocer las propiedades resistentes de las losetas de pino de acuerdo a la norma americana ASTM E 72-15.

Las losetas se ensayan en un Pórtico de carga equipado con prensa hidráulica ENERPAC de 15 toneladas, manómetro digital ENERPAC modelo DGP de 1000 PSI. La norma ASTM E72-15 establece el método para comprobar la resistencia de las losetas a las cargas verticales permanentes y de uso.

Procedimiento: Sobre una loseta simplemente apoyada se aplica la carga en dos puntos ubicados en los dos cuartos centrales. La carga se incrementa gradualmente y se mide la deformación en tres instancias: deformación inicial producida en cada incremento de carga en el período elástico del material; deformación en un período de 5 minutos manteniendo la carga; retiro de la carga y registro de la deformación residual en cada escalón de carga. Al final sin medir la deformación se lleva la carga en forma continua hasta la rotura de la loseta.

Con los registros de carga/deformación del ensayo destructivo se determina la carga en la zona de proporcionalidad entre el 10% y 40% de la carga de rotura y se calcula el Módulo de elasticidad medio (E_m).

4. Consideraciones finales

La resistencia mecánica de la madera para uso estructural necesariamente debe determinarse mediante ensayos a tamaño real, aplicando normas nacionales que sean representativas de la producción forestal. Actualmente, en el mercado local no es tan frecuente encontrar madera de pino de la calidad EC1 para uso estructural.

Sería recomendable definir en la norma UNIT 1261 una calidad intermedia entre EC1 y EC0 porque el Módulo de elasticidad medio de las vigas a tamaño real, ensayadas a flexión estática hasta la rotura ($E_m = 84600 \text{ daN/c}^2$) y el Módulo de elasticidad medio de las vigas obtenido con el Sylvatest ($E_m = 78629 \text{ daN/c}^2$) son superiores al Módulo de elasticidad de la norma UNIT 1261 para la calidad EC0, $E_m = 53270 \text{ daN/c}^2$. De ese modo se podría reducir el porcentaje de madera que no califica para uso estructural y permitiría un mejor aprovechamiento de la madera aserrada de pino disponible en el país para usos menos exigentes.

En base al valor del Módulo de elasticidad de la norma UNIT 1261 se puede asignar la calidad visual ECI para elementos estructurales trabajando a flexión a la clase resistente C14 de la norma española UNE - EN 338:2017, es decir, a la menor clase resistente. La calidad visual ECO por presentar valores menores no se corresponde con ninguna clase resistente de la norma europea, podría asimilarse a una calidad C11.

Se destaca que el valor del Módulo de elasticidad medio de las losetas obtenido experimentalmente, $E_m = 49366 \text{ daN/c}^2$ es inferior al valor $E_m = 53270 \text{ daN/c}^2$ en flexión de la norma UNIT 1261 para la calidad visual ECO. El valor E_m derivado de los ensayos a flexión de las losetas es meramente indicativo, para resultados más concluyentes es necesario realizar un mayor número de ensayos de losetas de pino con madera proveniente de otras zonas del país.

Se pudo observar en los ensayos de las losetas que el pino a menores cargas, presenta deformaciones instantáneas y residuales mayores que las losetas fabricadas con eucalipto (ensayadas en el proyecto original).

Otra de las cuestiones claves en relación a la construcción en madera es que aún no existe una normativa nacional única que regule este tipo de construcciones como si existe en relación a la Seguridad frente al fuego, aunque en los diferentes Departamentos del país se limita o incluso se *prohíbe su uso* en entresijos y estructuras portantes en el régimen de propiedad horizontal.

1123

MODELO DE RESISTÊNCIA PELA DENSIDADE BÁSICA COMO PARÂMETRO COMPLEMENTAR EM INSPEÇÕES DE ESTRUTURAS DE MADEIRA

Abner Braga¹; João Pantoja¹

¹ Universidade de Brasília

Palabras clave / Palavras-chave:

Estimativas de resistência, Inspeção visual, Madeira tropical, Métodos não-destrutivos

Resumen / Resumo:

Edificações estruturadas em madeira necessitam de um plano de manutenção além de um acompanhamento periódico das condições em que a estrutura se encontra, para manter suas condições de desempenho. Os métodos mais comuns para inspeção em madeira são aqueles caracterizados como não-destrutivos. Em especial, a inspeção visual é uma das metodologias mais utilizadas quando da realização de um serviço diagnóstico de engenharia. A partir da inspeção da edificação Maloca da Universidade de Brasília é feita a estimativa de resistência de seus elementos estruturais. O estudo utilizou dados da inspeção realizada no edifício em questão. A estimativa foi feita a partir do novo modelo de resistência via densidade básica. Este modelo estima diferentes parâmetros de resistência a partir da densidade básica da espécie de madeira utilizada. Os modelos de resistência adotados para as diferentes solicitações foram aqueles prescritos pela norma de madeira brasileira. Os resultados apontam que a metodologia proposta é condizente com o desempenho e os níveis de degradação encontrados durante a inspeção. Por fim conclui-se que a metodologia pode ser uma importante ferramenta auxiliar para análise e acompanhamento das condições de utilização e segurança de uma edificação em madeira.

1. Introdução

1.1. Inspeção em estruturas de madeira

O Brasil tem grande potencial de utilização da madeira como material estrutural. Somente na Amazônia estima-se a presença de 3000 a 4000 espécies de árvores tropicais [3]. Uma das maiores preocupações com relação à madeira diz respeito a conservação deste material. As principais causas de degradação da madeira são: agentes biológicos; atmosféricos; químicos ou o fogo [4].

Como pontua Cruz [5], as manutenções em estruturas de madeira exigem conhecimentos específicos e experiência por parte de quem os executa. Em outro trabalho, Cruz [6] apresenta uma série de princípios gerais com relação à inspeção e ao monitoramento em estruturas de madeira. As metodologias de

inspeção são tradicionalmente classificadas em destrutivas e não-destrutivas. Dentre estas, as mais comuns e utilizadas se baseiam na Inspeção Visual [4].

Martins [7] em sua dissertação apresenta uma metodologia de inspeção e diagnóstico baseada em análise visual. Ele utiliza a metodologia em um estudo de caso de um Mosteiro em Felgueiras – Portugal concluindo que a inspeção visual é um bom método para avaliação de estruturas de madeira.

Analogamente, Milani e Kripka [8] utilizam métodos visuais e o uso de fotografias para inspecionar elementos de madeira de pontes do município de Pato Branco – Paraná, Brasil. Abreu et al. [9] também fazem uso de ensaios não-destrutivos para avaliação de peças de madeira do Sobrado Ramalho em Tiradentes – MG, Brasil. Ambos os autores chegam a conclusões relevantes e precisas a respeito das origens e patologias dos diversos elementos inspeccionados.

Em mais um estudo de caso, Moreira [10] realiza o uso da inspeção visual em um edifício no centro histórico de Viseu – Portugal. Neste trabalho a autora consegue expor em uma situação real como a correta utilização de inspeções em estruturas existentes pode contribuir significativamente para a conservação e reabilitação de edifícios históricos.

O Laboratório de reabilitação do Ambiente Construído (LabRAC) da UnB realizou um Laudo Técnico de Engenharia Diagnóstica Predial [1] da Maloca da Universidade de Brasília (UnB). O presente trabalho almeja, a partir de dados obtidos das inspeções realizadas, a estimativa da resistência de elementos estruturais do edifício em questão.

1.2. Modelo de resistência pela densidade básica

O dimensionamento de elementos estruturais em aço utiliza como principal parâmetro a tensão de escoamento à tração (f_y) [12] enquanto o concreto utiliza a resistência característica à compressão (f_{ck}) [11]. Em ambos os casos, são parâmetros simples e de fácil obtenção. Uma das dificuldades históricas para o dimensionamento de elementos em madeira advém do fato de que sempre foi necessário diferentes parâmetros para determinação de cada uma das propriedades mecânicas do material.

Sabe-se que há uma forte correlação entre propriedades físicas da madeira, como sua densidade, e as demais propriedades de resistência e elasticidade relevantes para um dimensionamento estrutural. De Paula [13] e Bessa [14] são proponentes do estudo dessas correlações através de modelos estatísticos de regressão. Os pesquisadores utilizaram a densidade básica, propriedade de fácil compreensão e aferição precisa, como variável independente do estudo estatístico e o Banco de Dados do LPF [15] como fonte idônea de dados representativos da realidade.

Os principais parâmetros de resistência utilizados para dimensionamento em madeira são: Módulo de Elasticidade à Flexão; Resistência para Tensão de Ruptura na Flexão; Resistência à Compressão Paralela às Fibras; Resistência à Compressão Perpendicular às Fibras e Resistência ao Cisalhamento. Para cada um desses parâmetros foi encontrada uma função de correlação com a Densidade Básica para madeira verde e madeira seca.

Assim, com o uso das correlações da Densidade Básica este trabalho objetiva estimar a resistência de elementos estruturais existentes com informações obtidas de inspeções realizadas na maloca da UnB.

2. Metodologia

O Laudo Técnico da Maloca [1] foi elaborado a partir de uma lista de verificações de manifestações patológicas em estruturas de madeira. Baseado nesta lista a degradação dos elementos estruturais foi quantificada levando em consideração o estado de conservação e a extensão das patologias identificadas. Por fim foi calculado um Fator de Degradação (FD) para cada um dos elementos inspecionados. Os dados foram obtidos predominantemente a partir de análise visual dos elementos.

Os elementos estruturais selecionados para o estudo deste trabalho foram Vigas e Pilares. Apesar de haverem elementos de ligação avaliados no Laudo Técnico, estes não foram selecionados para análise devido à maior complexidade dos esforços aos quais estão sujeitos. Para os pilares admitiu-se que estavam sujeitos somente à compressão centrada e para as vigas somente solicitação de flexão reta simples.

As considerações adotadas foram: elementos atuando com madeira seca; Estados Limites Últimos e de Serviço prescritos pela NBR 7190/2022; Módulo de Elasticidade estrutural como sendo o Módulo de Elasticidade à Flexão [13].

A partir dos Fatores de Degradação de cada uma das peças, foi feita uma “punição” na Densidade Básica proporcional ao FD, que é dado em porcentagem. Com a redução da Densidade Básica, foi aplicado os novos valores à formulações de resistência da NBR 7190 [2] para estimar as novas resistências características de cada elemento estudado. Por fim, foi feita a comparação entre as resistências originais e as encontradas com a metodologia proposta.

3. Resultados

A estrutura da maloca foi projetada e executada utilizando-se madeira da espécie *Corymbia citriodora* (Eucalipto Citriodora) [1]. Portanto, para as avaliações necessárias foi considerado para todos os elementos estudados uma Densidade Básica de $0,674 \text{ g/cm}^3$ (ou 674 Kg/m^3) [16]. Considerou-se as peças todas com seção circular de diâmetro 30 cm – para pilares – e 25 cm – para vigas.

A Tabela 1 apresenta um compilado com todos os dados obtidos após a execução das etapas descritas anteriormente para os elementos de pilares. Nela é possível encontrar para cada elemento estudado o fator de degradação (FD); a Densidade Básica reduzida (Dbr); o valor característico da resistência à compressão original (R_c) e o novo valor reduzido (R_{cr}). Além disto é apresentado a diferença percentual entre o valor da resistência reduzido e o valor original.

Tabela 1. Dados obtidos para os pilares

Elemento	FD	Dbr (g/cm^3)	R_c (Kgf)	R_{cr} (Kgf)	Diferença
P22	0,16%	0,673	209294,86	208932,54	-0,17%
P40	0,16%	0,673	209294,86	208932,54	-0,17%
P47	2,49%	0,657	209294,86	203656,24	-2,69%
P48	2,49%	0,657	209294,86	203656,24	-2,69%
P38	4,13%	0,646	209294,86	199942,45	-4,47%
P46	4,13%	0,646	209294,86	199942,45	-4,47%
P09	78,9%	0,142	209294,86	30625,50	-85,37%

A Tabela 2 também apresenta um compilado de dados obtidos porém para os elementos de vigas. Nela é possível encontrar para cada elemento estudado o fator de degradação (FD); a Densidade Básica reduzida (Dbr); o valor característico da resistência à flexão reta simples original (Rm) e o novo valor reduzido (Rmr). Além disto é apresentado a diferença percentual entre o valor da resistência original e o valor reduzido.

Tabela 2. Dados obtidos para as vigas

Elemento	FD	Dbr (g/cm ³)	Rm (Kgf)	Rmr (Kgf)	Diferença
VT42	0,05%	0,674	846633,26	846151,62	-0,06%
VG02	0,11%	0,673	846633,26	845573,65	-0,13%
VG05b	0,11%	0,673	846633,26	845573,65	-0,13%
BR31	0,11%	0,673	846633,26	845573,65	-0,13%
VG25b	0,83%	0,668	846633,26	838638,04	-0,94%
VG05d	1,26%	0,666	846633,26	834495,94	-1,43%
VG11	2,67%	0,656	846633,26	820913,70	-3,04%
VG34	2,67%	0,656	846633,26	820913,70	-3,04%
VG40	9,05%	0,613	846633,26	759456,48	-10,30%
VG28	17,36%	0,557	846633,26	679407,96	-19,75%
VG06	26,30%	0,497	846633,26	593290,29	-29,92%
VG07	26,30%	0,497	846633,26	593290,29	-29,92%
VG08	26,30%	0,497	846633,26	593290,29	-29,92%

4. Conclusões

Os resultados obtidos utilizando a metodologia proposta foram bastante satisfatórios. Ao se comparar os valores de resistência novos com os originais observa-se quedas majoritariamente inferiores a 10%. Tais valores estão de acordo com o que se espera quando se compara com os próprios Fatores de Degradação obtidos do Laudo da Maloca [1].

Destaca-se aqui que o elemento com a maior perda de resistência foi o Pilar P09 com 85,37% de perda. Por se tratar de um pilar, elemento estrutural de suma importância para a estabilidade e segurança de uma estrutura, recomenda-se que seja feita intervenção e manutenção com urgência. Os demais elementos apresentaram perdas menores mas ainda significativas e portanto também devem ser tratados para garantir o bom desempenho da edificação.

Por fim conclui-se que a metodologia proposta neste trabalho gerou respostas condizentes com a própria inspeção realizada no edifício. Apresenta-se portanto como ótima ferramenta auxiliar quando da execução de serviços de inspeção, fornecendo valores específicos no que diz respeito à estabilidade e desempenho estrutural de diferentes elementos em madeira.

Tal qual para a inspeção visual, estima-se que o modelo de resistência pela densidade básica possa ser utilizada também com outros métodos de inspeção não-destrutivos a fim de estimar parâmetros de resistência sem a necessidade de avariar ou causar grandes danos a uma estrutura existente.

Referências

- [1] Laboratório de Reabilitação do Ambiente Construído (2022) Laudo Técnico de Engenharia Diagnóstica Predial: Maloca – Centro de Convivência Multicultural dos Povos Indígenas da Universidade de Brasília.
- [2] Brazilian standard (2022) NBR 7190. Projeto de Estruturas de Madeira. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro, Brasil.
- [3] Laboratório de Produtos Florestais – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (2016) <http://sistemas.florestal.gov.br> [online].
- [4] Arriaga, F.; Peraza, F.; Esteban, M.; Bobadilla, I.; García, F. (2002) Intervencion en Estructuras de Madera. Artes Gráficas Palermo, S.L. Madrid. 466 p.
- [5] Cruz, H. (2011) Inspeção, Avaliação e Conservação de Estruturas de Madeira. Atas da 1ª Jornada de Materiais na Construção. Porto, Portugal. Pp. 215-227.
- [6] Cruz, H. (2012) Inspeção e monitorização de estruturas de madeira. Seminário Coberturas de Madeira, P.B. Lourenço e J.M. Branco (eds.) 2012. Pp. 43-54.
- [7] Martins, S. (2009) Estruturas de Madeira – Inspeção e Diagnóstico. Aplicação em Caso de Estudo. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia. Universidade do Minho, Braga, Portugal. 262 p.
- [8] Milani C.; Kripka M. (2012) A Identificação de Patologias em Pontes de Madeira: Diagnóstico realizado no Sistema Viário do Município de Pato Branco – Pasraná. REEC – Revista Eletrônica de Engenharia Civil Nº4 Vol. 1. Pp. 23-33.
- [9] Abreu, L.; Lima, T.; Rabelo, G.; Gomes, F.; Trugilho, P.; Eloy, F. (2013) Avaliação Não Destrutiva de estruturas de Madeiras em Edifício Histórico de Tiradentes, MG. Cerne, Lavras, v.19, n.3. Pp. 481-487.
- [10] Moreira, M. (2009) Reabilitação de Estruturas de Madeira em Edifícios Antigos – Estudo de Caso. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto, Porto, Portugal. 170 p.
- [11] Brazilian standard (2023) NBR 6118. Projeto de Estruturas de Concreto. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro, Brasil.
- [12] Brazilian standard (2008) NBR 8800. Projeto de Estruturas de Aço e de estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro, Brasil.
- [13] De Paula, J. (2023) Sobre o Dimensionamento de Estruturas de Madeira Tropical Utilizando a Densidade Básica. Tese de Doutorado. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Universidade de Brasília. Brasília, Brasil.
- [14] Bessa, M. (2018) Dimensionamento de estruturas de Madeira Tropical Utilizando a Densidade Básica – Madeira Seca. Tese de doutorado. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Universidade de Brasília. Brasília, Brasil.
- [15] IBAMA – instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (1997) IBAMA, Madeiras da Amazônia: Caracterização e Utilização – Amazônia Orinetal. Brasília: Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis Vol. V.3. p. 141.
- [16] Zanuncio, A.; Carvalho, A.; Silva, L.; Lima, J.; Trugilho, P.; Silva, J. (2015) Predicting Moisture Content from Basic Density and Diameter during drying of Eucalyptus and Corymbia Logs. Maderas. Ciencia y tecnologia 17(2). Pp. 335-344.

1124

MODELO LINK-FRAME PARA MUROS DE MADERA DE ENTRAMADO LIGERO Y CLT Y SU APLICACIÓN EN UN EDIFICIO CON VARIANTES DE RIGIDEZ DE LA LOSA FUERA DEL PLANO

Nicol López¹; Sebastián Barrios¹; Sebastián Berwart Astudillo¹; Sebastián Guindos¹

¹ CENAMAD

Palabras clave / Palavras-chave:

Modelación, Muros, Madera, Marco – plataforma, CLT

Resumen / Resumo:

Los sistemas estructurales de madera son una alternativa sostenible para edificaciones en el contexto de alta concentración urbana. Además, su bajo peso implica una baja demanda sísmica frente a otros materiales. El creciente interés por la construcción en madera requiere comprender su comportamiento mediante una correcta modelación. Existen softwares específicos (Timbertech, Stimber, entre otros), pero los de mayor uso en oficinas de ingeniería son ETABS y SAP2000. En este trabajo se propone un modelo de muros de corte de madera de marco-plataforma (MP) y de CLT, implementado en ETABS, denominado Modelo Link-Frame. El modelo consiste en un marco de frame horizontales rígidos axial y flexuralmente y link verticales bilineales con la rigidez del anclaje; y dos link diagonales bilineales con la rigidez de las otras fuentes de deformación del muro. El modelo se aplicó a nivel de muro aislado en un muro MP de 4 pisos y en un muro de CLT de 6 pisos. También se aplicó a nivel de edificio, donde la interacción con la losa genera efectos tridimensionales. Los resultados de período, desplazamientos y esfuerzos a nivel de muro coinciden con los analíticos y se representa la ecuación de deformación lateral de la norma SDPWS incluyendo giro acumulado. A nivel de edificio, las solicitaciones de tracción y los desplazamientos se redujeron debido a los efectos tridimensionales.

1. Introducción

La construcción en madera en países sísmicos presenta desafíos en diseño y modelación, los cuales se deben enfrentar debido a su creciente interés. El diseño de muros, según las normas [1-3], se basa en hipótesis simplistas: (1) muros como vigas en voladizo, (2) vuelco no restringido, (3) carga axial no aporta en la deformación. Existen softwares específicos como S-timber y Timbertech; pero lo más usados son ETABS o SAP2000. El objetivo de este trabajo es proponer un modelo simple de muros de madera de marco-plataforma (MP) y CLT, que represente las normativas.

La norma SDPWS [1] tiene ecuaciones para la deflexión lateral de muros de MP y de CLT. La Ecuación (1) para MP incluye tres fuentes de rigidez: flexión de los pies derechos, corte del tablero y clavado,

y vuelco por los anclajes. La Ecuación (2) para CLT incluye cinco fuentes de rigidez: flexión y corte del panel, vuelco por los anclajes, y corte por conectores horizontales e inter-paneles. De las ecuaciones, v es el corte por unidad de largo, L y h es la largo y alto del muro, E y A_{ext} es el módulo de elasticidad y área de los pies derechos de borde, G_a es la rigidez de corte aparente, Δ_a es la deformación del anclaje, b_s es el ancho de panel CLT, EI_{eff} y GA_{eff} son la rigidez flexural y de corte efectivo del panel, y $\Delta_{clavo,h}$ y $\Delta_{clavo,v}$ son el deslizamiento de los conectores horizontales y verticales.

$$\delta_{MP} = \left(\frac{2vh^3}{3EA_{ext}L} \right)_{\text{Flexión}} + \left(\frac{vh}{G_a} \right)_{\text{Corte}} + \left(\frac{\Delta_a h}{L} \right)_{\text{Vuelco}} \quad (1)$$

$$\delta_{CLT} = \left(\frac{vb_s h^3}{3EI_{eff}} \right)_{\text{Flexión}} + \left(\frac{vh}{GA_{eff}} \right)_{\text{Corte}} + \left(\frac{\Delta_a h}{L} \right)_{\text{Vuelco}} + (3\Delta_{clavo,h})_{\text{Corte horizontal}} + \left(2\Delta_{clavo,v} \frac{h}{b_s} \right)_{\text{Corte inter-panel}} \quad (2)$$

La norma SDPWS [1] no incluye giro acumulado por flexión y volcamiento, a diferencia de la norma CSA O86 [2] que sí los considera en un muro aislado de varios pisos. La norma prEC5 [3] incluye los giros acumulados por flexión, vuelco y compresión perpendicular. A nivel de edificio, se generan efectos tridimensionales debido a la interacción entre muros y losa. Bagheri [4] estudió la rigidez fuera del plano de la losa, y concluyó que es razonable suponer una rigidez infinita.

2. Descripción del modelo link-frame

El Modelo Link-Frame (MLF), consiste en un marco compuesto por frame horizontales, links bilineales verticales, y dos links bilineales diagonales. Es adecuado para modelar muros de MP y de CLT. El muro se modela con un largo igual al brazo palanca que resiste el momento volcante. El peso propio se aplica como una carga uniformemente distribuida sobre el frame superior, el cual es muy rígido axial y flexuralmente. Los links verticales en tracción representan el anclaje o rigidez por vuelco y en compresión tienen una rigidez igual a 10^6 kN/m. Los links diagonales en compresión representan las otras fuentes de rigidez del muro y se divide por $\cos^2(\alpha)$ para llevarla a una diagonal, y en tracción es mínima e igual a 10^{-5} kN/mm. La tracción del muro se obtiene del esfuerzo axial del link vertical, y el corte es el esfuerzo axial del link diagonal sobre su longitud por el largo modelado. El modelo se analizó a nivel de muro aislado y a nivel de edificio.

2.1. Muro de marco-plataforma

El muro en sistema marco-plataforma corresponde al F.1 de [5] de largo 4,74 m, alto de 2,47 m y de 4 pisos. La rigidez de la diagonal se determina según la Ecuación (3), donde K_f es la rigidez a flexión y K_v es rigidez a corte. En la Tabla 1 se presenta la fuerza lateral, la rigidez del anclaje y la rigidez de la diagonal por piso. Se modeló el muro en ETABS y se obtuvieron los desplazamientos acumulados de la columna 5, los cuales se compararon porcentualmente con la estimación analítica de la norma SDPWS [X]. La diferencia es cercana al 0%, al igual que los esfuerzos.

$$K_{diag} = \frac{\left(\frac{1}{m \cdot K_f} + \frac{1}{m \cdot K_v} \right)^{-1}}{\cos^2(\alpha)} \quad (3)$$

Tabla 1. Comparación de desplazamiento lateral acumulado entre MLF y SDPWS para muro de MP

Piso	Fuerza lateral (kN)	Rigidez anclaje (kN/mm)	Rigidez diagonal (kN/mm)	Desp. acumulado MLF (mm)	Dif. con estimación SDPWS (%)
Piso 4	10,42	2,37	7,42	26,24	0,037 %
Piso 3	4,51	4,90	10,85	16,88	0,035 %
Piso 2	3,51	6,97	19,46	8,95	0,036 %
Piso 1	2,91	8,30	38,06	3,23	0,029 %

2.2.Muro de clt

El MLF permite modelar muros de panel único y de multi-panel. El estudio [6] presenta un ejemplo que utiliza la Ecuación (2) para estimar la deflexión de un muro de panel único ($L = 3,048$ m, $h = 1,524$ m) de seis pisos. Se replicó el ejemplo, y también se estudió un muro multi-panel con las mismas cargas y configuración de panel para comparar con la norma SDPWS [X]. El cálculo de rigidez de la diagonal se determina según la Ecuación (4), donde m es el número de paneles, K_f y K_v es rigidez a flexión y corte del panel, y K_{SLH} y K_{SLV} es la rigidez a corte de conectores horizontales y verticales. Los desplazamientos del MLF y su diferencia con la Ecuación (2) se presentan en la Tabla 2.

$$K_{diag} = \left(\frac{1}{m \cdot K_f} + \frac{1}{m \cdot K_v} + \frac{1}{m \cdot K_{SLH}} + \frac{1}{m/2 \cdot K_{SLV}} \right)^{-1} \cos^2(\alpha) \quad (4)$$

Tabla 2. Comparación de desplazamiento lateral acumulado entre MLF y SDPWS para muro de CLT

Piso	Fuerza lateral (kN)	Rigidez anclaje (kN/mm)	Muro de 1 panel			Muro de 3 paneles		
			Rigidez diagonal (kN/mm)	Desp. acumulado MLF (mm)	Dif. con estimación SDPWS (%)	Rigidez diagonal (kN/mm)	Desp. acumulado MLF (mm)	Dif. con estimación SDPWS (%)
Piso 6	9,71	6,01	17,94	214,77	0,006%	8,68	22,54	0,005%
Piso 5	24,17	24,04	27,67	161,37	0,004%	16,75	7,768	0,004%
Piso 4	21,85	56,54	47,53	111,40	0,004%	28,54	5,958	0,002%
Piso 3	0,68	78,21	60,17	69,75	0,003%	33,69	4,181	0,002%
Piso 2	0,38	102,59	70,35	37,16	0,004%	37,37	2,754	0,008%
Piso 1	7,33	129,17	75,56	14,10	0,001%	41,69	1,469	0,021%

3. Aplicación en edificio

El caso de estudio se basa en el edificio de 4 pisos de [5], donde se diseña según la metodología analítica, donde no se presentan los efectos tridimensionales. El edificio de 4 pisos está conformado en sistema marco-plataforma. Tiene una altura libre por piso de 2,47 m., es de uso residencial, se ubica en zona sísmica 2 de Chile, tiene suelo tipo C y factor de modificación de respuesta de 5,5. El peso sísmico es de 2915 kN, el coeficiente sísmico máximo es 0,126 y el corte basal es $Q_x = Q_y = 367$ kN. Las fuerzas laterales por piso son 50 kN, 60 kN, 76 kN y 181 kN. El método analítico de [7] no admite un análisis 3D, por lo que se analizó por plano XZ e YZ. En este estudio se conservó el análisis sísmico, los muros se modelaron mediante MLF, y la losa se modeló con elementos membrana y frame. La losa se estudió con 4 variantes: de MP con propiedades reales, flexibles y rígidas, y de CLT, para evaluar la rigidez fuera del plano de la losa.

El edificio se analizó por plano para comparar con la metodología de [5] donde los resultados analíticos solo admiten análisis por eje y no capturan los efectos tridimensionales. El período de MLF es $T_x = 0,292s$ y $T_y = 0,281s$, y según el método de [5] es $T_x = 0,272s$ y $T_y = 0,260$, con diferencia del 7% con respecto a MLF. En la Figura 1 se presenta el drift del sismo X en el eje X según el método analítico de la SDPWS con y sin vuelco acumulado, y según el MLF con las variantes de rigidez de la losa. MLF con losa MP C16 presenta menores desplazamientos que el método analítico debido a los efectos tridimensionales. Con losa flexible, el edificio tiene un comportamiento similar a considerar el vuelco acumulado. MLF con losa de CLT tiene un comportamiento cercano a una losa rígida. En la Figura 2 se muestra la distribución de tracción mediante el método analítico y MLF con las 4 variantes de losa. El método analítico y MLF con losa flexible no capturan los efectos tridimensionales y la tracción es mayor que con MLF con losa MP C16, de CLT y rígida. En estos últimos casos la tracción se reduce incluso en un 80%, producto de los efectos tridimensionales. Con respecto al esfuerzo de corte, se tiene una distribución similar entre los métodos.

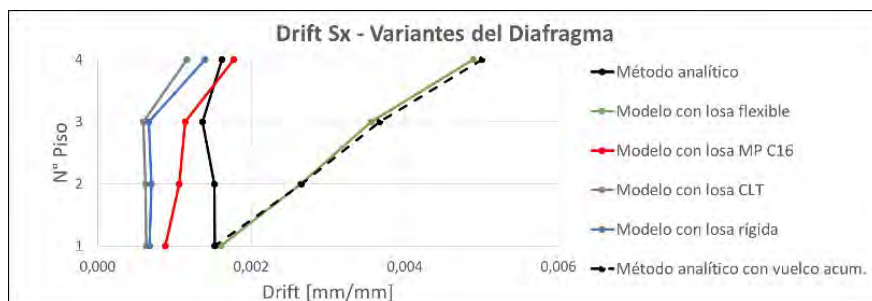


Figura 1. Drift (mm/mm) del edificio según distintos métodos

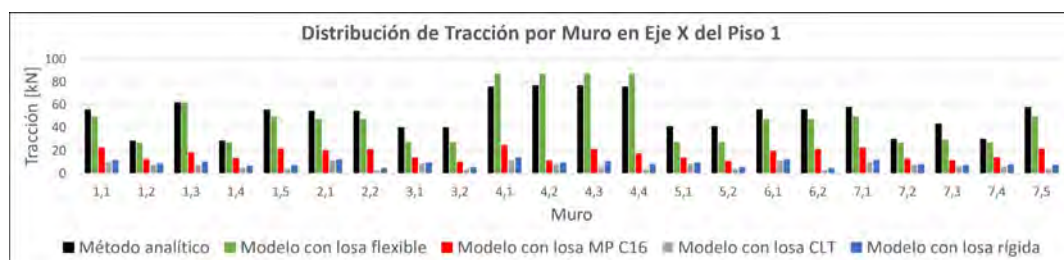


Figura 2. Distribución de tracción según distintos métodos

4. Conclusiones

Si bien existen softwares específicos y modelos simples y detallados de muros de madera, no existe consenso en la modelación de muros. En Chile la mayoría de las oficinas de ingeniería están familiarizadas con los softwares de modelación ETABS y/o SAP2000. En este trabajo se propone el Modelo Link-Frame implementado en ETABS para muros de MP y CLT, el cual representa la deflexión lateral de la norma SDPWS [1]. El modelo se aplicó en muros aislados de varios pisos, donde se observaron los efectos acumulados y se obtuvieron los mismo resultados a. También se estudió a nivel de edificio, donde se presentaron los efectos tridimensionales, los que reducen considerable los esfuerzos de tracción y desplazamientos.

Agradecimientos

Esta investigación fue financiada por el Centro Nacional de Excelencia de para Industria de la Madera (ANID BASAL FB210015 CENAMAD) y Centro UC de Innovación en Madera (CIM UC).

Referencias

- [1] North american standard (2021) ANSI/AWC SDPWS-2021. Special design provisions for wind & seismic with commentary, Leesburg, VA, USA.
- [2] Canadian standard (2019) CSA O86-19. Engineering design in wood. Mississauga, Ontario, Canada.
- [3] European standard draft (2023) prEN 1995-1-1:20XX. Eurocode 5: Design for timber structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings.
- [4] Bagheri, M., & Doudak, G.. (2021). Experimental and numerical study on the deflection of multi-storey light-frame timber shear walss. Engineering Structures, 233. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.111951>
- [5] Centro UC de innovación en Madera. (2021). Manual de Diseño de Estructuras de Madera (1° ed.).
- [6] van de Lindt, J.; Amini, M.O.; Rammer, D.; Line, P.; Pei, S.; Popovski, M. (2022). Determination of seismic performance factors for cross-laminated timber shear walls based on FEMA P695 methodology. General Technical Report FPL-GTR-281 [Determinación de factores de rendimiento sísmico para muros cortantes de madera contralaminada basada en la metodología FEMA P695. Reporte técnico general FPL-GTR-281]. Madison, WI: US. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. <https://doi.org/10.2737/FPL-GTR-281>
- [7] Norma chilena (2009) NCh 433. Of96: Diseño Sísmico de Edificios. Instituto Nacional de Normalización, Santiago, Chile.

1125

MÓDULO DE RIGIDEZ DEL MULTIMATERIAL DE MADERA-ADHESIVO-MALLA DE *PINUS PSEUDOSTROBUS* (PINO), *TABEBUIA ROSEA* (ROSA MORADA) Y *QUERCUS SCYTOPHYLLA* (ENCINO)

Sonia Correa Jurado¹; Javier Ramón Sotomayor Castellanos¹; Israael Macedo Alquicira¹

¹ Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Palabras clave / Palavras-chave:

Características mecánicas, Densidad de la madera, Materiales para construcción, Vibraciones en torsión

Resumen / Resumo:

La industria de la construcción con madera demanda materiales normalizados y con características mecánicas bien definidas. Al combinar placas de madera sólida con mallas, tejidos y con los adhesivos adecuados, la madera se transforma en un multimaterial. El módulo de rigidez de la madera es útil para el cálculo de elementos y conexiones donde aparecen deformaciones fuera de plano, ocasionadas por esfuerzos cortantes. El objetivo de la investigación fue determinar la densidad y el módulo de rigidez de la madera de *Pinus pseudostrobus* (pino), *Tabebuia rosea* (rosa morada) y *Quercus scytophylla* (encino), así como del multimaterial formado con estas especies. Se prepararon tres grupos de probetas con pequeñas dimensiones de madera sólida y tres grupos de multimaterial madera-malla-adhesivo. Se realizaron pruebas de vibración en torsión, se midieron las frecuencias de vibración y se calcularon los módulos de rigidez. Para las tres especies, la densidad y el módulo de rigidez del multimaterial aumentan respecto al de la madera sólida. La densidad no es, en todos los casos, un buen predictor del módulo de rigidez. Comparativamente con la madera sólida, el multimaterial se prospecta como una mejora tecnológica para su incorporación en la fabricación de productos y elementos estructurales de madera.

1. Introducción

La industria de la construcción con madera demanda materiales normalizados y con características mecánicas bien definidas. Así, la tendencia tecnológica es desarrollar productos compuestos y derivados de madera con el objetivo de reemplazar elementos de madera, cuya heterogeneidad estructural y variabilidad natural requieren de sobredimensionado para asegurar los requisitos de seguridad y de servicio. De esta manera, al combinar la madera con mallas, tejidos y fibras, con los adhesivos adecuados, la madera se transforma en un multimaterial que, por las propiedades de sus componentes obtiene una mejora tecnológica para aplicaciones especializadas [1].

El módulo de rigidez de la madera es útil para el cálculo de elementos y conexiones donde aparecen deformaciones fuera de plano, ocasionadas por esfuerzos cortantes [2]. Información sobre el módulo de rigidez de la madera está publicada para una amplia biodiversidad de especies [3]. Sin embargo, a la fecha no se detecta información sobre la caracterización en torsión del multimaterial madera-malla-adhesivo empleando las tres especies mencionadas.

Las maderas de pino, rosa morada y encino son endémicas de México y Centroamérica y son ampliamente utilizadas en la industria de la edificación y de productos de madera. Sus características físicas y tecnológicas mecánicas están divulgadas por [4].

Durante el proceso constructivo, la edificación con madera incorpora madera, tableros aglomerados de fibra, partículas y astillas, así como madera laminada [5]. En este contexto, el multimaterial madera-malla-adhesivo se considera un material de ingeniería que puede sustituir piezas de madera que funcionan como elementos estructurales y/o arquitecturales. El objetivo de la investigación fue determinar la densidad y el módulo de rigidez de la madera de pino, rosa morada y encino, así como del multimaterial formado con estas especies.

2. Materiales y métodos

2.1. Materiales

Se prepararon seis grupos de 17 probetas cada uno. Tres de ellos son de madera sólida de pino, rosa morada y encino con dimensiones de $0,01\text{ m} \times 0,15\text{ m} \times 0,15\text{ m}$ en las direcciones radial, tangencial y longitudinal respectivamente. Los otros tres grupos están formados por probetas de multimaterial madera-malla-adhesivo, las cuales están constituidas por dos placas de madera de las mismas especies, pero con dimensiones de $0,01\text{ m} \times 0,15\text{ m} \times 0,15\text{ m}$ (Figura 1). Estas dos placas están unidas ortogonalmente en las direcciones tangencial y longitudinal con una combinación de dos componentes de adhesivo de poliuretano repartidos 200 kg m^{-2} . Entre las dos placas se posicionó una malla de acero galvanizado con espesor de $0,92\text{ mm}$. Los tres materiales se consolidaron con presión de 250 kg m^{-2} y temperatura de $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 1 h . Así se formaron seis muestras independientes y homogéneas: tres de madera y tres de multimaterial. Los taxones botánicos de las maderas se determinaron en la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México.

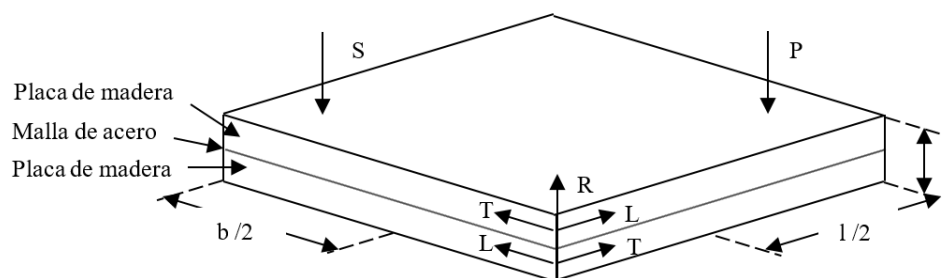


Figura 1. Diagrama de las pruebas de vibraciones en torsión. P : posición para aplicar el impacto; S : posición para medir la frecuencia natural; R : dirección radial (t : espesor); T : dirección tangencial (l : largo); L : dirección longitudinal (b : ancho).

2.2. Métodos

Las probetas se almacenaron durante seis meses en una cámara de acondicionamiento con temperatura de 20 °C y humedad relativa del aire de 65 % hasta que alcanzaron un contenido de humedad en equilibrio de la madera de 10 % y el del multimaterial de 11 %. El contenido de humedad de las probetas se determinó adaptando la norma ISO 13061-1:2014 [6], mientras que, la densidad de la madera se calculó adaptando la norma ISO 13061-2:2014 [7]. Las pruebas de vibración en torsión adaptaron el protocolo de la norma ASTM C1259-14 [8]. El módulo de rigidez de la madera por vibraciones en torsión se calculó con la Ecuación (1) [9]:

$$G_{LT} = \frac{4 \, l \, m \, f^2}{b \, t} \left[\frac{B}{(1 + A)} \right] \quad (1)$$

Donde G_{LT} = Módulo de rigidez ($N \, m^{-2}$), f = Frecuencia natural (Hz), m = masa de la probeta (g), l = Largo de la probeta (Dirección tangencial) (m), t = Espesor de la probeta (Dirección radial) (m), b = Ancho de la probeta (Dirección longitudinal) (m) y A y B = Factores de ajuste geométrico.

3. Resultados y discusión

A medida que la densidad aumenta, el módulo de rigidez se incrementa. Para las tres especies, se observa un aumento en las densidades y módulos de rigidez del multimaterial respecto a la madera sólida (Tabla 1). Las diferencias en magnitudes del módulo de rigidez reportadas en la bibliografía son atribuibles a la especie [10] y al método de cálculo [11]. La estructura anatómica de las tres maderas estudiadas es diferente [4], pero las pruebas dinámicas se realizaron en las mismas condiciones. Así, la variación de la resistencia elástica en torsión aquí reportada es atribuible principalmente a la especie.

Tabla 1. Densidades y módulos de rigidez

	Madera sólida		Multimaterial	
	ρ_{CH} ($kg \, m^{-3}$)	G_{LT} ($MN \, m^{-2}$)	ρ_{CH} ($kg \, m^{-3}$)	G_{LT} ($MN \, m^{-2}$)
Pino	608 (67*)	1075 (177)	664 (68)	1131 (170)
Rosa morada	774 (58)	1560 (283)	835 (63)	1593 (206)
Encino	913 (20)	1289 (74)	980 (22)	1347 (66)

ρ_{CH} = Densidad; G_{LT} = Módulo de rigidez; * Desviación estándar entre paréntesis.

Las magnitudes del módulo de rigidez de la madera de pino, rosa morada y encino son similares a las reportadas para especies mexicanas con densidades similares. En el mismo sentido, la densidad es un buen predictor del módulo de rigidez. Así, los valores del multimaterial de pino, rosa morada y encino se sitúan en la tendencia que predice la correlación $G_{LT} = 2,10 \, \rho_{CH} - 172$, con $R^2 = 0,92$ (Figura 2).

El análisis de varianza establece que para la madera de pino y la de rosa morada no existen diferencias significativas entre los valores del módulo de rigidez (madera versus multimaterial). Así, estas especies se diferencian de la de encino, para la cual sí existe una diferencia significativa. Sin embargo, aritméticamente el módulo de rigidez del multimaterial aumenta en promedio 4% en comparación con el de la madera.

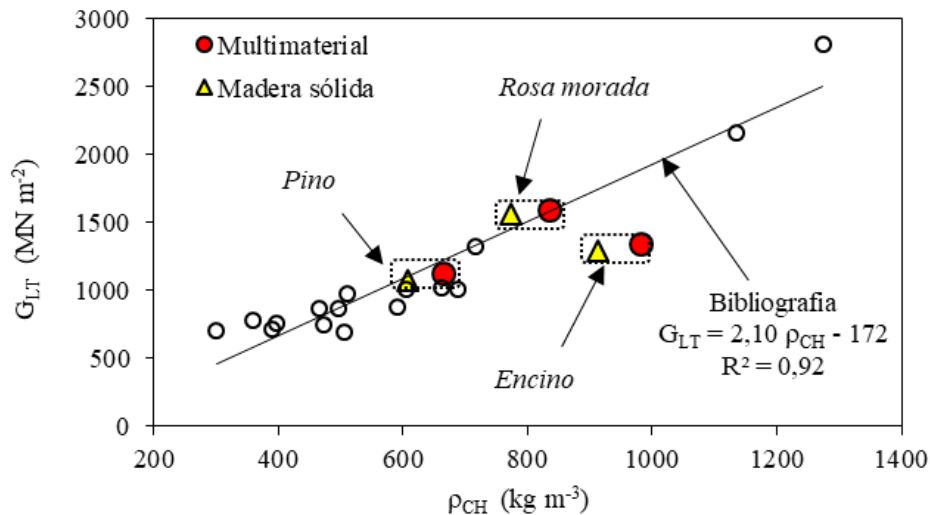


Figura 2. Densidades y módulos de rigidez

4. Conclusiones

Para las tres especies, la densidad y el módulo de rigidez del multimaterial aumentan respecto al de la madera sólida. En el mismo sentido, la densidad de la madera sólida es un buen predictor del módulo de rigidez ya que a medida que la densidad aumenta, el módulo de rigidez se incrementa proporcionalmente.

El multimaterial caracterizado propone transformar las propiedades naturales de la madera en un producto manufacturado con su módulo de rigidez optimizado y, al mismo, tiempo puede disminuir la variabilidad natural del material biológico constitutivo de origen. Comparativamente con la madera sólida, el multimaterial se prospecta como una mejora tecnológica para su incorporación en la fabricación de productos y elementos estructurales de madera.

Agradecimientos

La investigación estuvo patrocinada por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México y por el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías, México.

Referencias

- [1] Kohl, D.; Long, T. H. N.; Böhm, S. (2017) Wood-Based Multi-Material Systems for Technical Applications – Compatibility of Wood from Emerging and Developing Countries. *Procedia Manufacturing*. 8:611–618. doi.org/10.1016/j.promfg.2017.02.078
- [2] Cavalli, A.; Cibecchini, D.; Goli, G.; Togni, M. (2017) Shear modulus of old timber. *iForest*. 10:446–450. doi.org/10.3832/ifor1787-009
- [3] Macedo-Alquicira, I.; Bedolla-Arrollo, J.; Raya-González, D.; Rutiaga-Quñones, J. G.; Castro-Sánchez, F. J.; Sotomayor-Castellanos, J. R. (2022) Pruebas de torsión dinámica de madera sólida y de multimaterial de *Fagus crenata*. *Bosques Latitud Cero*. 12:93–102. doi.org/10.54753/blc.v12i2.1486

- [4] Tamarit-Urias, J. C.; López-Torres, J. L. (2007) Xilotecología de los principales árboles tropicales de México. INIFAP. México. 264 p.
- [5] Jacob, M.; Harrington, J.; Robinson, B. (2018) The Structural Use of Timber Handbook for Eurocode 5: Part 1-1. COFORD. Dublin. 94 p.
- [6] International Organization for Standardization (2014) ISO 13061-1:2014. Physical and mechanical properties of wood. Test methods for small clear wood specimens. Part 1: Determination of moisture content for physical. International Organization for Standardization (ISO), Geneva, Switzerland.
- [7] International Organization for Standardization (2014) ISO 13061-2:2014. Physical and mechanical properties of wood. Test methods for small clear wood specimens. Part 2: Determination of density for physical and mechanical tests. International Organization for Standardization (ISO), Geneva, Switzerland.
- [8] American Society for Testing and Materials (2015) ASTM C1259-15. Standard test method for dynamic Young's modulus, shear modulus, and Poisson's ratio for advanced ceramics by impulse excitation of vibration. American Society for Testing and Materials (ASTM). West Conshohocken, U.S.A.
- [9] American Society for Testing and Materials (2015) ASTM E1876-15. Standard test method for dynamic Young's modulus, shear modulus, and Poisson's ratio by impulse excitation of vibration. American Society for Testing and Materials (ASTM). West Conshohocken, U.S.A.
- [10] Rocco Lahr, F. A.; Christoforo, A. L.; Donizeti Varanda, L.; Chahud, E.; Almeida De Araujo, V.; Melgaço Nunes Branco, L. A. (2017) Shear and longitudinal modulus of elasticity in wood: relations based on static bending tests. *Acta Scientiarum. Technology*. 39:433–437. doi.org/10.4025/actascitechnol.v39i4.30512
- [11] Krüger, R.; Wagenführ, A. (2020) Comparison of methods for determining shear modulus of Wood. *European Journal of Wood and Wood Products*. 78:1087–1094. doi.org/10.1007/s00107-020-01565-2

1126

NBR 7190:2022 - PROJETO DE ESTRUTURAS DE MADEIRA: NOVOS CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO

Carlito Calil Júnior¹; Felipe Hideyoshi Icimoto²; Leandro Dussarrat Brito¹

¹ LaMEM/SET/EESC/USP

² Urbem

Palabras clave / Palavras-chave:

Engenharia civil, Madeira engenheirada, Projetos estruturais

Resumen / Resumo:

A primeira norma brasileira de estruturas de madeira foi publicada em 1951 denominada por NB11:1951 Cálculo e execução de estruturas de madeira, que utilizava o método das tensões admissíveis. Em fevereiro de 1982, sem quaisquer modificações passou a ser denominada por NBR7190:1982. Em 1992 iniciavam-se estudos desta norma utilizando-se para dimensionamento o método dos estados limites. Esta versão foi publicada em 1997 denominada por NBR7190:1997 Projeto de estruturas de madeira, com ênfase na utilização de madeiras nobres. Em 2002 foram iniciados novos estudos para revisão da NBR7190:1997. À medida que as pesquisas iam avançando foram sendo realizados novos estudos de critérios de dimensionamento e de métodos de ensaios. Os grandes avanços nas pesquisas foram os estudos de ligações e de produtos engenheirados de madeira. Como resultado a nova norma de projeto de estruturas de madeira NBR7190:2022 está distribuída em sete partes, a saber: Parte 1: Critérios de dimensionamento; Parte 2: Métodos de ensaio para classificação visual e mecânica de peças estruturais de madeira; Parte 3: Métodos de ensaio para corpos de prova isentos de defeitos para madeiras de florestas nativas; Parte 4: Métodos de ensaio para caracterização de peças estruturais; Parte 5: Métodos de ensaio para determinação da resistência e da rigidez de ligações com conectores mecânicos; Parte 6: Métodos de ensaio para caracterização de madeira lamelada colada estrutural; Parte 7: Métodos de ensaio para caracterização de madeira lamelada colada cruzada estrutural. Partes destas novas normas foram fundamentadas em critérios utilizados em normas internacionais, tais como EUROCODE, ASTM e ISO.

1. Introdução

A nova norma brasileira de projeto de estruturas de madeira é fundamentada no conceito de dimensionamento dos Estados Limites. No passado o método de dimensionamento era feito pelo método das Tensões Admissíveis de 1982, passando para um método semi-probabilístico dos Estados Limites em 1997, utilizando-se um coeficiente de calibração para converter propriedades de resistência média tabeladas para características, em 5% dos valores de efeitos de carga e resistências. Este

artigo tem como objetivo apresentar os critérios da Nova Norma Brasileira para Projeto de Estruturas de Madeira, e Métodos de Ensaio, denominada por ABNT NBR 7190:2022, relacionando a nova revisão para recomendações de classificação estrutural para madeiras macias e folhosas plantadas no Brasil. Assim, são apresentados detalhes de sistemas estruturais e construtivos engenheirados em Madeira Lamelada Colada (MLC), e Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC), indicando recomendações de proteção contra incêndio, preservação para projeto e novos tipos de ligações com conectores mecânicos industrializados. O objetivo geral desta norma é fixar as principais condições que devem ser tomadas na concepção dos projetos, construção e controle para execução das atuais estruturas de madeira, tais como: pontes, edifícios, coberturas, tabuleiros e fôrmas.

2. Propriedades dos materiais

As propriedades a considerar no dimensionamento de estruturas de madeira são: densidade, resistência, rigidez e teor de umidade. As propriedades especificadas de resistência e rigidez correspondem à classe de teor de umidade de 12%, ou seja, 20 graus Celsius e 65% de umidade relativa.

A nova versão da norma considera dois tipos de caracterização das propriedades dos materiais com base em corpos de prova isentos de defeitos para madeiras nativas e ensaios de peças estruturais para madeiras de reflorestamento. O segundo tipo corresponde à caracterização da madeira estrutural baseada na madeira comercial com todos os defeitos como nós, fissuras, inclinação da fibra, empenamento, etc.

As classes de resistência para as madeiras de florestas nativas são definidas cinco classes de resistência: D20, D30, D40, D50 e D60. Já para as espécies de madeiras de reflorestamento as classes de resistência são obtidas através de ensaios de resistência à flexão, sendo 12 classes de resistência para madeiras coníferas: C14, C16, C18, C20, C22, C24, C27, C30, C35, C40, C45, C50; e 8 classes de resistência para folhosas: D18, D24, D30, D35, D40, D50, D60, D70.

Outra questão importante é que a nova norma adota os critérios de projeto de estabilidade baseados no EUROCODE 5 EN 1995-1-1:2009. Os valores de cálculo X_d de uma propriedade da madeira são obtidos a partir do valor característico X_k , através das equações:

$$X_d = K_{mod} \frac{X_k}{\gamma_w} \quad (1)$$

$$k_{mod} = k_{mod1} \cdot k_{mod2} \quad (2)$$

Onde: $K_{mod,1}$ considera a classe de carregamento e o tipo de material utilizado; e o $K_{mod,2}$ considera a classe de umidade e o tipo de material a ser utilizado; Para os Estados Limites Últimos (ELU) decorrentes de tensões normais $\gamma_w = 1,4$; e para ELU decorrentes de tensões de cisalhamento $\gamma_w = 1,8$; já para os Estados Limites de Serviço (ELS) $\gamma_w = 1,0$.

3. Ligações em elementos estruturais de madeira

A versão anterior da norma (ABNT NBR 7190: 1997) considerava-se apenas dois modelos para o dimensionamento de ligações utilizando pinos metálicos, sendo, para a hipótese de embutimento na

madeira ou a hipótese de flexão do pino. A proposta versão atual da norma adota-se os modelos utilizados no EUROCODE 5 EN 1995-1-1:2009. Os modos para uma e duas seções de cisalhamento usando madeira-madeira; para uma e duas seções de cisalhamento usando chapa de aço-madeira e madeira-chapa de aço-madeira. Os principais tipos de ligações que podem ser empregados são pregos, parafusos e anéis metálicos.

4. Métodos de ensaio

Para realizar métodos de ensaios, a nova versão da norma Brasileira NBR 7190:2022, Projeto de Estruturas de Madeira, constitui-se em 6 partes, sendo:

- Parte 2[3]: Métodos de ensaio para classificação visual e mecânica de peças estruturais de madeira;
- Parte 3[4]: Métodos de ensaio para corpos de prova isentos de defeitos para madeiras de florestas nativas;
- Parte 4[5]: Métodos de ensaio para caracterização de peças estruturais;
- Parte 5[6]: Métodos de ensaio para determinação da resistência e da rigidez de ligações com conectores mecânicos;
- Parte 6[7]: Métodos de ensaio para caracterização de Madeira Lamelada Colada (MLC) estrutural;
- Parte 7[8]: Métodos de ensaio para caracterização de Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC) estrutural; Esta

5. Estruturas de madeira em situação de incêndio

A nova versão da NBR 7190:2022-1 considera critérios para análise de estruturas de madeira em situação de incêndio, que representa a elevação da temperatura em função do tempo, definida pela NBR 5628. A segurança estrutural relativa aos estados limites de incêndio é imposta pela análise de segurança dada por:

$$S_{fi,d} \leq R_{fi,d} \quad (3)$$

Onde: $S_{fi,d}$ é obtido por combinações excepcionais de ações definidas pela ABNT NBR 8681 ou pode ser dimensionado considerando 60% das ações de projeto em situações normais (20°C), ou seja, $S_{fi,d} = 0,60 S_d$. O valor de $R_{fi,d}$ é determinado de acordo com:

$$R_{fi,d} = k_{mod,fi} \frac{R_{0,2}}{\gamma_{w,fi}} \quad (4)$$

Onde: $k_{mod,fi}$ é 1,0 e inclui os efeitos da redução da resistência e rigidez da madeira; $\gamma_{w,fi}$ é 1,0 e $R_{0,2}$ deve ser dimensionado pelo projeto em temperatura normal, porém considerando a redução de área e as propriedades mecânicas substituídas pelo valor de 20% .

6. Durabilidade da madeira: sistema de categorias de uso

De acordo com a nova NBR 7190:2022-1[1], a madeira por se tratar de um material orgânico deve receber análise prévia das condições em que é aplicada, para identificar a necessidade de tratamento preservativo específico, buscando obter durabilidade e resistência aos agentes biodeterioradores da madeira, como fungos e insetos xilófagos e perfuradores marinhos. A preservação de madeiras é o conjunto de medidas preventivas e curativas adotadas para controle de agentes biológicos (fungos e insetos xilófagos e perfuradores marinhos), físicos e químicos que afetam as propriedades da madeira, adotadas no desenvolvimento e na manutenção dos componentes de madeira no ambiente construído. O projeto de estruturas de madeira deve ser elaborado considerando os riscos de degradação da madeira e, buscando minimizá-los, assim, deve-se aplicar a ABNT NBR 16143[9]. O propósito do Sistema de Categorias de Uso é oferecer uma ferramenta simplificada para a tomada de decisão quanto ao uso racional e inteligente da madeira, por meio de uma abordagem sistêmica ao produtor e usuário, que assegure maior durabilidade das construções. O sistema consiste no estabelecimento de seis categorias de uso baseadas nas condições de exposição ou uso da madeira, na expectativa de desempenho do componente e nos possíveis agentes biodeterioradores presentes (Tabela 1).

Tabela 1. Categorias de uso da madeira.

Categoria de uso	Condição de uso da madeira	Organismo xilófago
1	Interior de construções, fora de contato com o solo, fundações ou alvenaria, protegidos das intempéries, das fontes internas de umidade e locais livres do acesso de cupins-subterrâneos ou arborícolas.	Cupim-de-madeira-seca Broca-de-madeira
2	Interior de construções, em contato com a alvenaria, sem contato com o solo ou fundações, protegidos das intempéries e das fontes internas de umidade.	Cupim-de-madeira-seca Broca-de-madeira Cupim-subterrâneo Cupim-arborícola
3	Interior de construções, fora de contato com o solo e protegidos das intempéries, que podem, ocasionalmente, ser expostos a fontes de umidade.	Cupim-de-madeira-seca Broca-de-madeira Cupim-subterrâneo Cupim-arborícola Fungo embolorador/manchador Fungo apodrecedor
4	Uso exterior, fora de contato com o solo e sujeitos as intempéries.	
5	Contato com o solo, água doce e outras situações favoráveis à deterioração, como engaste em concreto e alvenaria.	
6	Exposição à água salgada ou salobra.	Perfuradores marinhos Fungo embolorador/manchador Fungo apodrecedor

Fonte: ABNT NBR 7190: 2022-1[1].

7. Conclusões

A nova versão da norma Brasileira para Projeto de Estruturas de Madeira, a ABNT NBR7199: 2022 trata-se de uma normalização para projeto e dimensionamento de elementos estruturais de madeira a ser realizado através do método “load and resistance factored design” (LRFD), que considera as recomendações de classificação estrutural para madeiras coníferas e folhosas, plantadas na América do Sul com atenção especial para a produção e projeto de peças estruturais de madeiras engenheiradas, destacando-se peças de madeira lamelada colada e de madeira lamelada colada cruzada. Também são apresentadas as regras para classificação e colagem com as espécies de reflorestamento.

Esta nova versão adota-se o projeto de modelos de ligações utilizados de acordo com os critérios do EUROCODE 5, EN 1995-1-1: 2009: Projeto de estruturas de madeira.

A ideia principal era ter uma norma muito semelhante para todos os países da América do Sul.

Referencias

- [1] Brazilian standard (2022) NBR 7190: 2022 - Parte 1. Projeto de estruturas de madeira, Critérios de dimensionamento. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro, Brasil.
- [2] SALES, A. (1996). Proposição de classes de resistência para madeira. Tese de doutorado. Escola Politécnica. Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil. 223 p.
- [3] Brazilian standard (2022) NBR 7190: 2022 - Parte 2. Projeto de estruturas de madeira - Métodos de ensaio para classificação visual e mecânica de peças estruturais de madeira. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro, Brasil.
- [4] Brazilian standard (2022) NBR 7190: 2022 - Parte 3. Projeto de estruturas de madeira - Métodos de ensaio para corpos de prova isentos de defeitos para madeiras de florestas nativas. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro, Brasil.
- [5] Brazilian standard (2022) NBR 7190: 2022 - Parte 4. Projeto de estruturas de madeira - Métodos de ensaio para caracterização de peças estruturais. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro, Brasil.
- [6] Brazilian standard (2022) NBR 7190: 2022 - Parte 5. Projeto de estruturas de madeira - Métodos de ensaio para determinação da resistência e da rigidez de ligações com conectores mecânicos. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro, Brasil.
- [7] Brazilian standard (2022) NBR 7190: 2022 - Parte 6. Projeto de estruturas de madeira - Métodos de ensaio para caracterização de madeira lamelada colada. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro, 2022.
- [8] Brazilian standard (2022) NBR 7190: 2022 - Parte 7. Projeto de estruturas de madeira - Métodos de ensaio para caracterização de madeira lamelada colada cruzada estrutural. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro, Brasil.
- [9] Brazilian standard (2013) NBR 16143: 2013. Preservação de Madeiras - Sistema de Categorias de Uso. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro, Brasil.

1128

NUEVOS CAMINOS PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE CÚPULAS DE MADERA DE LAZO ESTRUCTURAL

Ángel María Martín López¹; Wesam Al Asali²

¹Centro de Interpretación de la Carpintería Mudéjar de Ávila;

²IE University

Palabras clave / Palavras-chave:

Carpintería de lazo, Carpintería de lo blanco, Cúpulas de madera, Girdshells

Resumen / Resumo:

La Carpintería de Lazo ofrece una visión valiosa de la estructura, fabricación y ensamblaje de los techos de madera históricos en España. Aunque la práctica totalidad de las techumbres se han construido en superficies planas, hay algunos ejemplos de cúpulas esféricas de madera [1]. Concretamente son tres las cúpulas históricas que quedan en España y como ejemplo paradigmático la situada en los Reales Alcázares de Sevilla supuso el modelo a seguir de las construidas posteriormente. Estas últimas se generaron mediante la división por meridianos de la esfera, por lo cual la regularidad del trazado se interrumpía, teniendo que resolver su continuidad por simetría. Un subproducto de esta irregularidad fue la fabricación de elementos personalizados que no son intrínsecos al patrón alojado en la esfera de la cúpula [2].

Este artículo se aparta de los ejemplos históricos para explorar el futuro de la Carpintería de Lazo esférica, siguiendo las reglas propio del oficio. La primera corresponde al trazado canónico de ruedas de lazo con brazos paralelos, y la segunda al entrelazo alternativo con construcción apeinazada (Figura 1). Estas reglas siempre respetan las proporciones tradicionales y repiten la “rueda de lazo”, lo que evita su deformación y la discontinuidad de sus elementos constituyentes.

La investigación, desarrollada a través de modelos experimentales que culminan en una cúpula de madera a escala 1:1 con un diámetro aprox. de 4 metros (Figura 2), proporciona una hoja de ruta para la exploración y aplicación futura de cúpulas de Lazo estructurales, como por ejemplo el uso de madera curvada y laminada con la curvatura de la cúpula para la fabricación de los camones, a lo que, mediante plantillas desarrolladas a través del diseño de lacería, se les da la forma para servir como unidades de construcción.

Esta investigación examina tres puntos claves: diseño, estructura y fabricación. Primero, introduce un método de diseño geométrico para trazar y acomodar diseños regulares de ruedas de Lazo en una superficie esférica, que se basa en la integración del lazo en una trama geométrica poligonal que en su proyección ortogonal sobre la esfera proporciona la citada regularidad del trazado sin distorsión

alguna por todo el espacio. Este método de segmentación muestra varios ejemplos de soluciones de patrones de carpintería de lazo esférico (Figura 3). Segundo, presenta un método de diseño estructural que integra de manera solidaria la estructura de la cúpula con el Lazo, alejándose de la práctica histórica de separar elementos estructurales y decorativos (Figura 3). El estudio aproxima el patrón de lazo que ha sido generado en el diseño a principios de cúpulas de madera estructural, como la triangulación geodésica. Con este método, el trazado del lazo determina exactamente la localización de los encuentros para practicar los ensambles necesarios y de este modo aunar diseño y estructura desde el inicio del proyecto. Tercero, la investigación aborda la estrategia de fabricación, optimizando los elementos discretos en las cúpulas de Lazo y detallando la conexión de sus componentes mediante sistemas de ensamblaje tradicionales a media madera (Figura 4). La investigación tiene posibles aplicaciones en la construcción de estructuras aproximadas a las estructuras laminares reticulares (gridshells).

En resumen, la investigación sobre la Carpintería de Lazo esférica representa una evolución significativa en las estructuras de madera en España. La introducción de un método geométrico para el trazado de diseños regulares, la integración temprana de la estructura de la cúpula con el Lazo y la estrategia optimizada de fabricación ofrecen un enfoque renovado y práctico. Esta investigación no solo respeta las tradiciones de la Carpintería de Lazo, sino que también allana el camino para su aplicación contemporánea que destaca el potencial para futuras exploraciones y aplicaciones en la construcción de estructuras.



Figura 1. Exploración del modelo de una cúpula de madera de lazo hecha de ruedas de 12 y 10.

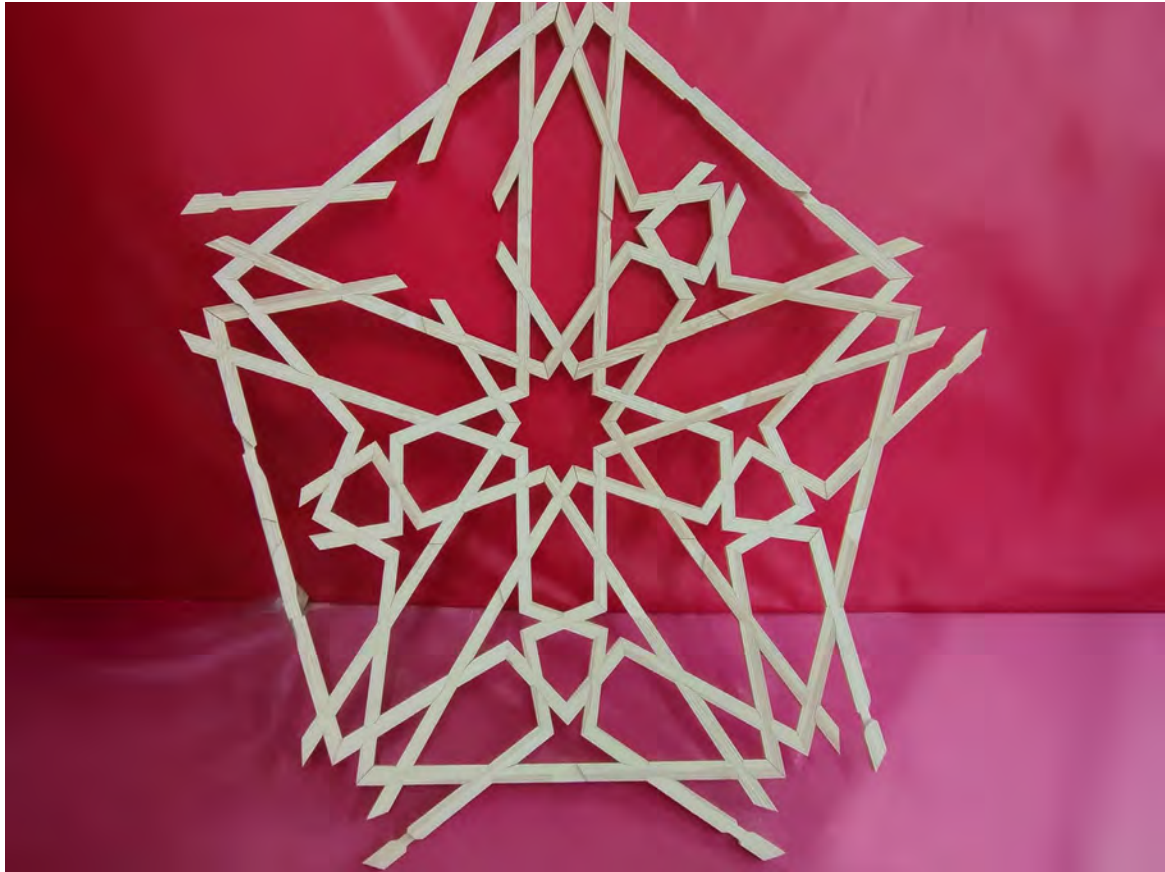


Figura 2. Fabricacion de cúpula de madera de lazo 4 metros hecha de ruedas de 12 y 10. (para reemplazar)

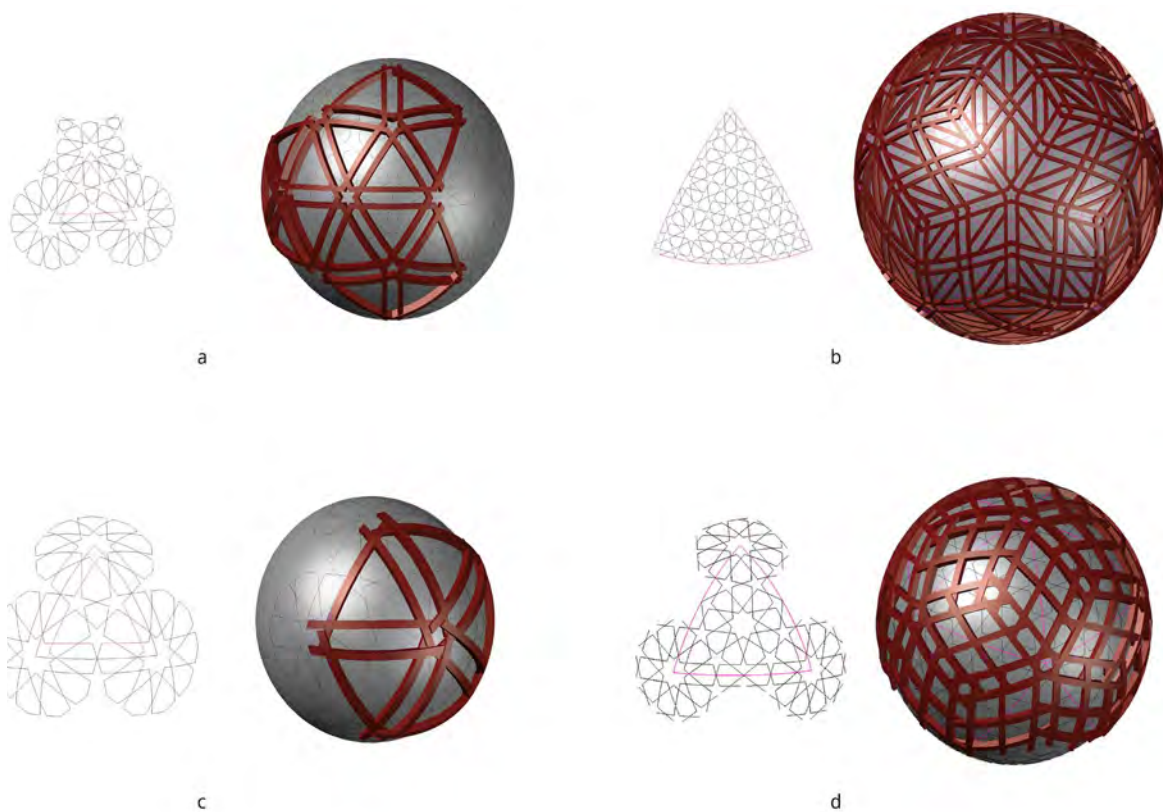


Figura 3. Estudio de posibilidades de geometría y diseño de diferentes cúpulas de lazo de: ruedas de 10 y 12 (a), ruedas de 10 y 9 (b), ruedas de 10 (c), y ruedas de 9 y 10 (d).

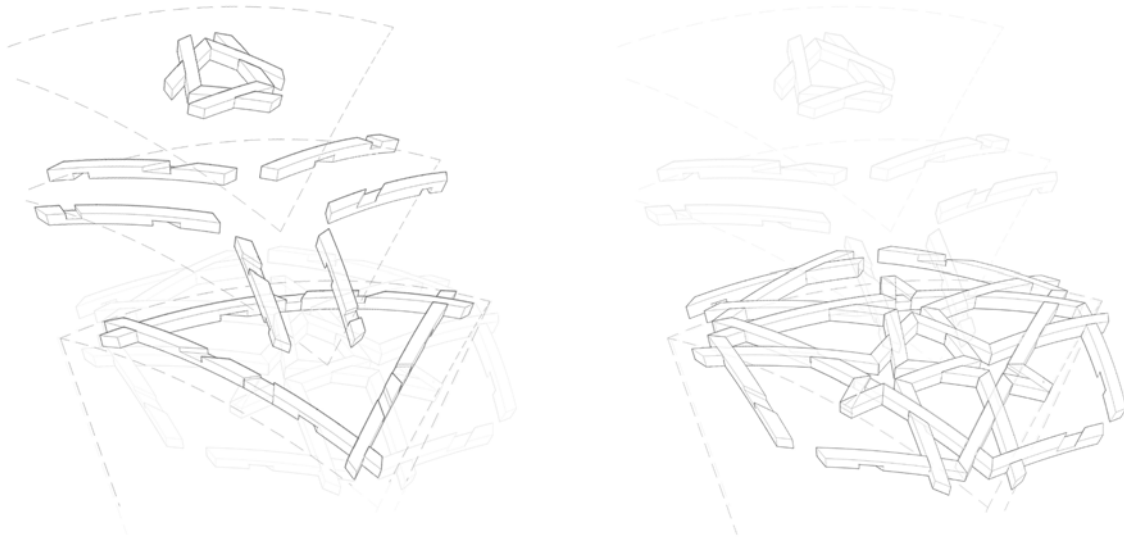


Figura 4. Estudio esquemático de las juntas y ensamblaje en las diferentes partes de la cúpula.

Referencias

- [1] E. Nuere, 'La carpintería de armar española, inicio de la prefabricación en la arquitectura', *Materia Arquitectura*, no. 15, Art. no. 15, Aug. 2017.
- [2] J. de Mingo García and Á. María Martín, 'Cúpulas en la carpintería de lazo: Historia, trazado y propuesta de desarrollo con la geometría esférica y las normas del oficio como base', *Journal of Traditional Building, Architecture and Urbanism*, no. 2, pp. 290–304, 2021.

1129

EL ESCENARIO DE LA MADERA DE INGENIERÍA EN BRASIL. O CENÁRIO DA MADEIRA ENGENHEIRADA NO BRASIL

Ana Carolina Belizario¹; Elton Sousa¹; Fabiana Oliveira¹; Clara Queiroz¹

¹ Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo

Palabras clave / Palavras-chave:

Industrialização da construção, Madeira engenheirada, Madeira lamelada colada, Madeira lamelada colada cruzada

Resumen / Resumo:

No contexto da crescente preocupação ambiental e busca por soluções sustentáveis na construção civil brasileira, a madeira engenheirada surge como uma alternativa promissora. Este estudo visa fornecer uma visão abrangente do cenário atual desse setor no Brasil, destacando fatores que influenciam significativamente sua escolha como componente estrutural. Adotando inicialmente uma abordagem teórica, a pesquisa bibliográfica apresentou as tendências e desafios associados ao uso da madeira engenheirada no setor da construção civil brasileira, com enfoque em MLCC e MLC, ou seja, Glulam e Cross Laminated Timber – CLT, respectivamente. A coleta de dados ocorreu entre outubro e novembro de 2023, incorporando fontes bibliográficas, documentais e questionários via Google Forms junto às empresas identificadas nesse ramo. Apesar do setor de madeira engenheirada no Brasil estar em ascensão, enfrenta obstáculos como custos elevados e resistência cultural à sua adoção, influenciada por uma tradição consolidada em materiais convencionais. Atualmente concentrado no sul-sudeste do país, o custo elevado desses elementos estruturais restringe sua aplicação a um nicho econômico específico. No entanto, o crescente interesse impulsionado pela sustentabilidade sugere uma possível aceleração na adoção dessas tecnologias.

1. Introdução

Com o crescimento da preocupação ambiental e a busca por alternativas mais sustentáveis na construção civil, a madeira engenheirada tem emergido como uma opção viável no Brasil, mesmo que, culturalmente haja no país a preferência pelo uso de materiais e sistemas tradicionais para o setor construtivo, tem-se vislumbrado essa perspectiva positiva para as construções. Os sistemas em madeira engenheiradas englobam uma ampla gama de técnicas, das quais é possível destacar a Madeira Lamelada Colada (MLC) e a Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC) (Figura 1) mais presentes no território brasileiro. A MLC é utilizada na fabricação de vigas, pilares e outros elementos estruturais, produzida pela colagem de lamelas de madeira paralelas umas às outras [1]. A MLCC, ou em inglês *Cross Laminated Timber* (CLT) é empregada na fabricação de painéis e envolve a união de lamelas de madeira maciça, dispostas em camadas perpendiculares umas às outras e aderidas com adesivos de alta resistência [2,3].

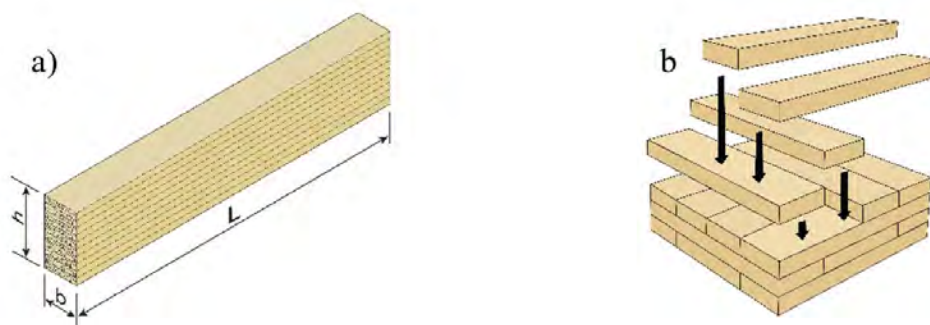


Figura 1. Exemplos de madeira engenheiradas. a) Madeira Lamelada Colada (MLC); b) Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC). [4-5, com adaptações do autor]

No Brasil, a mais recente versão da norma, a NBR 7190 [6] que trata sobre o projeto e dimensionado de estruturas em madeira, ampliou a gama de produtos em madeira abrangidos, e passou a incluir o *Cross Laminated Timber* que recebeu a denominação de Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC), o MLC por sua vez, já era regulamentado por esta normativa desde 1997. Essa atualização trouxe melhorias substanciais no que diz respeito às diretrizes para a durabilidade desses sistemas [7]. No país, a produção industrializada de edifícios em madeira envolve diversos aspectos da cadeia de produção, indo além do projeto e abrangendo fatores econômicos, logísticos e culturais [8, 9].

As empresas de madeira engenheiradas não recebem a mesma atenção que aquelas envolvidas com materiais mais convencionais, como concreto e aço. E para se promover esse conhecimento e difusão, é essencial compreender o desenvolvimento desse segmento no país. A partir dessas informações, é possível avaliar a extensão da adoção dessas tecnologias pela indústria na realidade brasileira. Portanto, este estudo tem como objetivo apresentar de maneira abrangente o atual cenário da madeira engenheirada no Brasil, evidenciando alguns fatores que influenciam a sua escolha como componente estrutural no contexto nacional.

2. Metodologia de pesquisa

Este estudo foi elaborado por meio de uma abordagem documental, caracterizada por sua natureza descritiva e qualitativa. Foi realizada pesquisa bibliográfica direcionada à análise das tendências, avanços e desafios relacionados ao uso de madeira engenheirada no contexto brasileiro. O escopo da pesquisa também se concentrou na compreensão holística do panorama nacional quanto à produção de tecnologias como MLCC e MLC. O período de coleta de dados compreendeu os meses de outubro e novembro de 2023, durante os quais foram exploradas fontes bibliográficas e documentais, tais como manuais técnicos e artigos científicos. Adicionalmente, a pesquisa estendeu-se aos websites das empresas pertinentes, sendo conduzida por meio das ferramentas de busca do Google. Além dessa abordagem, implementou-se um questionário estruturado, distribuído via plataforma Google Forms, visando a obtenção de insights qualitativos junto às empresas identificadas.

3. cenário da madeira engenheirada no brasil

Por meio das pesquisas com as empresas de madeira engenheirada no Brasil, percebe-se um pequeno número de indústrias, concentradas principalmente na região Sudeste-Sul do país (Figura 1). São

empresas com estabilidade consolidada e com um forte compromisso em ampliar a adoção desses sistemas [8]. Há ainda de salientar que algumas empresas identificadas na literatura já não estão mais em atividade como a Laminarco, que encerrou suas atividades ainda na década de 1980 e a Esmara, cujas operações cessaram em 2019. Essa concentração geográfica não é apenas reflexo da atividade industrial, mas também está intrinsecamente ligada à distribuição das maiores extensões de florestas plantadas especialmente de Pinus e Eucalipto (espécies utilizadas no Brasil para fabricação dos elementos estruturais), principalmente nessas regiões.

As florestas plantadas são essenciais para o setor, fornecendo matéria-prima de forma sustentável e contribuindo para a preservação dos biomas nativos. É importante mencionar que as florestas plantadas no Brasil se encontram no bioma Mata Atlântica (Figura 1), são plantadas para fins comerciais – a luz do manejo florestal – e possuem certificação, não possuindo conexão com a extração de madeira da Amazônia. A ênfase na origem da madeira, proveniente de florestas plantadas e não de áreas nativas, destaca a responsabilidade ambiental do setor, mitigando preocupações relacionadas ao desmatamento.

x



Figura 2. Empresas de madeira engenheirada no Brasil [10-11, com adaptações do autor]

O mercado para a madeira engenheirada no Brasil, ainda é majoritariamente para construções de “Alto Padrão”, ou seja, empreendimentos marcados para pessoas com alto poder executivo, exclusividade e com um alto valor de mercado [12]. Esse fato é consequência do custo ainda considerado elevado em comparação com materiais tradicionais como concreto e argamassa, como também, pela ainda baixa procura por esse tipo de construção. Essa diferença no custo está intrinsecamente ligada à qualidade e à inovação que a madeira engenheirada oferece e pela necessidade de mão de obra treinada (produção e montagem), sendo também um fator adicional nesse custo, diferenciando-se da simplicidade de trabalhar com concreto e argamassa mais comum no contexto brasileiro.

Do ponto de vista arquitetônico, a presença de edifícios altos de madeira no Brasil ainda é limitada. Há apenas uma edificação com três pavimentos, localizada na cidade de São Paulo - SP, utilizada para fins comerciais. Contudo, há uma perspectiva animadora em desenvolvimento, com projetos que

vislumbram a construção de edifícios de até seis andares com uso residencial. Este avanço sugere uma crescente aceitação e confiança na madeira engenheirada como material estrutural.

Quanto à sustentabilidade, nota-se nos últimos dois ou três anos um crescente interesse e foco do setor de construção na mitigação das emissões de carbono. No Brasil, as emissões provenientes da construção civil são expressivas [13], e a opção pela madeira engenheirada surge como uma alternativa sustentável para reduzir esse impacto ambiental. A escolha consciente desse material contribui não apenas para a qualidade das construções, mas também para um futuro mais sustentável e equilibrado.

4. Conclusões

A partir da revisão bibliográfica e interação com as empresas pesquisadas, é possível inferir que o setor da madeira engenheirada no Brasil está em processo de ascensão, porém, ainda apresenta aspectos que tornam sua implementação uma escolha não imediata. Trata-se de um sistema ainda bastante caro, devido a considerações relacionadas à materialidade, produção, aspectos tecnológicos e logísticos. Essas indústrias estão predominantemente situadas no eixo sul-sudeste do Brasil, região onde também se concentram as plantações de Pinus e Eucalipto, o que, por conseguinte, dificulta sua disseminação para outras localidades. O custo elevado associado à construção utilizando madeira restringe esse sistema a um segmento econômico específico, capaz de arcar com tais custos. No Brasil, a construção civil ainda mantém uma tradição consolidada no emprego de materiais como concreto e alvenaria, fator que pode contribuir para a relutância em adotar de forma mais ampla a madeira engenheirada. Além disso, desafios regulatórios, normativos e a necessidade de conscientização e capacitação da mão de obra também podem influenciar a velocidade dessa transição. Apesar dessas considerações, observa-se um interesse crescente em alternativas construtivas mais sustentáveis e eficientes, e a madeira engenheirada tem ganhado espaço progressivamente em projetos arquitetônicos e construções no Brasil. À medida que a conscientização acerca dos benefícios ambientais e estruturais desses sistemas aumenta, é possível vislumbrar uma aceleração na adoção dessas tecnologias no cenário brasileiro.

Agradecimentos

A equipe agradece o apoio da CAPES, Processo 88887.704299/2022-00, pela concessão da bolsa de estudos.

Referências

- [1] Torquato, P.H.B. (2019) Estudo do Comportamento Mecânico de Estruturas de Madeira Laminada Colada. Dissertação de mestrado. Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas, SP, Brasil. 96f.
- [2] Vilela, R.; Mascia, N.T. (2021) Avaliação de propriedades mecânicas da madeira de Pinus taeda provenientes de placas de Cross Laminated Timber. Amb. Const. 21:89-110.
- [3] Oliveira, G.L. (2018) Cross Laminated Timber (CLT) no Brasil: processo construtivo e desempenho. Recomendações para o processo do projeto arquitetônico. Dissertação de mestrado. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Universidade de São Paulo, SP, Brasil. 194f.

- [4] Migliani, A. (2019) O que é Madeira Laminada Colada (MLC ou Glulam)? ArchDaily Brasil. Disponible: <https://www.archdaily.com.br/br/928061/o-que-e-madeira-laminada-colada-mlc-ou-glulam>. Accedido en: 21 Octubre 2023.
- [5] Simpson Strong-Tie. (2019) Conexões e fixações para montagens CLT. Simpson. Disponible: https://www.strongtie.pt/sites/default/files/field_download_file/2021/05/27/105821/catalogue-clt_2019_ptg_internet.pdf. Accedido en: 12 Octubre 2023.
- [6] Brazilian Standart (2022) NBR 7190: Projeto de Estruturas de Madeira. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro, Brasil.
- [7] Urbem. (2023) Atualização da NBR 7190:2022 – avanços e melhorias para o projeto de estruturas de madeira. Urbem BR. Disponible: <https://urbembr.com/atualizacao-da-nbr-71902022-avancos-e-melhorias-para-o-projeto-de-estruturas-de-madeira/>. Accedido en: 25 octubre 2023.
- [8] Lopes, S.C.; Carmo, M.E.R.; Serra, S.M.B. (2021) Levantamento de soluções tecnológicas em madeira industrializada no Brasil. Atas do 12º Simpósio Brasileiro de Gestão e Economia da Construção (XII SIBRAGEC). 10 a 12 Noviembre. Maceió. Maceió, Alagoas, Brasil. Pp.1-8.
- [9] Moradpour, P.; Pirayesh, H.; Gerami, M.; Jouybari, I.R. (2018) Laminated strand lumber (LSL) reinforced by GFRP: mechanical and physical properties. Constr. Build. Mater. 158:236-242.
- [10] Freepik. (2023) Mapa Brasil. Freepik BR. Disponible: <https://br.freepik.com/fotos-vetores-gratis/mapa-brasil>. Accedido en: 25 Noviembre 2023.
- [11] Papel Semente. Dia da Mata Atlântica 2023: Data, História e Importância. Papel Semente. Disponible: <https://papelsemente.com.br/blog/dia-da-mata-atlantica>. Accedido en: 30 Noviembre 2023.
- [12] Auten Incorporadora. (2022) Imóvel de alto padrão x imóvel de luxo: veja as diferenças. Auten. Disponible: <https://auten.com.br/imovel-de-alto-padrao-imovel-de-luxo>. Accedido en: 1 Diciembre 2023.
- [13] Kozloski, C.L. (2020) Emissão de CO₂ de materiais de construção civil no Brasil: estimativas na etapa projetual de edificações. Dissertação de mestrado. Centro de Tecnologia. Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil. 273f.

1130

ORUETA ETXEA: RETOS TÉCNICOS PARA LA CERTIFICACIÓN PASSIVHAUS DE UNA ARQUITECTURA SIN HORMIGÓN

Iñaki Del Prim Gracia¹

¹ Universidad del País Vasco; UPV-EHU Master Madera

Palabras clave / Palavras-chave:

Construcción, Diseño, Eficiencia energética, ODS, Sostenibilidad

Resumen / Resumo:

Orueta Etxea se encuentra en el entorno de la reserva de la biosfera del Urdaibai, Bizkaia. Se trata de un ejemplo de sostenibilidad integral y de economía circular, ya que toda la materia prima es de km0: desde las gravas de Ereño y las piedras calizas de Markina hasta la madera, procedente de un bosque de pino plantado por el abuelo del propietario en Mallabia. Todos los materiales empleados en el interior del edificio son libres de emisiones COP (Contaminantes Orgánicos Persistentes) garantizando una alta calidad del aire. Para su construcción se han utilizado solo materiales de proximidad con bajas emisiones de CO₂, evitando por completo la utilización de hormigón. Así, todo el proyecto se ha resuelto con madera, derivados de la madera, piedra y vidrio, llegando a ejecutarse la cimentación mediante grandes piedras calizas posadas sobre pozos rellenos de balasto despegando la vivienda del suelo para dejar pasar intacto el terreno y el aire bajo la casa. Dado su carácter de casa icónica y vanguardista, para alcanzar la obtención del certificado Passivhaus Classic, que garantiza la extrema eficiencia energética del edificio, se ha tenido que hacer frente a una serie de retos tanto de diseño constructivo como de cálculo higrotérmico que se recogen en el presente artículo.

1. Introducción

El proyecto de Orueta Etxea (Figura 1), vivienda unifamiliar construida en Gautegiz Arteaga (Bizkaia) en 2021, se erige como un claro ejemplo de sostenibilidad integral, economía circular y Km0 en plena Reserva de la Biosfera de Urdaibai. Todas las materias primas que se han utilizado para su construcción son de procedencia local: desde las gravas de Ereño, pasando por piedras calizas de Markina para la cimentación, hasta la madera estructural de alerce, procedente de un bosque de pino cercano que fue plantado por el abuelo del propietario en los años sesenta en la localidad de Mallabia, en las faldas del monte Oiz.

La vivienda, todo un icono de la arquitectura en madera, ha sido diseñada por el estudio López Rivera Arquitectes, quienes asumieron el desafío de utilizar para su construcción solo materiales de proximidad con bajas emisiones de CO₂, evitando por completo la utilización de hormigón. Todo el proyecto se ha resuelto con madera, derivados de la madera, piedra y vidrio.



Figura 1: vista exterior de la vivienda.

La casa se enclava en los límites de Gauteviz Arteaga, y se adapta a la suave pendiente del terreno sin apenas modificarlo ni tocarlo. Las grandes piedras calizas de Markina, asentadas sobre fosos rellenos de lastre, levantan toda la casa del suelo para permitir que la tierra y el aire circulen bajo la casa. A partir de esta singular cimentación, todo se construye de manera industrializada empleando elementos estructurales de madera que llegan a obra en piezas mecanizadas en fábrica para su rápido y eficaz ensamblaje. La estructura de CLT de alerce, fabricada y montada por Egoín, ha sido llevada al límite en este proyecto, ya que, además de ejercer de estructura, sirve de acabado interior de todo el edificio, explotando toda su belleza y brillando con todo su potencial estético y háptico (Figura 2).

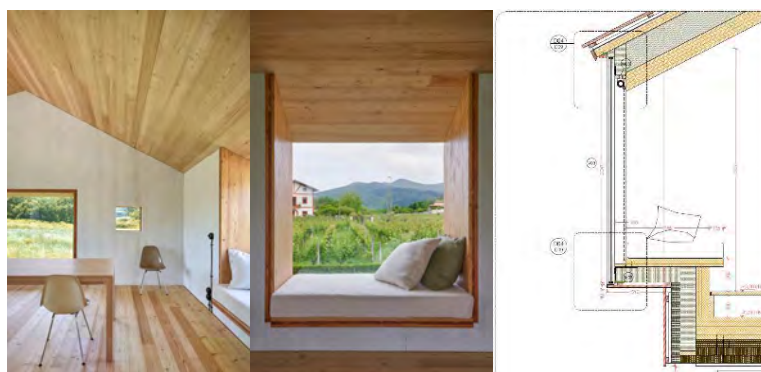


Figura 2: vistas interiores del edificio.

Orueta Etxea es el paradigma que mejor resume una filosofía y valores concretos: la madera como recurso constructivo en sustitución del hormigón, el cuidado y respeto por el medioambiente y la apuesta por el uso de materia prima local. Todo el proyecto respira madera. Además del interior del edificio, este material constructivo ocupa todos los acabados exteriores, tanto las fachadas como las cubiertas. En concreto, la madera empleada para el exterior es pino radiata con un tratamiento de acetilado natural que le otorga propiedades más duraderas frente al clima oceánico templado, propio de Urdaibai donde está enclavado, en donde abundan las lluvias a lo largo del año.

2. El edificio

El terreno donde se ubica la casa se halla en el límite edificable sur de Arteaga. Su forma es irregular y presenta una ligera pendiente descendiente de sur a norte. El clima es húmedo y templado con precipitaciones a lo largo de todo el año, aunque menos frecuentes en los meses de verano. La casa se acomoda a lo largo del camino Bo Orueta siguiendo su forma cóncava hacia el sur y adaptándose a la suave pendiente del terreno sin apenas modificarlo ni tocarlo (Figura 3). Grandes piedras calizas de Markina posadas sobre pozos rellenos de balasto elevan la casa en su totalidad despegándola del suelo para dejar pasar intacto el terreno y el aire bajo la casa.

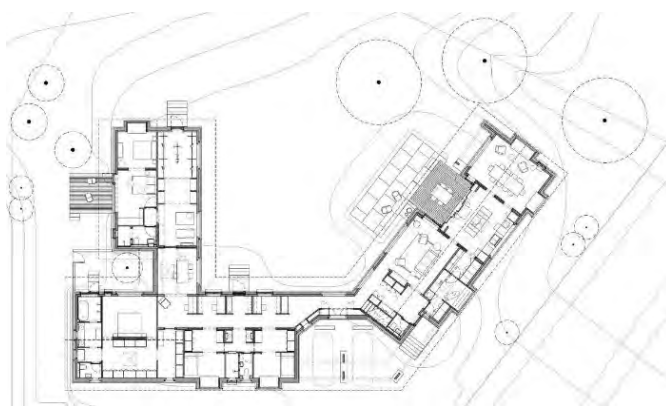


Figura 3: planta de la vivienda.

La cubierta a dos aguas en toda la casa expelle la lluvia creando una intensa cortina frente a los grandes ventanales y recolectándose en el perímetro de la casa a ras de suelo. La total construcción en madera acentúa la sensación de cobijo en toda la casa y en espacial en los espacios de contacto con el cuerpo donde la casa se convierte en mueble. La estructura es de madera contralaminada de alerce. Los aislantes son de fibras de madera y de corcho. Los revestimientos de fachada y cubierta son de pino radiata acetilado acabados con una pátina mineral a base de silicato de color gris.

3. Adaptación al estándar passivhaus de un manifiesto arquitectónico en madera

Las tareas como consultor Passivhaus en este proyecto han pasado por diferentes fases. En primer lugar, se revisó el proyecto inicial elaborado por López Rivera Arquitectes el cual, aun siendo un proyecto espléndido y con unas soluciones de eficiencia energética muy avanzadas, no alcanzaba las exigencias del estándar Passivhaus para el clima concreto de Gautegiz de Arteaga. La simulación energética del edificio en el software PHPP, lo cual ayudó a dimensionar y prescribir los aislamientos específicos adecuados para cada uno de los componentes de la envolvente. Igualmente, en esta fase se realizó el cálculo de los puentes térmicos del edificio, con el objetivo de optimizar algunos detalles constructivos, fundamentalmente los relacionados con la instalación de las carpinterías exteriores. Por último, en este edificio ha sido de especial importancia la modelización de los sistemas de sombreado exterior para evitar posibles sobrecalentamientos en verano y épocas templadas del año.

En la fase de obra las labores realizadas han sido la supervisión de la ejecución de toda la envolvente, tanto la parte opaca como las carpinterías exteriores, y la definición y supervisión de las diferentes

estrategias de hermeticidad, asesorando a todo el equipo tanto en la ejecución de la hermeticidad como en la elaboración de los ensayos blower door.

Los retos de este proyecto han sido variados, partiendo de la base de que es un edificio con una arquitectura de gran calidad, y con unas propuestas de diseño y uso que a priori podemos entender como no canónicas dentro de las recomendaciones del estándar Passivhaus. Estos retos principales se describen a continuación.

3.1.Factor de forma

En primer lugar, el factor de forma de la vivienda es francamente desfavorable, al tener un gran desarrollo de la vivienda en planta baja y un desarrollo volumétrico muy longitudinal, lo que provoca una baja compacidad del edificio. Esto supone tener una elevada proporción de superficie de envolvente para la superficie de referencia energética. Además, al estar la casa completamente elevada del suelo, no se ha podido aprovechar el amortiguamiento térmico del terreno, por lo que la superficie de pérdida energética a través de la envolvente es aún más elevada de lo habitual.

3.2.Puentes térmicos

Por otra parte, se ha tenido que simular energéticamente a nivel de puente térmico diversos detalles constructivos no genéricos y no habituales (Figura 4), como son las carpinterías sin marco de los miradores, o las perfilierías de madera proyectantes hacia el exterior, de forma que se pudieran incluir en el balance energético del edificio y comprobar el nivel de confort de dichas soluciones. Los grandes miradores a sur se resolvieron con perfiliería oculta realizada mediante chapa metálica plegada en Z, sobreaislada exteriormente de forma que se garantice un correcto comportamiento frente a la pérdida de energía y las condensaciones superficiales, colocando el vidrio al exterior, a hueso fijado mediante silicona estructural, sin marco.

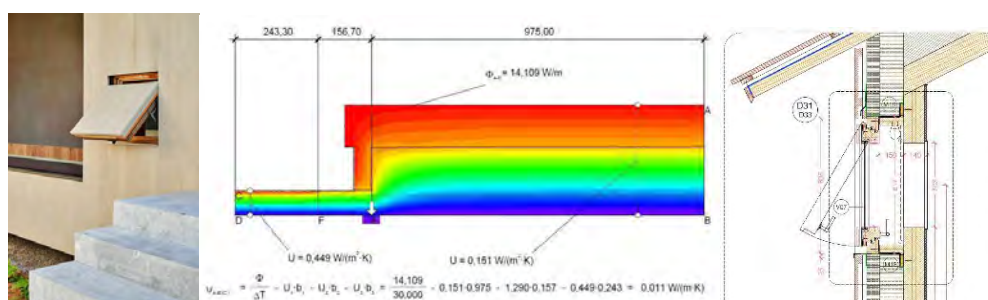


Figura 4: carpinterías proyectantes hacia el exterior

3.3.Sobrecalentamiento

Por último, la cuestión del sobrecalentamiento que pudieran provocar las orientaciones de la vivienda, así como las grandes superficies acristaladas, en un clima templado como el bizkaino, se ha solucionado con una acertada combinación de vidrios con bajo factor solar del 31%, elementos de sombra fijos y elementos de sombra móviles tanto interiores como exteriores (Figura 05).

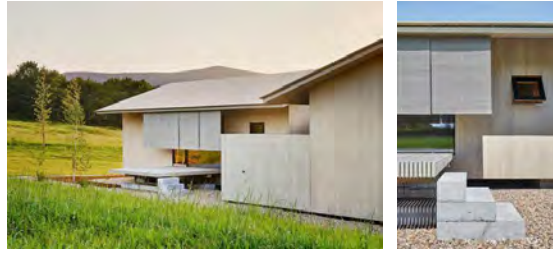


Figura 5: protecciones solares exteriores

4. Conclusiones

Para hacer frente a todos estos retos, desde la forma de la vivienda no canónica dentro de las recomendaciones del estándar Passivhaus, una superficie de envolvente térmica mayor de lo habitual al estar la casa elevada sobre el suelo, la simulación energética de detalles constructivos no habituales, así como el sobrecalentamiento que pudieran provocar las orientaciones de la vivienda en los grandes ventanales, alcanzando con no poco esfuerzo la certificación Passivhaus del edificio terminado, ha sido de gran ayuda el sistema constructivo en base madera utilizado en la envolvente estructural del edificio, consiguiendo de esta manera certificar Passivhaus un edificio de una calidad arquitectónica excepcional, conjugando eficiencia energética y belleza a través de la Arquitectura propuesta por López Rivera Arquitectes bajo los parámetros requisitos de Certificación Passivhaus.

1131

PATOLOGÍA DE RUIDOS EN SUELOS DE MADERA

Alfonso Lozano Martínez-Luengas¹; David Lorenzo²; Felipe Álvarez Rabanal¹; Mar Alonso Martínez¹; José Manuel Fernández Tejeiro¹

¹ Universidad de Oviedo

² Universidad de Vigo

Palabras clave / Palavras-chave:

Suelos de madera, Ruidos, Reclamaciones, Patología

Resumen / Resumo:

Los procesos patológicos relacionados con ruidos en suelos de madera, son complejos de analizar. Además, hay que tener en cuenta que existe un importante componente subjetivo en la percepción del propio ruido, que no se han desarrollado equipos específicos para medir esta perturbación e incluso en este supuesto, tampoco existen documentos normativos, reglamento o similar que limite expresamente el nivel de presión acústica derivado de un roce entre tablas. Por otra parte, en los últimos años se está detectando un importante número de reclamaciones asociadas a este tipo de deficiencias, muchas de las cuales se corresponden a promociones ejecutadas en diferentes regiones costeras de nuestro país. La ponencia aborda el análisis algunos de los problemas de ruido más frecuentes que suelen producirse en suelos de madera, el estudio patológico de los mismos y alguna de las posibles soluciones que puede aplicarse para evitar o minorar este tipo de perturbaciones

1. Introducción

Hoy día, en el sector de la Construcción, existe una amplia variedad de elementos de suelo constituidos por madera, o derivados de la madera. Así, el mercado ofrece desde tablas de madera maciza, de multitud de especies, parqués más clásicos (lamparquet, mosaico, industrial, entarugados), o más modernos tipo multicapa o laminados, a su vez con distintos soportes (fibras de diferente densidad, tableros contrachapados, etc.); o incluso los composites madera-plástico (WPC).

Las uniones entre las piezas pueden igualmente realizarse machihembradas (ranura y lengüeta), con fijaciones mecánicas o engatillarse mediante sistemas tipo click, sin necesidad de adhesivos.

También los sistemas de colocación varían, pudiendo optarse por el entarimado (sobre rastreles, con sus correspondientes variaciones sobre el procedimiento de fijación), encolado o flotante sobre láminas de espuma de polietileno, de corcho o similar. Adicionalmente en situaciones donde exista la probabilidad de que eventualmente se produzcan aportes de humedad desde el recrecido, se colocan láminas o barreras de vapor, para evitar hinchamientos y mermas no controladas en los elementos de suelo.

Además, los soportes pueden igualmente fabricarse a partir de componentes no sólo a base de cemento, sino que actualmente, por ejemplo, existen morteros de anhidrita que permiten un secado mucho más rápido. Su empleo es muy frecuente con calefacciones de suelo radiante.

Ante esta variabilidad de materiales, soportes y sistemas de instalación, con el fin de facilitar la ejecución, el control y el mantenimiento de todo tipo de pavimentos de madera, se desarrolló la norma UNE 56810 “Suelos de madera. Colocación. Especificaciones” [1]. Entre otra información, en este documento se indican las condiciones que deben cumplir los materiales constituyentes de cada una de las capas del sistema de pavimentación, para evitar defectos relacionados con el confort y la durabilidad.

Sin embargo, a pesar de que muchas empresas dan cumplimiento tanto a las recomendaciones de la citada norma, como a las especificaciones particulares de cada fabricante de los suelos, o de bibliografía especializada [2], en los últimos años se ha detectado un incremento en el número de reclamaciones asociadas a ruidos y crujidos en los pavimentos de madera. En la mayoría de los casos, el proceso patológico guarda relación con los rozamientos excesivos entre los elementos de suelo.

2. Procesos patológicos en suelos de madera

Cuando se analiza un problema de ruidos o roces en suelos de madera, la gran mayoría de las veces se debe a que las piezas han incrementado su contenido de humedad, lo que ha provocado hinchamientos en las tablas y por ende un aumento de las tensiones de compresión.

En muchas ocasiones, estos cambios volumétricos derivan en la aparición de curvaturas, pérdidas de planitud, deformaciones o aplastamientos, muy evidentes en los bordes de las tablas.

Para evitar o minimizar este aumento del contenido de humedad de la madera, además de controlar el contenido de humedad de la madera antes de su puesta en obra, habrá que vigilar otra serie de parámetros, como las condiciones higrotérmicas de las estancias donde se instalará el pavimento y las exteriores, el contenido de humedad del recrecido soporte y de los yesos u otros revestimientos aplicados sobre los paramentos verticales.

En aquellos casos en los que se trata de pavimentos dispuestos sobre plantas bajas, es igualmente importante verificar que el forjado sanitario se encuentra debidamente ventilado, con las secciones de rejillas correctas y en posiciones tales que garanticen la renovación del aire en dicha cámara.

Es decir, que en cualquier situación, es fundamental estimar los contenidos de humedad de la madera y de todos aquellos elementos constructivos o condiciones ambientales que puedan modificar o alterar la humedad de equilibrio higroscópico de los elementos de suelo.

3. El problema del ruido en suelos de madera

En el supuesto que se hayan tenido en cuenta y controlado los posibles aportes de humedad expuestos anteriormente, todavía es posible que aparezcan ruidos y roces entre las tablas, si no se disponen las juntas de dilatación perimetrales y de expansión, previstas tanto en la norma UNE 56810, como en las específicas de cada fabricante.

A este respecto, se recuerda que para la gran mayoría de productos multicapa, las juntas perimetrales deben disponerse en ambos sentidos, y no sólo en anchura, como sucede con la madera maciza.

Sin embargo, en determinadas ocasiones y con suelos no adheridos al soporte, a las pocas semanas de la instalación del suelo de madera, es posible que aun así se generen ruidos al transitar sobre los pavimentos de madera. Estos crujidos generalmente son más perceptibles en los meses de verano.

Se insiste que este tipo de deficiencias pueden aparecer incluso cuando se han realizado exhaustivos controles previos de los contenidos de humedad de la madera y de los morteros, de las humedades relativas del aire, de las juntas o de la eficacia de la cámara sanitaria.

El problema, que parece recurrente en edificios modernos, ubicados próximos a zonas costeras, lacustres o cauces fluviales, se manifiesta con mayor intensidad en promociones urbanísticas con cierta calidad, en la que se han instalado sistemas de climatización con ventilación mecánica, con o sin recuperación de calor.

Paradójicamente, la probada eficacia y el control de la humedad relativa del aire de estas instalaciones, que garantizan unas condiciones térmicas interiores óptimas para mantener la madera y sus derivados con un contenido de humedad adecuado, a pesar de su inherente comportamiento higroscópico, influyen en el desarrollo del proceso patológico.

Efectivamente, en verano, cuando los propietarios suelen desconectar estos sistemas de climatización y abrir las ventanas, el control de la humedad relativa del aire interior desaparece y la madera entra en contacto con el aire húmedo del exterior.

Este cambio en los parámetros ambientales interiores, supone una brusca modificación de la humedad relativa del aire dentro de la vivienda, que será tanto más apreciable, cuanto más próximo se encuentre el edificio a una masa húmeda (mar, lago, río, etc.).

En estas condiciones, la madera absorberá la humedad del ambiente, lo que conllevará cambios volumétricos que pueden ser relevantes, especialmente en suelos ejecutados con tableros nerviosos. Con este tipo de laminas es frecuente que se registren variaciones dimensionales del orden de 0,4% en longitud y anchura; y mucho más altos aún en espesor. El incremento de las secciones de cada una de las piezas, hace que todo el pavimento se comprima, e incluso entre en contacto con los paramentos verticales perimetrales.

El mobiliario pesado, las juntas de expansión de insuficiente sección o bloqueadas por las jambas de las carpinterías interiores, son factores que igualmente coartan los movimientos relativos entre tablas, aumentando la sonoridad del pavimento al transitar sobre él.

Además de las condiciones ambientales poco favorables, el problema se agrava cuando se trata de pavimentos de madera flotantes, montados en seco con sistemas tipo click. Estos suelos, cuya instalación resulta más rápida, limpia y económica que otros que emplean adhesivos entre las juntas, son actualmente más propensos a favorecer la aparición de ruidos, precisamente por la ausencia de colas. Y esto es así porque los cordones de las colas de poliuretano mono o bicomponentes, de silanos, o incluso las acuosas de acetato de polivinilo, actúan como un dispositivo amortiguante que absorbe los roces entre tablas, evitando los ruidos.

4. Conclusiones

Teniendo en cuenta la amplia variedad de suelos de madera que el mercado ofrece hoy en día para su utilización en viviendas, cada uno de los cuales presenta propiedades físicas, mecánicas y elásticas distintas, más los diferentes sistemas de colocación, combinados con la variabilidad de las ubicaciones, tipologías constructivas e instalaciones de los edificios, hacen que la casuística de las posibles causas que incidan en la aparición de ruidos al transitar sobre los pavimentos, sea bastante variable.

Por ello, una vez que se manifiestan este tipo de perturbaciones acústicas, resulta obvio que no pueden definirse procedimientos de actuación que garanticen el éxito en la eliminación completa de ruido.

Además, no debe olvidarse que los hábitos, modos de vida y sensibilidades propias de cada usuario, influyen también en la percepción del ruido por parte de cada individuo.

Pero también es cierto que el encolado es una opción que seguramente conseguirá reducir el problema de manera significativa.

Además, el hecho de que los crujidos se manifiesten con mayor frecuencia en suelos montados en seco, y por tanto fácilmente desmontables, facilita considerablemente la aplicación del adhesivo.

Evidentemente, después de levantar el pavimento, se replantearán las tablas y encolarán todos los cantos. Cuando sea necesario, antes de aplicar el adhesivo, se cortarán los bordes de aquellas piezas que conformarán las nuevas juntas de dilatación y expansión necesarias para la recolocación de las lamas previamente desmontadas.

En cualquier caso, para tratar de minimizar la posibilidad de aparición de este tipo de defectos, conviene considerar en los proyectos o reformas, las recomendaciones de la normativa y bibliografía específica, y las instrucciones particulares de los fabricantes.

En caso de duda, incluso podrían solicitarles los resultados de los ensayos de hinchazón y merma, de acuerdo con la norma UNE-EN 1910 “Suelos de madera y parquet y revestimientos murales exteriores e interiores de madera. Determinación de la estabilidad dimensional” [3]. Así se recabará más información para definir con precisión el tipo de suelo más adecuado para cada situación concreta.

Teniendo en cuenta estos datos de partida, podrá diseñarse el procedimiento de colocación más adecuado, considerando la ubicación y geometría de las viviendas, la dirección del pavimento, el sistema de colocación, la posición y anchura de las juntas de dilatación perimetrales y las de expansión, etc. Y por supuesto, realizar un seguimiento y control preciso de las fases de su montaje.

Referencias

- [1] Norma UNE 56810: 2013. Suelos de madera. Colocación. Especificaciones.
- [2] Medina, G. (2005). Pavimentos de madera. Manual de instalación. ALTIM. Madrid. 344 p.
- [3] UNE-EN 1910:2000 “Suelos de madera y parquet y revestimientos murales exteriores e interiores de madera. Determinación de la estabilidad dimensional”

1132

PATRIMONIO INDUSTRIAL CON MADERA EN ESPAÑA

Daniel F. Llana¹; Guillermo Íñiguez-González¹; Miguel Esteban¹; Francisco Arriaga¹

¹ Universidad Politécnica de Madrid

Palabras clave / Palavras-chave:

Arqueología industrial, Intervención, Mapa de patrimonio industrial, Protección patrimonial, Reutilización de madera

Resumen / Resumo:

El patrimonio industrial se ha convertido recientemente en un recurso turístico y cultural, sin olvidar su aspecto social. En España desde el año 2000, existe un Plan Nacional de Patrimonio Industrial (PNPI) que identifica elementos industriales que son de interés patrimonial. Sin embargo, eso no les otorga automáticamente una protección ni existe una figura específica de protección del patrimonio industrial, quedando mayoritariamente dentro de otras figuras de protección y como competencia de las comunidades autónomas. A pesar de que en el siglo XX el acero y el hormigón desplazaron considerablemente a la madera en las aplicaciones industriales, una parte continuó construyéndose con madera debido a las ventajas que presentaba sobre los otros materiales (durabilidad, economía y, más recientemente, sostenibilidad y estética). Se han identificado 28 elementos de patrimonio industrial con madera en España que están protegidos bajo la figura Bien de Interés Cultural (BIC). Además, se presentan dos enlaces a mapas, uno elaborado por el PNPI que recoge 177 elementos de patrimonio industrial y otro del Grupo de Investigación Construcción con Madera de la UPM que recoge elementos de patrimonio industrial con madera. Con respecto a su uso actual, muy pocos de ellos han conservado su carácter industrial, siendo la mayoría intervenidos para destinarlos a otros uso como museos, oficinas, viviendas, instalaciones deportivas, centros de eventos, bibliotecas, paseos, hoteles y restaurantes. Por último, se presentan las intervenciones más destacadas realizadas sobre el patrimonio industrial con madera en España.

1. Introducción

El patrimonio industrial ha ganado importancia en los últimos años con fines turísticos y culturales, pero también como una forma de salvaguardar una parte de la historia. La industrialización modificó profundamente la forma de vida y el entorno, y presenta una componente social muy marcada en las zonas donde se encuentra. Se entiende por patrimonio industrial el conjunto de los bienes muebles, inmuebles y sistemas de sociabilidad relacionados con la cultura del trabajo que han sido generados por las actividades de extracción, de transformación, de transporte, de distribución y gestión generadas por el sistema económico surgido de la Revolución Industrial (1760) hasta el último tercio del siglo XX. Sin embargo, anteriormente en los siglos XVI y XVII ya existía un tipo de industria conocida como preindustrial (batanes, ferrerías, fraguas,

martinetes, molinos, serrerías, reales fábricas, etc.) que en la mayoría de casos utilizaban la madera como material estructural, de infraestructuras, instalaciones y maquinaria [1].

El interés en la protección del patrimonio industrial surgió en los años 50 y 60 del pasado siglo en varios países europeos y adquirió una dimensión internacional con la creación en 1978 del Comité Internacional para la Conservación del Patrimonio Industrial (TICCIH - The International Committee for the Conservation of de Industrial Heritage). En España, no surgiría una figura hasta 1986 cuando se fundó la Asociación Española de Patrimonio Industrial y de la Obra Pública. En el año 2000 se presentó el primer Plan Nacional de Patrimonio Industrial (PNPI), y en 2002 incluyó 49 bienes presentados por las comunidades autónomas (CCAA) [2]. En 2011 se presentó un nuevo PNPI que se actualizó en 2016 incluyendo un total 177 bienes. La inclusión de un bien en el PNPI significa que tiene un interés patrimonial manifiesto, pero no le otorga automáticamente ningún tipo de protección especial. Un ejemplo de ello, son las baterías de Cok de ENSIDESA en Avilés, que figuraban en el PNPI desde 2016 pero eso no ha impedido su derribo en 2023. Actualmente, la protección y conservación de la mayoría del patrimonio, incluido el industrial, es competencia de las CCAA, las cuales en sus legislaciones establecen una o varias figuras de protección patrimonial. La figura de mayor protección que otorgan todas las CCAA es la declaración de Bien de Interés Cultural (BIC) (en algunas de ellas con distinto nombre). En 2017 el Consejo Internacional de Monumentos y Sitios ICOMOS (International Council on Monuments and Sites) publicó los principios para la conservación del patrimonio construido en madera, incluyendo recomendaciones para su correcta intervención [3]. De forma regular, en España, se organizan los siguientes eventos de difusión: las Jornadas anuales de Patrimonio Industrial INCUNA en Gijón (desde 1999), el Aula G+I_PAi anual en la Universidad Politécnica de Madrid (desde 2013) y el congreso cuatrienal sobre Patrimonio Industrial y Obra Pública TICCIH España (8 ediciones).

El acero y el hormigón desplazaron a la madera en el ámbito industrial. Sin embargo, existen aplicaciones industriales donde la madera presenta claras ventajas. Algunos ejemplos son las salinas y fábricas de fosfatos debido al ambiente agresivo, o las zonas donde la abundancia de madera ofrecía una ventaja económica respecto a otros materiales (aserraderos y cables de extracción forestal). En general la especie de madera utilizada para la estructura era la disponible en la zona. Sin embargo, en el caso de maquinaria, se utilizaba la más adecuada para ese fin, por ejemplo, los conductos en las fábricas de harinas eran de especies que limitan la proliferación de insectos, o los dientes de las ruedas de los molinos de viento se construían con madera más dura. La madera de la rueda era más flexible y curvable.

2. Identificación, protección y usos

De los 177 elementos incluidos en el PNPI de 2016, se estima que unos 30 contienen madera, bien a nivel estructural o en la maquinaria. Además, se han identificado los siguientes BIC, abreviatura de provincia y su año de declaración: Herrería de Compludo (LE) 1968, Nau Gaudí (BAR) 1969 (Fig. 1a), Fábrica de harinas la Estrella (PA) 1991, Ferrería San Blas (LE) 1991, Astilleros Nereo (MAL) 1997, Martinete de Navafría (SE) 1998, Vapor Vell (BAR) 1998, Cable Inglés (ALM) 1998, Cocheras de Fuente de San Esteban (SA) 1999, Real Ingenio Moneda Segovia (SE) 2000, Fábrica de boinas La Encartada (VI) 2002, Bodega del sindicato agrícola (TA) 2002, Muelle de Rio Tinto (HU) 2003, El Trujal de la marquesa (NA) 2006, Salinas Saelices de la Sal (GU) 2007, Harinas San Antonio (VA) 2008, Castilletes de madera de la Sierra minera Cartagena-La Unión (MU) 2009, Molinos de viento de Jonquet (BAL) 2009, Astillero de Mendieta (VI) 2010, Fábrica de latón San Juan Alcaraz (ALB) 2010, Castillete de la mina de Arnao (AS) 2011, Salinas de Añana (ALA) 2013, Carbonera de Sargadelos (LU) 2014, Noria de Jinámar (LP) 2018, Malacate de la cantera Emilia (MU) 2018, Aserradero de Valsain (SE) 2022 (Fig. 1b), Fábrica de harinas La Esperanza (MAD) 2022 y Cargaderos del Nervión (VI) 2023 [4].

El Ministerio de Cultura y Deporte elaboró un mapa interactivo con los 177 bienes del PNPI de 2016, cuyo enlace es:

<https://www.google.com/maps/d/viewer?mid=1Rd3x2Zf0u2c7IUR7FFsT2jNe7LevHJRm&ll=40.07610966382426%2C-3.1744799992306527&z=6>

El Grupo de Investigación Construcción con Madera del UPM, dentro de su línea de investigación “Patrimonio Industrial con Madera” está elaborando un mapa de Patrimonio Industrial en Madera, cuyo enlace es:

<https://www.google.com/maps/d/embed?mid=1IWjZXE5xA1wzhUpq5EypaFw4Ra-mRFY&ehbc=2E312F>

Algunos bienes de patrimonio industrial con Madera siguen utilizándose con fines industriales, iguales o diferentes a los originales, como la nave de fosfatos Fesa-Ercros (VI) construida en 1912, las salinas de Cardona (BAR) de 1928 (Fig. 1 c), la estación de tren de Ávila (AV) de 1958 o el alfolí de Saelices de la Sal (GU). Otros se han reutilizado como museos, oficinas, viviendas, instalaciones deportivas, centros de eventos, bibliotecas, paseos (cargaderos de mineral), hoteles y restaurantes.

3. Intervenciones

Casi todas las intervenciones están asociadas a un cambio de uso. Algunas de las actuaciones más destacadas en patrimonio industrial con madera en España son:

Nau Gaudí en Mataró, Barcelona, primera obra construida por Antonio Gaudí, en 1883, como edificio para el blanqueo industrial de una cooperativa textil. Tiene arcos parabólicos encamionados de madera de 12 m luz. Los camones son piezas de pino de sección 220 x 60 mm y longitud 1,5 m. Fue intervenida en 2002-2008, deconstruyendo el edificio y reutilizando los arcos reparados. Actualmente se utiliza como museo (Fig. 1 a).

Real Taller de Aserrió de Valsain, Segovia, construido en 1884 con fachadas de mampostería de ladrillo y piedra y cubiertas de madera. Se realizó en 2007-2009 una consolidación del edificio y cubiertas conservando las cerchas de madera originales de 16,6 m de luz, las cuales fueron reparadas con formulaciones epoxi y reforzadas con madera microlaminada. Otros elementos de cubierta fueron sustituidos por madera nueva para cumplir la normativa de resistencia al fuego. Fue declarado BIC en 2022. Se prevé usarlo como museo de la madera (Fig. 1 b).

Las dos naves de fosfatos Cros de Valencia, construidas en 1906 y formadas por varias crujiás con cerchas de 18,9 m de luz cada una. Fueron intervenidas en 2010, se desmontó la nave que se encontraba en peor estado reutilizando sus piezas de madera para reparar la otra nave. Todos los pilares de madera, que en una intervención anterior habían sido recubiertos de hormigón armado y se encontraban en mal estado, fueron sustituidos por pilares metálicos huecos forrados con madera. Su uso actual es para instalaciones deportivas.

Vapor Vell de Barcelona fue una industria textil construida en 1846. Tiene pilares de fundición y estructura de madera en la cubierta. Desde el año 2000 es una biblioteca pública y un centro escolar. Es un ejemplo de la importancia social de la conservación del patrimonio industrial. En los años 70 del siglo pasado hubo un intento de derribar el edificio y construir unos grandes almacenes, el cual no se materializó por el movimiento vecinal de conservación que se generó.

Fábrica de harinas Zaldú en Estella, Navarra, reformada en 2007 y convertida en hotel, conservando la mayor parte de su estructura original. Parte de las cerchas de cubierta con tirante metálico se reutilizaron para la cubierta de los aparcamientos.

Cargadero mineral de Río Tinto en Huelva construido en 1876. La estructura principal es de acero, pero también tenía partes con madera. Intervenido en 2006-2007 se sustituyó la madera existente por elondo (tali), que es una frondosa tropical, y se transformó en paseo. Una intervención parecida se realizó en el Cable Inglés de Almería en 2022. En este cargadero de mineral construido en 1904, se sustituyó la madera existente por iroko de Camerún para convertirlo también en paseo.

Alfolí (almacén de sal) de las salinas de Saelices de la Sal, Guadalajara, intervenido entre 2006 y 2009 sustituyendo la estructura de vigas, pilares y cubierta por otra igual de madera nueva. Actualmente la salina sigue en funcionamiento.

Edificio Ombú en Madrid, construido en 1903 por la Sociedad de Gasificación Industrial (S.G.I.). Reformado en 2020-2022 conservó la mayoría de la madera original de cubierta. Interiormente y de forma casi exenta a la estructura original se construyó una estructura nueva de madera, con pilares de madera laminada de castaño del norte de España y paneles CLT de abeto europeo, para utilizarla como oficinas (Fig. 1 d).

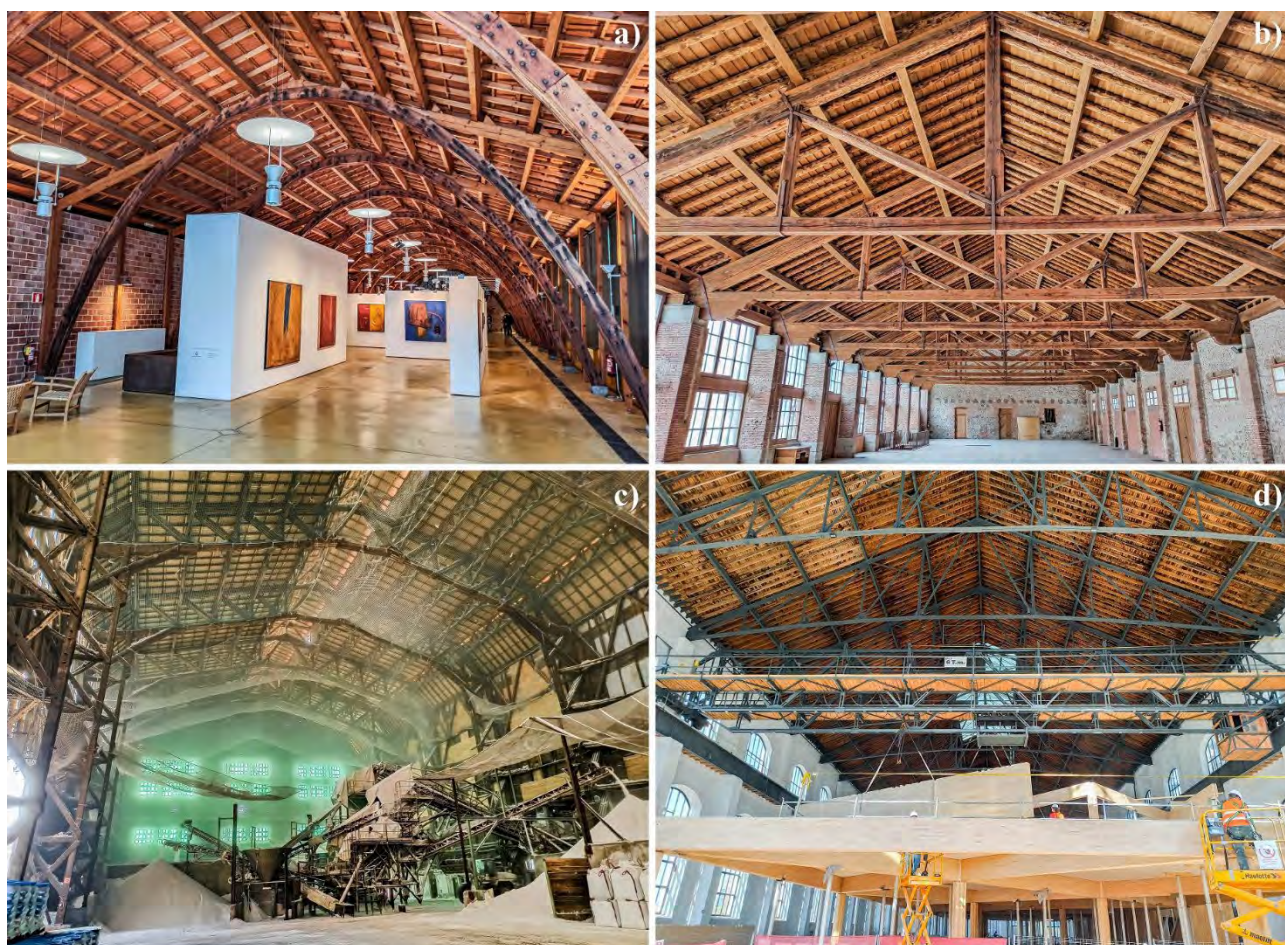


Figura 1. Ejemplo de Patrimonio Industrial con Madera: a) Nau Gaudí Mataró 1883 b) Real Taller de Aserrío de Valsain 1884 c) Salinera de Cardona 1928 d) Edificio Ombú Madrid 1903. Fuente: GICM-UPM.

Agradecimientos

Javier Donés Pastor y José García Gámez (Directores del Centro Montes y Aserradero de Valsaín); Salinera de Cardona y Climent Molins; Acciona y Ortiz-León (Edificio Ombú); Consorci Museu d'Art Contemporani de Mataró (Nau Gaudí).

Referencias

- [1] Hermoso, E. (1999) Ingenios de madera. Revista ALTIM 197:25-34.
- [2] Humanes, A. (2002) Plan Nacional de Patrimonio Industrial (PNPI). Instituto del Patrimonio Histórico Español. Madrid. 6 p.
- [3] ICOMOS (2017) Principios para la conservación del patrimonio construido en madera. 6 p.
- [4] Antequera, A.J. (2023) La protección del patrimonio industrial por el Ministerio de Cultura y Deporte: últimas declaraciones de Bienes de Interés Cultural. XXV Jornadas Internacionales de Patrimonio Industrial INCUNA 2023. P. 27.

1133

PHYSICAL AND MECHANICAL AGING OF COMPOSITES. NON-DESTRUCTIVE METHODS FOR QUALITY CONTROL

Ignacio Bobadilla Maldonado¹; Roberto D. Martínez López²; Hamed Matini Behzad¹; Everton Hillig³

¹ Universidad Politécnica de Madrid

² UPV

³ UNICENTRO

Palabras clave / Palavras-chave:

Wood-plastic, Probing, ultrasound, Stress wave, Screw withdrawal force, Penetration tester

Resumen / Resumo:

Wood-plastic composites (WPC) have been developed into new and important wood-based materials because of their benefits for the environment, their economy and their recyclability. When WPCs are used outdoors, they are subjected to a climate with moisture and temperature fluctuations. It is therefore necessary to obtain information on the effects of climate aging on WPCs. This study explores the relationship between laboratory aging, physical and mechanical changes, and the results of non-destructive testing of wood-polymer composites. This was done by testing 45 pieces of composite with 60% wood fibre, 35% low-density polyethylene and 5% additives. A laboratory aging process consisting of a water immersion at 20 and 50°C for a total of 56 days was carried out on composite specimens. During the aging test, several specimen batches were extracted and tested to record their physical (density) and mechanical properties (bending strength and modulus of elasticity). Non-destructive testing was also carried out with ultrasound and stress wave, screw withdrawal resistance meter and penetration tester devices. Temperature was found to have more influence than humidity on the deterioration of the material. A barely significant decrease in density (2-4%) and a clear drop in mechanical properties (20-60%) was also observed. The non-destructive methods used were reliable estimators of composite properties, especially ultrasound wave propagation, coinciding with previous works on other materials.

1. Introduction

Wood-polymer composites are used in a wide variety of applications, mostly for outdoor use, such as decking, railing and fencing [1]. When WPCs are used outdoors, they are subjected to a climate with moisture and temperature fluctuations, as well as decay fungi and ultra violet (UV) radiation. WPCs are a combination of wood in the form of fibres or particles, and a thermoplastic matrix, normally polyethylene (PE), polyvinyl chloride (PVC) or polypropylene (PP). As the wood component is a hydrophilic phase and the thermoplastic is a hydrophobic phase, the moisture sorption of these composites will occur mainly in the wood component [2]. A study on the effect of moisture and heat on the mechanical properties of wood and wood-plastic composites indicated that WPC is a much improved product compared to wood derivatives [3]. Considering the fast growing market for current and new WPC products, the extended warranty on existing products, and the applications in which long-term performance is critical, more research is

necessary to quantify the long-term performance of WPC when subjected to outdoor weather conditions. Static methods are currently used to evaluate the properties of wood-plastic composites. ASTM 7031-04 [4] was developed for the physical and mechanical properties of wood-plastic composite products. Although the current static methods are precise, they are costly and destructive, rather than fast, easy and flexible. The use of non-destructive evaluation (NDE) techniques designed to minimize defects and ensure the quality control of the final product can be effective techniques for the assessment of WPC properties [5]. NDT refers to the process of evaluating materials or components in order to characterize them or find defects without altering the original attributes or harming the object being tested [6][7]. Numerous studies have been conducted to verify the effectiveness of non-destructive methods for estimating the properties of materials. When applied to wood materials such as a variety of wooden boards, these studies generally produce successful results, as in the case of Chung and Wang [8] with particleboard, Bobadilla et al. [9] with particleboard and fibreboard, Mirbolouk and Roohnia [10] with medium density fibreboard, Haseli et al. [11] with heterogeneous sandwich panels (blockboard and battenboard), Zhang et al. [12] with cross-laminated timber, among others who studied the application of NDT in wood panels. However there are very few studies on NDT in composites, and the results obtained are inconclusive, for example Ultrasound and Stress wave to determine the modulus of elasticity (MOE) or other composite properties [13], [14] and [15].

2. Material and methods

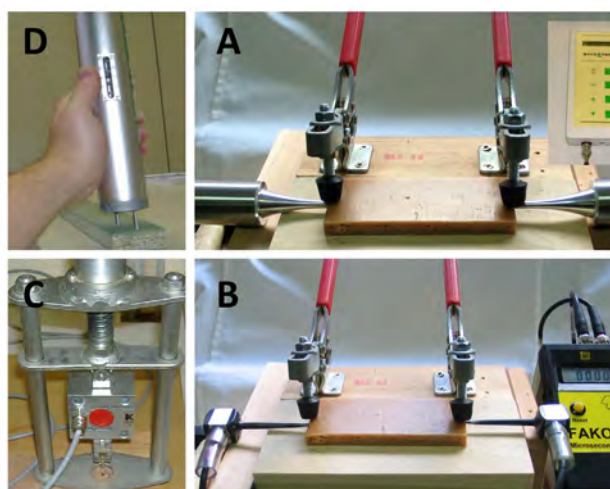


Figure 1: Detail of devices and test method for 22kHz ultrasound (A), stress wave (B), screw withdrawal (C) and penetrometer (D)

Forty-five 210x50x8 mm pieces of composite from the same manufacturing batch with 60% wood fibre, 35% LDPE (low-density polyethylene) and 5% additives from a commercial source were tested. Before the aging process, the samples were conditioned in a climate chamber (20 ± 2 °C and $65 \pm 5\%$ RH).

The accelerated aging procedure consists of water immersion, in which 20 samples were immersed in water at 20°C, and another 20 samples at 50°C, divided into eight groups of five samples. For each bath temperature, one group was extracted every 14 days, and non-destructive methods and standard tests were performed. Specimens were tested after removal from the bath and conditioned in a climate chamber. Finally, five unaged samples also conditioned were tested as a control group. Density, humidity, MOR and MOE were determined according to European Standards.

The non-destructive techniques used for estimating the physical and mechanical properties were divided into two groups: Longitudinal propagation waves, through the time-of-flight of an ultrasonic wave with the 22 kHz Sylvastest Duo ultrasound device by CBS-CBT, and the time-of-flight of stress waves with the microsecond timer (MST) device by Fakopp Enterprise (Figure 1; A, B). Probing methods for gauging the pullout resistance with a screw withdrawal force meter (SWFM) by Fakopp Enterprise, with yellow zinc plated 4x70 mm standard Heco-Fix plus screw that passes through the 8 mm thick specimen without pre-drilling. Penetration resistance was then tested with the Pilodyn 6J penetrometer by Proceq, consisting of a calibrated spring that shoots a 2.5 mm diameter steel needle with constant energy of 6 J and measures the depth of penetration of the needle into the material to be analysed (Figure 1; C and D). Using Statgraphics Centurion 18 (Version 18.1.14) software, a statistical analysis was carried out.

3. Results

Water treatment	Days	Density (kg/m ³)	MOR (N/mm ²)	MOE (N/mm ²)	Vel US22 (m/s)	Vel MST (m/s)	SWRM (N/mm)	PIL (mm)
No Treatment	0	1422 aA	39 aA	4529 aA	2724 aA	2070 aA	201 aA	2.45 aA
20°C	14	1417 a	35 b	3935 b	2712 a	2081 a	177 b	2.50 a
	28	1414 a	34 bc	3540 c	2678 a	1934 b	193 c	3.05 b
	42	1410 a	33 cd	3330 c	2608 b	1986 c	188 c	2.80 bc
	56	1411 a	32 d	2654 d	2457 c	1988 c	187 bc	2.65 ac
50°C	14	1396 B	31 B	3081 B	2549 B	2087 A	180 B	2.75 A
	28	1392 C	25 C	2920 B	2433 C	1861 B	170 C	3.55 B
	42	1383 CD	22 D	2432 C	2213 D	1648 C	160 D	3.85 B
	56	1371 D	19 E	1716 D	2006 E	1596 C	145 E	4.75 C

Table 1: General mean results for density, modulus of rupture (MOR), modulus of elasticity (MOE), stress wave velocity (MST), ultrasonic 22 kHz velocity (US22), Pilodyn penetration (PIL) and screw withdrawal resistance (SWRM). The letters next to the numbers indicate differences between groups. Different letters imply statistical differences.

Table 1 show the trends of the variables measured and the statistical differences between the data groups. The results indicate that the influence of the aging immersion at the higher temperature is much more marked, and the variations in the physical and mechanical properties are clearer in the case of the highest temperature. Thus, the immersion process at 20°C produced losses in density of less than 2%, MOR less than 20%, and MOE slightly higher than 40%, but not always with statistical differences between treatment phases; however, at 50°C these losses are practically double, specifically about 4% for density, over 50% for MOR, and 60% for MOE, this time with clear statistical differences. After the treatment in water at 20°C, the prediction models obtained to estimate the physical or mechanical properties using non-destructive parameters rarely meet the statistical criteria. However, the data obtained after the hot water treatment indicate that most non-destructive methods allow a reasonably reliable estimation of the control parameters, with coefficients of determination ranging from 59 to 96%. Table 2 briefly summarizes these models, in which the ultrasound wave velocity presents the best behaviour, closely followed by stress wave and screw withdrawal methods.

Density = A*X + B				
M	A	B	SE	R ²
US 22 kHz	0.05480	1260.82	9.50	70
Stress wave	0.06055	1279.21	10.90	59
SWFM	0.7165	1268.72	9.48	69
Pilodyn	15.335	1444.59	10.35	63
MOR = 1/(B + A/X)				
M	A	B	SE	R ²
US 22 kHz	206.754	-0.0482342	0.00	94
Stress wave	144.281	-0.0393911	0.00	82
SWFM	14.7754	-0.0478797	0.00	96
Pilodyn	-0.121477	0.0766845	0.00	85
MOE = 1/(B + A/X)				
M	A	B	SE	R ²
US 22 kHz	2.60758	-0.000734136	0.00	96
Stress wave	1.63114	-0.000513793	0.00	69
SWFM	0.1734	-0.000647362	0.00	87
Pilodyn	MOE=1/(0,000146884+0,0000181158*P ²)		0,00	83

Table 2: Models to estimate density, MOR and MOE using ultrasound, stress wave, screw withdrawal resistance and Pilodyn after aging in water at 50°C. Where: density (kg/m³), MOE (N/mm²), MOR (N/mm²), X=value obtained with the equipment used (waves m/s, SWRM N/mm, penetrometer mm) and A, B are constants. R² is the coefficient of determination and SE the standard error.

4. Conclusions

After 56 days of immersion in water, WPC suffers a decrease in properties that is more patent at a temperature of 50°C. However, the density in both treatments is slightly affected in the process due to the waterproofing of the plastic. For the same reason, the remaining control parameters, MOR and MOE, are more affected by the aging immersion at a temperature of 50°C, where the hot water produces much greater losses of resistance and elasticity.

There is a strong relationship between non-destructive measurements and the decrease in properties, with better results obtained in the estimation of the properties with the treatment at 50°C, where all non-destructive devices are good estimators of the properties of the composite. Ultrasound is the best estimator in terms of reliability, while probing methods, especially screw withdrawal, also achieve very good results.

References

- [1] Smith, P.M., & Wolcott, M.P. (2006). Opportunities for wood/natural fiber-plastic composites in residential and industrial application. *Forest Products Journal*. 56(3), 4-11.
- [2] Segerholm, B.K, Ibach, R.E, Walinder, M.E.P (2012). Moisture sorption in artificially aged wood-plastic composites. *BioResources* 7(1), 1283-1293. <https://doi.org/10.15376/biores.7.4.4575-4585>
- [3] Mubarak, A. Khan. K.M. Idriss Ali (1993). Effect of moisture and heat on mechanical properties of wood and wood-plastic composite. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 32:1-2, 5-13. <https://doi.org/10.1080/03602559308020151>
- [4] American Society for Testing and Materials (2007), Standard guide for evaluating mechanical and physical properties of Wood-plastic composite products ASTM D 7031-04 (2004) Philadelphia, PA.
- [5] Kazemi Najafi, S., Ebrahimi, G., Behjati, S. (2008). Nondestructive Evaluation of Wood Plastic Composites Using Ultrasonic Technique. 38 Mezinárodní Konference Defektoskopie Brno, 4. – 6. 11.
- [6] Lockard, C. D. (2015). Anomaly detection in radiographic images of composite materials via crosshatch regression. (1586713 M.A.), Mills College, Ann Arbor. Retrieved from ProQuest Dissertations & Theses Global database.
- [7] Newswire, P. (2013, 2013 Feb 07). Global Non-Destructive Testing (NDT) Equipment Market - By Technology (Ultrasonic, Eddy Current, Electromagnetic, Radiography, Thermography), Verticals (Manufacturing, Petrochemical, Aerospace, Automotive, Power Generation) & Geography (2013, 2018), PR Newswire.
- [8] Chung, M. J., Wang, S. Y. (2019). Physical and mechanical properties of composites made from bamboo and woody wastes in Taiwan. *Journal of Wood Science*, 65(1), 1-10. <https://doi.org/10.1186/s10086-019-1833-1>
- [9] Bobadilla, I.; Gonzalez, G. I.; Herrero, M. E.; Martitegui, F. A. (2012). Vibration Method for the Prediction of Aging Effect on Properties of Particleboard and Fiberboard. *Forest Products Journal* v. 62, n. 1, p. 69-74. <https://doi.org/10.13073/FPJ-D-11-00137.1>

- [10] Mirbolouk, P. Roohnia, M. (2016). Evaluation of dynamic modulus of elasticity of medium density fiberboard panel from longitudinal vibration tests on specimens. *BioResources* 10 (1), 613-621. <https://doi.org/10.15376/biores.10.1.613-621>
- [11] Haseli, M., Layeghi, M., Hosseinabadi, H. Z. (2020). Evaluation of modulus of elasticity of date palm sandwich panels using ultrasonic wave velocity and experimental models. *Measurement*, 149, 107016. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107016>
- [12] Zhang, L., Tiemann, A., Zhang, T., Gauthier, T., Hsu, K., Mahamid, M., Ozevin, D. (2021). Nondestructive assessment of cross-laminated timber using non-contact transverse vibration and ultrasonic testing. *European Journal of Wood and Wood Products*, 79(2), 335-347. <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01644-4>
- [13] Nesvijski, E.G. (2000). Some aspects of ultrasonic testing of composites. *Composite Structures* 48: 151-155. [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(99\)00088-4](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(99)00088-4)
- [14] Nzokou, P., J. Freed & D.P. Kamdem (2006). Relationship between non-destructive and static modulus of elasticity of commercial wood plastic composites. *HolzalsRoh- und Werkstoff* 64: 90–93. <https://doi.org/10.1007/s00107-005-0080-x>
- [15] Najafi, S. K.; Ebrahimi, G.; Behjati, S. (2008). Nondestructive evaluation of wood plastic composites using ultrasonic technique. In: 38th International Conference and NDT Exposition. Brno, Czech Republic, p. 87-94. Brno: Brno University of Technology. <https://www.ndt.net/article/defektoskopie2008/papers/87.pdf>.

1134

PHYSICAL AND MECHANICAL ASSESSMENT OF ITAUBA WOOD WELDED BY ROTARY FRICTION

Ana Carolina Costa Viana¹; Renato Barbosa Sampaio²; Poliana Dias De Moraes¹; Walter Lindolfo Weingaertner¹

¹ Universidade Federal de Santa Catarina;

² Instituto Federal do Paraná;

Palabras clave / Palavras-chave:

Dowel connections, Feed rate, Mezilaurus itauba, Pre-drilled hole stage, Wood welding

Resumen / Resumo:

This exploratory research aimed to evaluate the physical characteristics of the welded dowel surface and the mechanical performance of itauba (*Mezilaurus itauba*) welded joints, due to 1 and 2-stage pre-drilled hole and 300, 400 and 500 mm·min⁻¹ of feed rate. The physical and mechanical evaluations were carried out through micrographs from scanning electron microscopy (SEM) test and results from tensile test due to the pull-out of the dowels, respectively. Subsequently, the optimal welding parameters were determined. The dowel wood fibres were covered by the molten material, forming a smooth and uniform surface due to the low permeability of itauba wood. The optimal RFW parameters were 1-stage pre-drilled hole and 300 or 400 mm·min⁻¹ of feed rate, resulting a shear strength of 1.21 MPa.

1. Introduction

Rotary friction welding (RFW) is a process of joining wood pieces without any adhesive [1]. The dowel, rotated at high-speed, is inserted into the pre-drilled hole machined in the substrate, with a specific feed rate [1]. Friction causes softening and flowing of some wood polymers at the interface, which solidify and join the dowel and the substrate surfaces [1, 2]. RFW has potential for application in furniture and mass timber products manufacturing [2].

Parameters related to RFW process, such as the pre-drilled hole stage and the feed rate [3], influence the welded joint formation and its mechanical performance, since they contribute to heat due to friction [1, 3]. Therefore, to obtain a joint between the dowel and the substrate, the combination of welding parameters must guarantee a balance between welding time and interface carbonization [3].

There is few research on RFW of Brazilian tropical woods, where only itauba-pine and itauba-itauba (dowel-substrates) welded joints have been studied [3–5]. Itauba (*Mezilaurus itauba*), from the Amazon region, is commonly used in the furniture industry and in the construction [6]. However, the influence of RFW parameters on the mechanical performance of itauba-itauba joints has not been determined. Therefore,

this exploratory research aims to evaluate the physical characteristics of the welded dowel surface and the mechanical performance of itauba-itauba joints due to the shear engaged by tensile pull-out of the dowel, for 1 and 2-stage pre-drilled hole and 300, 400 and 500 mm·min⁻¹ of feed rate. Subsequently, the optimal RFW parameters are determined. This study will contribute to the improvement of RFW technique when applied to Brazilian tropical woods and woods with similar anatomical characteristics.

2. Materials and methods

In this research, the scanning electron microscopy (SEM) test and the tensile test due to the pull-out of the dowel were carried out.

2.1. Wood

Itauba (*Mezilaurus itauba*), a native Brazilian tropical hardwood, with an average density of 824 ± 8 kg/m³ ($12 \pm 0.13\%$ moisture content - MC), was used. It has low permeability and is moderately difficult to machining, due to the presence of silica, however, it has a good surface finish [6]. It is commercially available in Brazil and is commonly used in the furniture industry and in the construction [6].

2.2. Samples and specimens

For the tensile test, thirty specimens composed of itauba dowels and substrates were used. The dowels were smooth with 10 mm in diameter and 80 mm in length. The substrates were composed of two pieces, A' and A'', with 63.5 mm × 50 mm × 25 mm each, adapted from the ABNT NBR 7190-3 [7] standard for transverse tensile testing. The specimens were conditioned at 20 ± 2 °C and $60 \pm 5\%$ relative humidity before and after the RFW process to maintain 12% of MC.

The specimens were divided into 6 groups with different RFW parameters (Table 1). Pre-drilled holes were machined in the centre of the substrates, in the radial-tangential plane, perpendicular to the fibres and tangential to the growth rings. In pieces A', the pre-drilled holes had 8 mm in diameter (1.25 dowel/pre-drilled hole diameter ratio). In pieces A'', the pre-drilled holes varied between 7 and 8 mm in diameter [3], characterizing them as 1 and 2-stage, respectively. The dowels were welded into the holes with 300, 400 or 500 mm×min⁻¹ of feed rate and 1000 rpm of rotation. Later, the specimens were submitted to mechanical tensile tests and microstructure evaluation.

Table 1. Welding parameters

Group	A	B	C	D	E	F
Pre-drilled hole stage	1 (8 and 8 mm)			2 (8 and 7 mm)		
Feed rate (mm×min ⁻¹)	300	400	500	300	400	500

For the SEM test, a specimen with 8 mm × 10 mm × 5 mm, which contained part of the dowel, was used. It was extracted from a Group C specimen, after the mechanical tensile test, from a cut perpendicular to the dowel wood fibers and tangential to the growth rings.

2.3. Welding process

The welding process was performed using a machining centre. For 1-stage pre-drilled holes, the machining process was performed in one step, whose hole dimensions were 8 mm in diameter and 55 mm in depth. For 2-stage pre-drilled holes, the machining process was performed in two steps. First, holes measuring 7 mm in diameter and 55 mm in depth were drilled. Second, holes measuring 8 mm in diameter and 25 mm in depth were drilled, in the same position as in the first step. Subsequently, the dowels were welded into the pre-drilled holes at a depth of 55 mm.

2.4. Sem test

The specimen was stored in an oven at 40 °C to remove residual moisture that could influence the quality of the micrographs. Thereafter, it was fixed on a stub, covered with gold in a sputtering system and placed in a sample holder. Subsequently, it was placed in the SEM, with an acceleration voltage between 0.5 and 30 kV.

2.5. Mechanical tensile test

The specimens were submitted to tensile tests to determine the shear engaged by tensile pull-out of the dowel. A tensile force parallel to dowel fibres and perpendicular to substrate fibres were applied using a universal testing machine. The load increased monotonically at 2 mm×min⁻¹, due to the crossbar displacement, until the pull-out of the dowel. The shear engaged by the tensile pull-out of the dowel was determined by the ratio between the maximum force verified in the load × displacement curve and the welded surface area of the dowel in piece A».

2.6. Physical and mechanical analysis

Physical analysis consisted of evaluating the microstructure of the itauba dowel surface, based on the micrographs obtained in the SEM test, which were compared with those of other wood species from literature. Mechanical analysis consisted of statistically evaluating the shear engaged by the tensile pull-out of the dowels, which was a dependent variable, while the pre-drilled hole stage and the feed rate were independent variables. The normality and homogeneity of the dependent variable data were verified using the Shapiro-Wilk and Levene tests [8]. The influence of welding parameters was evaluated using the Kruskal-Wallis non-parametric test [9], followed by the Conover test to compare the group medians [8], since the data were not normal and homogeneous. The statistical tests were performed considering 5% probability of error. After statistical analysis, the optimal RFW parameters were determined.

3. Results and discussion

Figure 1 illustrates the micrographs of the dowel surface from Group C specimen, after the mechanical tensile test. The wood fibres were covered by the molten material, forming a smooth and uniform surface, different from that described for *Fagus sylvatica* and *Picea abies* European species, whose fibres intertwined with the molten material and have been pulled out during the tensile test [1]. This difference is probably due to the low permeability of itauba, which is resistant to treatments since its pores are obstructed by tilos and oleoresins [6]. Furthermore, itauba has a high extractive content, 7.7% [5]. These characteristics make it difficult to impregnate the molten material, as well as to form the welded joint.

In Table 2, the average shear engaged by the tensile pull-out of the dowels, for 1 and 2-stage pre-drilled hole and 300, 400 and 500 mm×min⁻¹ of feed rate, are presented. The Conover test indicated that there are statistically significant differences between the medians of groups A–C, A–D, A–E, A–F, B–C, B–D, B–E, B–F, C–D, C–E and D–F. This denotes that the welding parameters influence the shear engaged by the tensile pull-out of the dowels.

The results are lower than that obtained by Viana *et al.* [3] when welding itauba dowels into 1-stage pre-drilled holes machining on *Pinus taeda* substrates (3.6 MPa), using 1000 rpm of rotation and 500 mm×min⁻¹ of feed rate. This difference must be associated with the greater porosity of pine, which allows the molten material to impregnate in its pores, contributing to the dowel and substrate join [5].

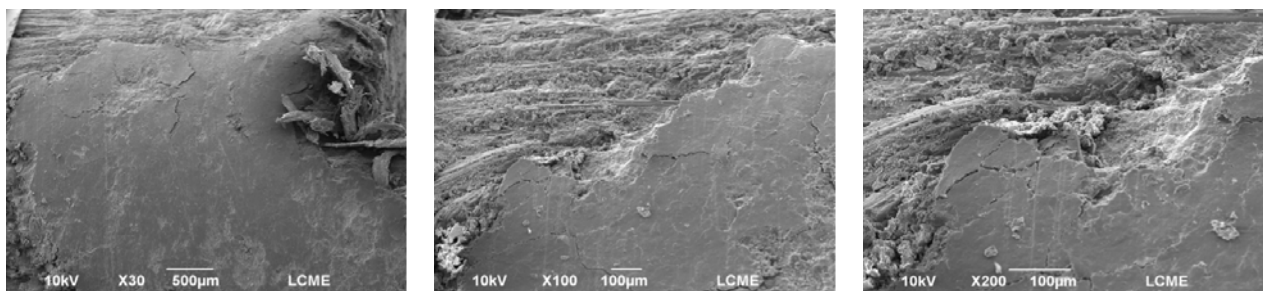


Figure 1. Welded dowel surface

Table 2. Average shear engaged by the tensile pull-out of the dowels

Group	A	B	C	D	E	F
Pre-drilled hole stage	1 (8 and 8 mm)			2 (8 and 7 mm)		
Feed rate (mm×min ⁻¹)	300	400	500	300	400	500
Average shear strength (MPa)	1.15	1.27	0.84	0.51	0.57	0.71
Coefficient of variation (%)	10	37	13	14	17	26

The optimal RFW parameters was that from groups A and B. The pre-drilled hole of piece A" with the largest diameter (8 mm in diameter), associated with the lower feed rates (300 and 400 mm×min⁻¹), contributed to a higher average shear strength. Belleville *et al.* [10] reported higher mechanical strength results for larger diameter pre-drilled holes when welding *Corymbia maculata* and *Eucalyptus pilularis* hardwood species. They adopted 1.11, 1.26 and 1.45 dowel/pre-drilled hole diameter ratio and 1230 rpm of rotation. According to these authors, for high-density woods, larger diameter pre-drilled holes facilitate the insertion of the dowel, avoiding excess wear.

The scope of this research was limited to feed rates between 300 to 500 mm×min⁻¹ and 2 pre-drilled hole configurations. More work will need to be done to evaluate a wider range and different configurations to determine whether they can improve the shear engaged by the tensile pull-out of the dowels for itauba-itauba joints. Furthermore, the rotation of the dowel must be investigated since it favors the generation of heat at the welding interface.

4. Conclusions

In this research, the physical characteristics of the welded dowel surface and the mechanical performance of itauba-itauba welded joints, due to the RFW parameters, were evaluated and the optimal RFW parameters were determined. The findings allow us to conclude that the dowel wood fibres were covered by the molten material, forming a smooth and uniform surface due to the low permeability of itauba wood. The optimal RFW parameters were 1-stage pre-drilled hole and 300 or 400 mm·min⁻¹ of feed rate, resulting in welded surfaces with average shear strength of 1.21 MPa at tensile pull-out of the dowel.

Acknowledgement

The authors thank the staff of Mechanical Laboratory (IFSC-Criciúma), Laboratory for Nanotechnology Applications in Civil Construction (UFSC) and UFSC Multiuser facilities Microscopy Central Laboratory (UFSC) for technical support during RFW process, tensile tests and SEM experiments, respectively. The first author thanks the Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel (CAPES) for the doctoral scholarship (Finance Code 001).

References

- [1] Pizzi, A.; Leban, J.M.; Kanazawa, F.; Properzi, M.; Pichelin, F. (2004) Wood dowel bonding by high-speed rotation welding. *J. Adhes. Sci. Technol.*, 18(11):1263–1278. doi.org/10.1163/1568561041588192
- [2] Li, S.; Zhang, H.; Shu, B.; Cheng, L.; Ju, Z.; Lu, X. (2021) Study on the bonding performance of the Moso bamboo dowel welded to a poplar substrate joint by high-speed rotation. *J. Renew. Mater.*, 9(7):1225–1237. doi.org/10.32604/jrm.2021.014364
- [3] Viana, A.C.C.; Ebersbach, F.G.; Moraes, P.D.; Weingaertner, W.L. (2022) Influence of pre-drilling hole and feed rate on welded surface strength of pine-itauba joints. *Case Stud. Constr. Mater.*, 17. doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01473
- [4] Viana, A.C.C.; Moraes, P.D.; Weingaertner, W.L.; Zaniboni, P.A.; Prando, T. (2021) Soldagem das madeiras de pinus e de itaúba por fricção rotativa. *Revista Principia*, 57:63–75. doi.org/10.18265/1517-0306a2021id5809
- [5] Viana, A.C.C.; Campos, C.E.M.; Moraes, P.D.; Weingaertner, W.L. (2023) Bond-line strength, chemical properties and cellulose crystallinity of welded pine and itauba wood. *Wood Mater. Sci. Eng.*, 1–13. doi.org/10.1080/17480272.2023.2225043
- [6] Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT). Informações sobre madeiras. https://www.ipt.br/consultas_online/informacoes_sobre_madeira/busca.
- [7] Brazilian standard (2022) NBR 7190-3. Projeto de estruturas de madeira. Parte 3: Métodos de ensaio para corpos de provas isentos de defeitos para madeiras de florestas nativas. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro, Brasil.
- [8] Field, A.; Miles, J.; Field, Z. (2012) *Discovering statistics using R*. SAGE. London.
- [9] Montgomery, D.C.; Runger, G.C. (2003) *Applied statistics and probability for engineers*. Wiley. New York.
- [10] Belleville, B.; Ozarska, B.; Pizzi, A. (2016) Assessing the potential of wood welding for Australian eucalypts and tropical species. *Eur. J. Wood Wood Prod.*, 74:753–757. doi.org/10.1007/s00107-016-1067-5

1135

PLANTEAMIENTO DE LA DURABILIDAD EN LA SEGUNDA GENERACIÓN DEL EUROCÓDIGO 5 ESTRUCTURAS DE MADERA

Francisco Arriaga¹; Guillermo Íñiguez-González¹; Daniel F. Llana¹; Ignacio Bobadilla Maldonado¹; Miguel Esteban¹

¹ Universidad Politécnica de Madrid; Grupo de Investigación de Construcción con Madera

Palabras clave / Palavras-chave:

Corrosión, Hongos, Insectos, Protección pasiva, Xilófagos

Resumen / Resumo:

El cuerpo normativo de los Eurocódigos está en fase de desarrollo de una segunda generación que será publicada previsiblemente en 2025. En el borrador del documento dedicado a la madera, en la parte 1-1 del proyecto de norma Europea EN 1995, el capítulo 6º trata de la durabilidad, incluyendo la madera y los herrajes. Su contenido representa un avance con respecto a la versión vigente. En el aspecto relativo a la durabilidad de la madera su contenido se centra principalmente en las medidas de carácter constructivo para reducir el riesgo de ataques de hongos e insectos xilófagos, y la necesidad de aplicar tratamientos de protección. La parte dedicada a la durabilidad de los herrajes también presenta un desarrollo más extenso que la versión vigente, al incorporar las categorías de exposición de la madera incluyendo la influencia de la acidez de algunas especies y las clases de exposición al ambiente atmosférico. Los Eurocódigos son normas principalmente enfocadas al proyecto y cálculo de las estructuras, y es relativamente fácil unificar los criterios de seguridad que le afectan. Sin embargo, es más complicado unificar criterios para la protección de la madera mediante tratamientos añadidos, debido a que las regulaciones legales varían según el país, así como los condicionantes sociales.

1. Introducción

El conjunto de los Eurocódigos ha sido desarrollado por el Comité Europeo de Normalización CEN/TC 250 “Eurocódigos” constituido en la actualidad por los organismos nacionales de normalización de 34 países: Alemania, Austria, Bélgica, Bulgaria, Chipre, Croacia, Dinamarca, Eslovaquia, Eslovenia, España, Estonia, Finlandia, Francia, Grecia, Hungría, Irlanda, Islandia, Italia, Letonia, Lituania, Luxemburgo, Malta, Noruega, Países Bajos, Polonia, Portugal, Reino Unido, República Checa, República de Macedonia del Norte, Rumania, Serbia, Suecia, Suiza y Turquía. Son normas de obligado cumplimiento en la mayoría de los países. En el caso de España todavía coexisten con la normativa nacional, pero es previsible que en breve sustituyan completamente a las nacionales. La segunda generación de Eurocódigos que será publicada previsiblemente en 2025, incluirá las siguientes normas:

- EN 1990 Eurocódigo 0. Bases de cálculo estructural y geotécnico
- EN 1991 Eurocódigo 1. Acciones en estructuras
- EN 1992 Eurocódigo 2. Proyecto de estructuras de hormigón
- EN 1993 Eurocódigo 3. Proyecto de estructuras de acero
- EN 1994 Eurocódigo 4. Proyecto de estructuras mixtas de acero y hormigón
- EN 1995 Eurocódigo 5. Proyecto de estructuras de madera
- EN 1996 Eurocódigo 6. Proyecto de estructuras de fábrica
- EN 1997 Eurocódigo 7. Proyecto geotécnico
- EN 1998 Eurocódigo 8. Proyecto de estructuras resistentes al sismo
- EN 1999 Eurocódigo 9. Proyecto de estructuras de aluminio

Dentro del Eurocódigo 5 se encuentran las partes, y especificación técnica, siguientes:

EN 1995-1-1, Eurocódigo 5. Proyecto de estructuras de madera. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para la edificación

EN 1995-1-2, Eurocódigo 5. Proyecto de estructuras de madera. Parte 1-2: Proyecto en situación de incendio.

EN 1995-2, Eurocódigo 5. Proyecto de estructuras de madera. Parte 2: Puentes

EN 1995-3, Eurocódigo 5. Proyecto de estructuras de madera. Parte 3: Ejecución

Especificación Técnica CEN/TS 19103, Proyecto de estructuras de madera. Cálculo estructural de estructuras compuestas de madera y acero. Reglas comunes y reglas para la edificación.

El borrador del proyecto de norma prEN 1995-1-1 “Proyecto de estructuras de madera. Parte 1-1 Reglas generales y reglas para la edificación” tiene 275 páginas en el texto principal y 165 en los anexos (en su versión en lengua inglesa). El capítulo 6º, que trata de la durabilidad, tiene una extensión de 7 páginas, lo que representa un 2,5% del texto principal. En la versión vigente de esta norma UNE-EN 1995-1-1:2016 [1], el capítulo 4 de durabilidad ocupa únicamente una página, por lo que su contenido será más amplio en la versión futura. El objeto de este texto es resumir el contenido del borrador del futuro capítulo, procurando destacar lo esencial.

2. Generalidades

Esta parte constituye un marco general para definir qué se entiende por durabilidad de una estructura y cuáles son las medidas a considerar en aras de su protección. Una estructura durable debe cumplir los requisitos de resistencia mecánica y aptitud al servicio durante la vida útil para la que fue proyectada, con un mantenimiento mínimo, pero sin que sean necesarias grandes reparaciones, de acuerdo con los requisitos generales de la norma prEN 1990.

Las medidas a considerar para garantizar lo anterior incluyen: el diseño correcto de la construcción y sus detalles, la adecuada elección del material, la ejecución (donde se hace referencia a la parte de la norma sobre la ejecución, prEN 1995-3) y el mantenimiento.

3. Medidas para prevenir un ataque biótico

3.1. Medidas generales

El riesgo de ataque biológico de la madera se determina según la norma UNE-EN 335:2014 [2] donde se definen las clases de uso (de 1 a 5). De manera aproximada: la clase 1 corresponde a interiores, la clase 2 a situaciones cubiertas pero expuestas al ambiente exterior (no a la intemperie), la clase 3 a la intemperie, pero sin contacto con el suelo, la clase 4 en contacto directo con el suelo o el agua dulce, y la clase 5 en contacto permanente con agua salada. A este respecto, se hace una mención expresa de que las clases de uso no están ligadas directamente con las clases de servicio. Éstas últimas tienen un objetivo diferente que consiste en el ajuste de las propiedades mecánicas de resistencia y rigidez en función del contenido de humedad medio en la pieza de madera. Sin embargo, las clases de uso están ligadas al riesgo de ataque de hongos e insectos xilófagos, y en el caso de los hongos de pudrición su desarrollo puede iniciarse con un contenido de humedad alto en una zona localizada, aunque el contenido de humedad medio de la pieza pueda ser mucho más bajo.

En el caso de piezas y uniones que se encuentren directamente expuestas a la intemperie, como pueden ser las torres de madera, se indica que puede aplicarse la norma prEN 1995-2 (puentes). En la parte de esa norma dedicada a los puentes de madera, también el capítulo 6 de durabilidad trata con más profundidad este tema, incluyendo cuestiones como la inspección, mantenimiento, evacuación de agua, sellados, etc.

3.2. Medidas para piezas que no estén en contacto con el suelo o el agua

3.2.1. Medidas constructivas básicas

El proyecto de norma recomienda la utilización de productos de madera con un contenido de humedad máximo del 20%, pero también admite su utilización con contenidos de humedad mayores, siempre que pueda asegurarse que se secará después de su instalación en obra sin que se deriven efectos perjudiciales. Además avisa de la posibilidad de aparición de fendas.

La madera debería mantenerse fuera del alcance de la lluvia o en todo caso deberá facilitarse la evacuación rápida del agua mediante adecuadas medidas constructivas. Se evitarán las trampas para el agua como los cajeados sin salida de desagüe, holguras estrechas entre piezas horizontales,

agrietamientos producidos por el efecto del clima, por ejemplo en superficies horizontales superiores, testas desprotegidas, etc., recomendando para su protección por ejemplo situarlas a la sombra de la lluvia, o proteger las partes bajas de las piezas de las salpicaduras del agua mediante plintos, etc. En los apoyos de la estructura cercanos al suelo deberá asegurarse que la vegetación, las hojas, la suciedad y la tierra no impiden un secado rápido y en su caso facilitar la limpieza fácil de esas zonas. También se citan medidas para la protección de humedades procedentes de los materiales porosos o de la condensación, mediante barreras impermeables.

Cuando exista la posibilidad de ataque de termitas deberían considerarse medidas adicionales: como los tratamientos protectores y las barreras físicas en la cimentación, un plan periódico de inspección en las zonas de posible acceso de termitas, evitar fuentes de humedad incontroladas cercanas, y la instalación de cebos de vigilancia y dispositivos de tratamiento preinstalados para activar en caso de infestación.

3.2.2. Medidas constructivas especiales

Estas medidas se aplicarán, además de las básicas, cuando se pretenda evitar la utilización de tratamientos de protección. En el caso de riesgo de ataque de termitas se requieren medidas adicionales que podrán ser objeto de anexos nacionales. Es interesante constatar que el proyecto de norma se refiere a tratamientos de protección de manera genérica sin incluir expresamente la palabra química. El tratamiento podría ser químico o físico o de modificación de la madera.

El contenido de humedad de la madera será menor o igual al 20%. La protección contra los hongos de pudrición consistirá en limitar el contenido de humedad de equilibrio higroscópico en cualquier parte de la pieza al 20% mediante un sistema constructivo y detalles adecuados.

La protección contra los insectos xilófagos consistirá en la selección adecuada del material: utilizando madera de coníferas secada en cámara (secado automatizado con una temperatura de al menos 55 °C durante al menos 48 h, o fabricados únicamente con duramen con durabilidad adecuada para, al menos, la clase de uso 1 de la norma UNE-EN 335:2014 [2], o fabricado con tableros derivados de la madera (LVL o GLVL). Como alternativa a lo anterior, se cita el caso de los locales de fácil acceso para la inspección, o protegidos contra la entrada de insectos mediante un revestimiento adecuado.

3.3. Corrosión

3.3.1. Categorías de exposición atmosféricas y de la madera

En la corrosión de los herrajes influyen las condiciones atmosféricas que tienen en cuenta su situación al interior o al exterior, la cercanía a la orilla del mar, la cercanía a carreteras con mucho tráfico, con sales de deshielo y el nivel de contaminación del ambiente. El Eurocódigo recoge cinco clases de exposición atmosférica (C_E1 a C_E5) extraídas de la norma EN ISO 9223:2012 [3].

Por otro lado, la acidez de la madera influye en la corrosión del metal. Para considerar esta influencia, se establecen cinco categorías de exposición de la madera (T_E1 a T_E5) en función del pH de la especie, del contenido de humedad medio anual de la madera y de la posible existencia de tratamientos en la madera. Estas clases están extraídas de la norma UNE-EN 14592:2023 [4].

3.3.2. Especificación de la protección y vida útil

La norma especifica el requisito de protección para el acero al carbono definiendo un espesor mínimo de cinc (0 a 110 μm) o una clase mínima de resistencia a la corrosión para el acero inoxidable (C_R1 a C_R5). Esta especificación se obtiene como consecuencia de la clase de exposición atmosférica y de la clase de exposición de la madera, adoptándose el criterio más estricto de ambos. La protección garantiza una vida útil de 50 años, y si la vida útil es diferente la norma indica que deberían adaptarse las medidas de protección (aunque no aclara cómo).

4. Conclusiones

El contenido del capítulo de durabilidad en la segunda generación del Eurocódigo 5, supondrá un avance con respecto a lo que incluye la versión vigente. La consideración de la influencia de las condiciones atmosféricas es más precisa, ya que ahora se tendrán en cuenta factores como la contaminación y la situación a la intemperie, de una manera más precisa en comparación a lo anterior, donde únicamente se ligaba a la clase de servicio. Además, se incluye la influencia de la acidez de la especie y el tratamiento de la madera.

Referencias

- [1] Norma Europea (2016) UNE-EN 1995-1-1 Eurocode 5: Proyecto de estructuras de madera. Parte 1-1. General. Reglas comunes y reglas para la edificación. European Committee of Standardization (CEN): Brussels, Belgium, 2004-2014.
- [2] Norma Europea (2014) UNE-EN 335 Durabilidad de la madera de los productos derivados de la madera. Clases de uso: definiciones, aplicaciones a la madera maciza y a los productos derivados de la madera. European Committee of Standardization (CEN): Brussels, Belgium, 2013.
- [3] Norma Europea (2012) EN ISO 9223 Corrosión de los metales y aleaciones. Corrosividad de atmósferas. Clasificación, determinación y estimación. (ISO 9223:2012) (Ratificada por AENOR en marzo de 2012.)
- [4] Norma Europea (2023) UNE-EN 14592 Estructuras de madera. Elementos de fijación tipo clavija. Requisitos. European Committee of Standardization (CEN): Brussels, Belgium, 2012.

1136

PREDICTING EXTERNAL FLAMES THROUGH VERTICAL OPENINGS IN A COMPARTMENT WITH AN EXPOSED TIMBER SOFFIT

Edwin Ayala¹; Cristian Maluk¹

¹ *Semper*

Palabras clave / Palavras-chave:

CLT, External flames, Fire engineering, Vertical fire spread

Resumen / Resumo:

This abstract delineates a methodology employed to predict potential external flames through vertical openings in a compartment featuring exposed Cross Laminated Timber (CLT) floor slabs. The approach is founded on external flame empirical correlations developed by Law and O'Brien (1981) and incorporated in Eurocode 1. Recent research conducted by Glew et al. (2023) scrutinized the Eurocode 1 calculation methods in comparison to experimental data. Findings from this research indicated a significant potential for underestimating flame height and temperature. Notably, in this investigation, the Heat Release Rate (HRR) was calculated using the conventional Eurocode 1 method, neglecting the potential influence of burning CLT floor slabs on HRR. In the described calculation method, the HRR employed as input for external flame calculations is derived from iBMB parametric fire curves, accounting for the influence of the burning soffit of exposed CLT floor slabs. The methods expounded in this research are applied to determine the highest achievable (1) external flame height and (2) flame temperature at the base of the window on the floor above the origin of the fire. The outcomes of this calculation method, as delineated in this research, facilitate a quantitative comparison of flame height and temperature between the compartment with exposed CLT floor slabs and an equivalent compartment without CLT. Results of the external flame height and temperature calculation were systematically compared against real-scale experiments, including CodeRed, Epernon, and RISE experiments.

1. Introduction and background

This research article describes a fire engineering method used for predicting the external flames through vertical openings in a compartment during a fire – including the influence that the burning soffit of exposed Cross Laminated Timber (CLT) floor slabs. The method uses the basis of external flame empirical correlations developed by Law and O'Brien (1981) [1] and available in Eurocode 1 [2]. Recent research from Glew et al. (2023) [3] compared the Eurocode 1 [2] calculation methods against experimental data. Glew et al. (2023) [3] calculated the Heat Release Rate (HRR) using the typical method in the Eurocode 1 [2] – not considering the influence that burning CLT floor slabs may have on HRR. Outcomes of this

research [3,4] showed that the flame height and temperature can be significantly underestimated. For the calculation method described herein, the HRR used as input for external flame calculations is obtained using the iBMB parametric fire curves [5] including the influence that the burning soffit of exposed CLT floor slabs – which considers the influence that burning CLT floor slabs may have on HRR.

2. Methodology

The external flame height is estimated based on the empirical correlations shown in Eurocode 1 [2]. In order to consider the influence that burning CLT floor slabs may have in external flames, the maximum possible HRR of the fire is calculated using the method described in iBMB parametric fire curves [5] methodology. The calculation methods described in this research article are used to calculate the highest possible (1) external flame height and (2) the flame temperature at the base of the window at the floor above the floor where the fire originates.

The external flame height along the axis is calculated using the following equation:

$$L_{flame} = \frac{h_{eq}}{2} + \max\left(0; 1.9 \left(\frac{\dot{Q}_{max}}{w_t}\right)^{\frac{2}{3}} - h_{eq}\right) \quad (1)$$

where:

$\dot{Q}_{max}$ – maximum possible HRR of the fire is calculated using the method described in Research article A [MW].

w_t – total width of vertical openings representing open or broken windows during fire [m].

h_{eq} – weighted average window height [m]. ($h_{eq} \leq 1.25w_t$).

The flame temperature at the base of the window at the floor above from the floor where the fire originates is calculated using the following equation:

$$T_{flame @ window above} = (T_w - T_0) \cdot \left(1 - 0.4725 \cdot \left(L_{window above} \cdot \frac{w_t}{\dot{Q}_{max}}\right)\right) + T_0 \quad (2)$$

where:

T_w – upper layer smoke temperature at the window in floor where the fire originates [°C].

T_0 – ambient temperature (20°C).

$L_{window above}$ – axis length of external flames from the window at the base of the window at the floor above from the floor where the fire originates.

The aim of this methodology is to allow the quantitative comparison of the flame height and temperature between (see Figure 1):

equivalent compartment without CLT;

compartment with CLT; and

compartment with CLT and with horizontal projection at the façade.

The objective is to demonstrate that the flame height and temperature of a compartment with CLT is equal or less than that for an equivalent compartment without CLT. Alternatively, other scenarios could be modelled considering other variations to the façade; e.g., increased spandrel height.

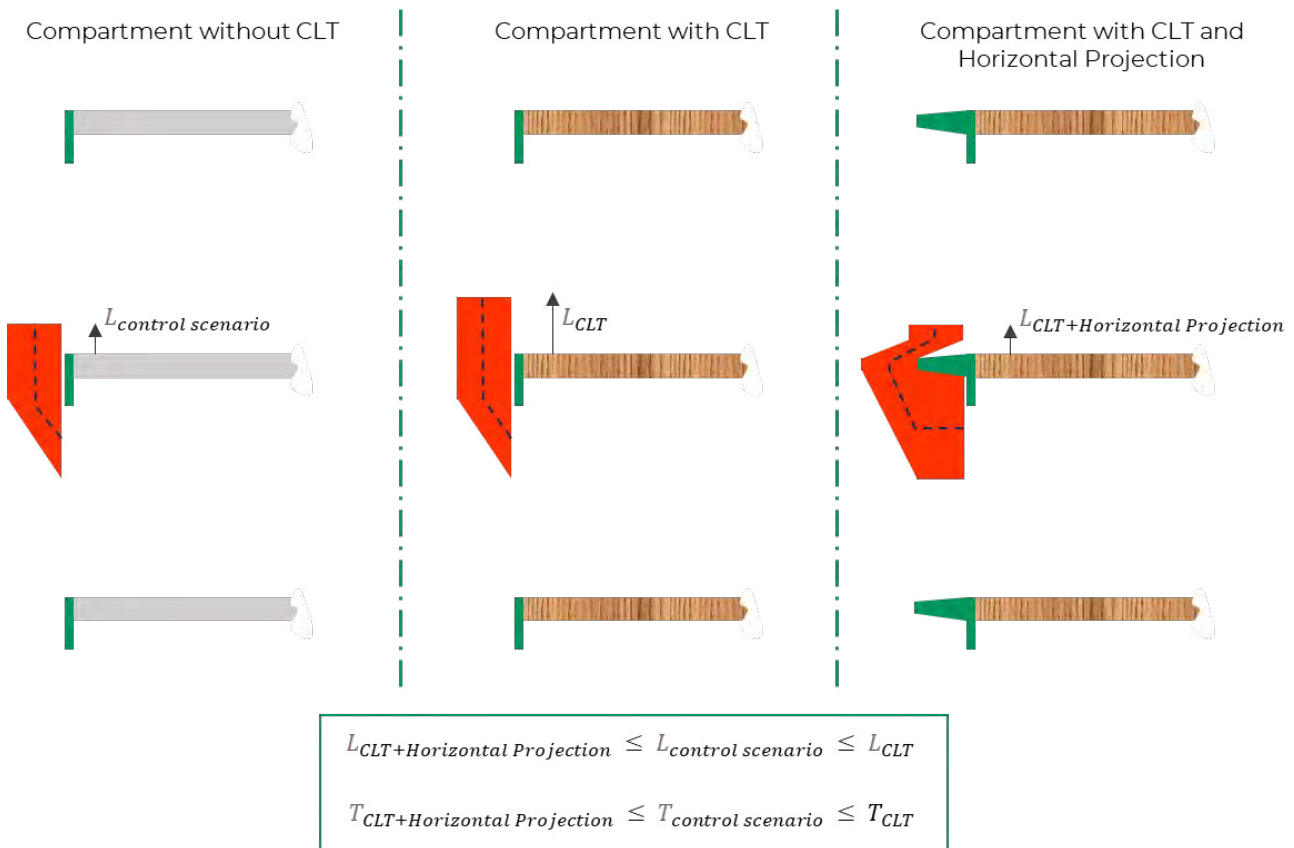


Figure 1. Comparison of the flame height between (left) a compartment without CLT, (centre) a compartment with CLT, and (right) a compartment with CLT and horizontal projection of the slabs.

3. Assumptions and limitations

The external flame projection is assumed to not be affected by forced draught [2] and therefore the most onerous condition is assumed for the projection of the external flame resulting in external/vertical upwards fire spread – see Figure 1. Based on the experimental data from large-scale fire experiments with CLT floor slabs with an exposed soffit (CodeRed [6,7,8], Epernon [9], RISE [10]), the upper layer smoke temperature at the window is assumed to be 1000°C. The tip of the flame that defines the external flame height along the axis is assumed to be position of that where the flame is just below 540°C – equivalent to the assumption made by Law and O’Brien (1981) [1] and Glew et al. (2023) [3]. The calculation method described herein is also valid for compartments without any exposed mass timber surfaces. The method is valid for compartments with exposed mass timber at the soffit of; i.e., this method has not been validated for scenarios with exposed mass timber on walls.

4. Empirical validation

The outcome of the calculations for external flame height and temperature using the method shown herein considering the influence for the burning soffit of exposed CLT floor slabs has been compared against the following real-scale experiments. Figure 2 shows the calculated and measured external flame height and temperature.

- CodeRed #1 [6], #2 [7], and #4 [8];
- Epernon #1 and #2 [9] experiments (with CLT and without CLT); and
- RISE experiments [10].

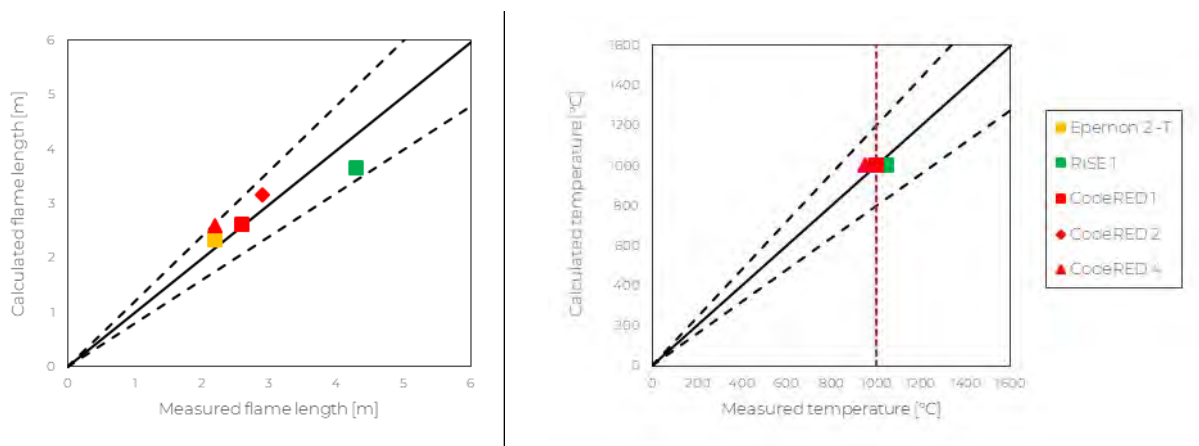


Figure 2. Comparison of the flame height and temperature of the flame calculated using the method described herein vs. measured data real-scale fire experiments.

5. Conclusions

The methods investigated in this research are applied to determine the highest possible (1) external flame height and (2) flame temperature at the base of the window on the floor above the floor where the fire might originate. The outcomes of this calculation method, as outlined in this research, facilitates a quantitative comparison of flame height and temperature between the compartment with exposed CLT floor slabs and an equivalent compartment without CLT. Results of the external flame height and temperature calculation were systematically compared against real-scale experiments, including CodeRed [6,7,8], Epernon [9], RISE [10].

References

- [1] M and O'Brien T (1981). Fire Safety of Bare External Structural Steel. *The Steel Construction Institute (SCI) – Publication 009*, 88pp.
- [2] Eurocodes. (2002). *BS EN 1991-1-2: Eurocode 1 – Actions on Structures – General Actions – Actions on structures exposed to fire*, 62pp.

- [3] Glew A, O'Loughlin E, Kotsovinos P, Barber B, and Schulz J. (2022). Application of the Law and O'Brien correlation for external flames to mass timber compartments. Proceedings of the 12th International Conference on Structures in Fire (SiF), 30th Nov till 2nd Dec 2022, Hong Kong. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.22193761.v1>
- [4] Glew A, O'Loughlin E, Kotsovinos P, Barber B, and Schulz J. (2022). A design approach to external fire spread from buildings with exposed mass timber. Proceedings of the World Conference on Timber Engineering (WCTE 2023), 19th-22nd June 2023, Oslo, Norway. <https://doi.org/10.52202/069179-0228>
- [5] Zehfuss J and Hosser D. (2007). A parametric natural fire model for the structural fire design of multi-storey buildings. *Fire Safety Journal*, Vol. 42, Issue 2, 115-126. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2006.08.004>
- [6] Kotosovinos P, Rackauskaite E, Christensen E, Glew A, O'Loughlin E, Mitchell H, Amin R, Robert F, Heidiri M, Barber D, Rein G, and Schulz J. (2022). Fire dynamics inside a large and open-plan compartment with exposed timber ceiling and columns: CodeRed#01. *Fire and Materials*, 2022:1-27. <https://doi.org/10.1002/fam.3049>
- [7] Kotosovinos P, Christensen EG, Rackauskaite E, Glew A, O'Loughlin E, Mitchell H, Amin R, Robert F, Heidiri M, Barber D, Rein G, and Schulz J. (2022). Impact of ventilation on the fire dynamics of an open-plan compartment with exposed timber ceiling and columns: CodeRed#02. *Fire and Materials*, 2022:1-28. <https://doi.org/10.1002/fam.3082>
- [8] Kotosovinos P, Christensen EG, Glew A, O'Loughlin E, Mitchell H, Amin R, Robert F, Heidiri M, Barber D, Rein G, and Schulz J. (2022). Impact of partial encapsulation on the fire dynamics of an open-plan compartment with exposed timber ceiling and columns: CodeRed#04. *Fire and Materials*, 2023:597-626. <https://doi.org/10.1002/fam.3112>
- [9] Bisby L, Bartlett A, Mindeguia J-C, Jansson McNamee R, Zehfub J, Franssen J-M, Robert F, Tessier C, and Mohaine S. (2020). *Epernon Fire Tests Programme – Synthesis Report (Report N° EFTP-2020/01)*. <https://www.epernon-fire-tests.eu>
- [10] Brandon D, Sjostrom J, Temple A, Hallberg E, and Kahl F. (2021). *Fire safe implementation of visible mass timber in tall buildings – compartment fire testing (RISE report 2021:40)*. ISBN: 978-91-89385-26-9. <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ri:diva-58153>

1137

PREDICTING THE GROWTH, INTENSITY, AND DURATION OF A POSSIBLE FIRE SCENARIOS IN A COMPARTMENT WITH AN EXPOSED TIMBER SOFFIT

Cristian Maluk¹; Edwin Ayala¹

¹ *Semper*

Palabras clave / Palavras-chave:

CLT, Fire engineering, Fire scenarios

Resumen / Resumo:

This research explores a methodology employed for the prediction of potential fire scenarios in a compartment featuring exposed Cross Laminated Timber (CLT) floor slabs. The approach utilizes the principles of iBMB parametric fire curves including the impact of the burning soffit of exposed CLT floor slabs on the fire's growth, intensity, and duration. The foundational principles of the iBMB parametric fire curves, delineating temperature versus time curves, were initially developed by Zehfuss and Hosser (2007) and are incorporated in the German Annex of the Eurocode 1. These parametric fire curves are formulated using simplified empirical equations and have been rigorously validated through comparisons with outcomes from various heat balance models and real-scale fire experiments. To be more specific, the influence of CLT floor slabs burning during a fire is integrated into the calculation of (1) the maximum possible Heat Release Rate and (2) the total available fuel load. The influence of burning CLT floor slabs in fire scenarios is addressed utilizing methodologies and data elucidated by McNamee et al. (2020), Bartlett et al. (2019), and MacLeod et al. (2023). The results of the temperature versus time curves calculation, utilizing iBMB parametric fire curves that include the influence of the burning soffit of exposed CLT floor slabs, were systematically compared against the following real-scale experiments (note that some fire experiments utilized for comparison were conducted without exposed CLT floor slabs): CodeRed, #FRIC-01, Epernon, Edinburgh Tall Building Fire Test (ETBFT), Malveira Fire Experiment, x-One, x-Two, and TIMpuls experiments.

1. Introduction and background

This research article describes a fire engineering method used for predicting the possible fire scenarios in the compartment where a fire may originate. The calculation method uses the iBMB parametric fire curves [1] including the influence that the burning soffit of exposed Cross Laminated Timber (CLT) floor slabs in the growth, intensity, and duration of the fire. The resulting fire scenarios are used as input for the several other calculation methods including influence of CLT slabs; e.g., façade vertical fire spread to neighbouring buildings (influence of CLT slabs).

2. Methodology

The principles of the iBMB parametric fire curves (i.e., temperature vs. time curves) were developed by Zehfuss and Hosser (2007) [1] and are included in the German Annex of the Eurocode 1 [2]. These parametric fire curves were formulated using simplified empirical equations and validated by comparison with results of different heat balance models and with real-scale fire experiments [1].

Is worth highlighting that the fundamental principles, formulations, and assumptions for the iBMB parametric fire curves are well described in Zehfuss and Hosser (2007) [1] and the German Annex of the Eurocode 1 [2]. The iBMB parametric fire curves [1] allows for the prediction (as a function of time) of Heat Release Rate (HRR) and upper layer smoke temperature.

The formulations for deriving an iBMB parametric fire curve [1] are split in three stages of the fire:

- Growing phase – up to the time in which the maximum possible HRR is reached.
- Fully developed phase – up to the time in which 70% of available fuel load is consumed.
- Decay phase – up to the time in which all available fuel load is consumed.

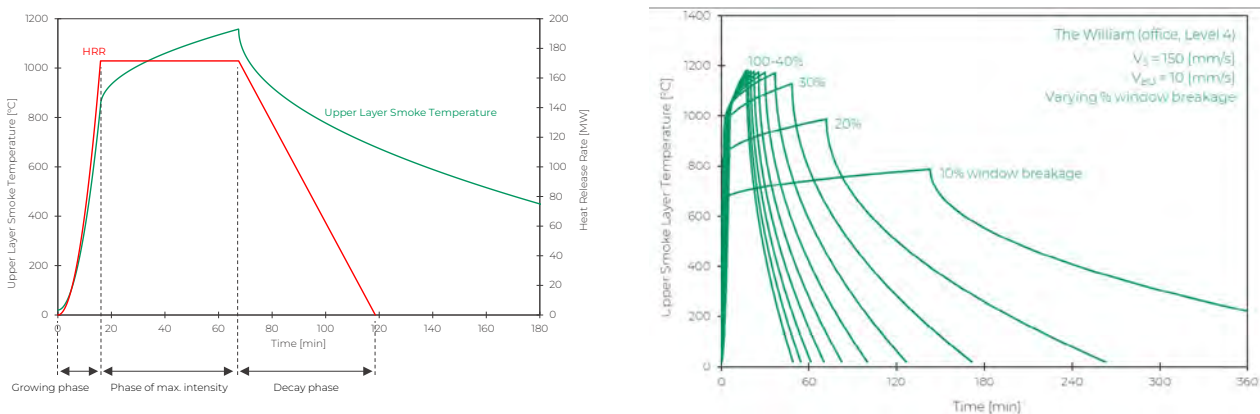


Figure 1. (left) Typical iBMB parametric fire curve showing Heat Release Rate (HRR) and upper layer smoke temperature as a function of time, and (right) iBMB parametric fire curves used to model an exemplar office compartment for fire scenarios modelled with varied ventilation conditions between 10% and 100% window breakage.

The inclusion of an exposed soffit of CLT floor slabs burning during a fire is considered in the calculations for iBMB parametric fire curves using the methods and data described by McNamee et al. (2020) [3], Bartlett et al. (2019) [4], and MacLeod et al. (2023) [5]. More specifically, the influence of CLT floor slabs burning during a fire is included in the calculation of (1) maximum possible HRR ($\dot{Q}_{max}$) and (2) total available fuel load (q_{Total}).

The calculation of maximum possible HRR variates depending on the ventilation conditions of the fire:

Ventilation-controlled fire
$$\dot{Q}_{maxv} = 0.1 \cdot A_w \cdot \sqrt{h_w} \quad (1)$$

(under these conditions, additional fuel due to burning CLT is assumed not to influence the maximum possible HRR)

$$\text{Fuel-controlled fire} \quad \dot{Q}_{\max f} = \dot{Q}_{\text{Fuel Load}}'' \cdot A_{\text{Floor Burning}} + \dot{Q}_{\text{CLT}}'' \cdot A_{\text{CLT Burning}} \quad (2)$$

where:

A_w – total area of vertical openings representing open or broken windows during fire

h_w – weighted average height of vertical openings

$\dot{Q}_{\text{Fuel Load}}''$ – characteristic Heat Release Rate Per Unit of Area (HRRPUA) for fuel load at floor height (i.e., furniture); named elsewhere as movable fuel load [6]

$\dot{Q}_{\text{CLT}}''$ – characteristic HRRPUA for fuel load at ceiling height (i.e., soffit of exposed CLT floor slabs)

$A_{\text{Floor Burning}}$ – floor area with fuel load at floor height burning simultaneously

$A_{\text{CLT Burning}}$ – ceiling area with fuel load at ceiling height burning simultaneously

Considering the influence of CLT floor slabs burning during a fire, the calculation of total available fuel load is done using the following equation:

$$q_{\text{Total}} = q_{\text{Fuel Load}}'' \cdot A_{\text{Floor Burning}} + H_{c,\text{CLT}} \cdot d_{\text{char}} \cdot A_{\text{CLT Burning}} \quad (3)$$

where:

$q_{\text{Fuel Load}}''$ – characteristic fuel load density at floor height

$H_{c,\text{CLT}}$ – volumetric heat of combustion for timber

d_{char} – total depth of charred timber, calculated using a heat conduction model. This process is iterative; i.e., the parametric fire is calculated until convergence of the assumed and calculated total depth of charred timber

3. Assumptions and limitations

Within the calculations of the iBMB parametric fire curves, the following assumptions are made:

- gas temperature is uniform at the upper layer of the fire compartment;
- all fuel load available at floor height will be consumed by the end of the fire;
- the compartment linings can be approximated as semi-infinite solids with constant thermal properties; and
- the linings surface temperature equals the compartment gas temperature.

The assumed characteristic fuel load density at floor height is assumed to be the 80% fractile for the relevant occupation type as shown in Annex E of Eurocode 1 [7]. The assumed heat of combustion (by mass) and density for timber is 18.79 [MJ/kg] and 450 [kg/m³], respectively (Bartlett et al., 2019) [4]. The assumed heat of combustion for char oxidation of timber is 30.34 [MJ/kg] (MacLeod et al., 2023) [5]. The assumed stoichiometric ratio and combustion efficiency for burning fuel at floor height is 5.20 [kg of air/kg of fuel] and 80%, respectively. The assumed burning rate per unit of floor area is 0.02 [kg/m²sec] (Zehfuss and Hosser, 2007) [1].

4. Empirical validation

The outcome of temperature vs. time curves calculation using the iBMB parametric fire curves including the influence for the burning soffit of exposed CLT floor slabs has been compared against the following real-scale experiments – see Figure 2.

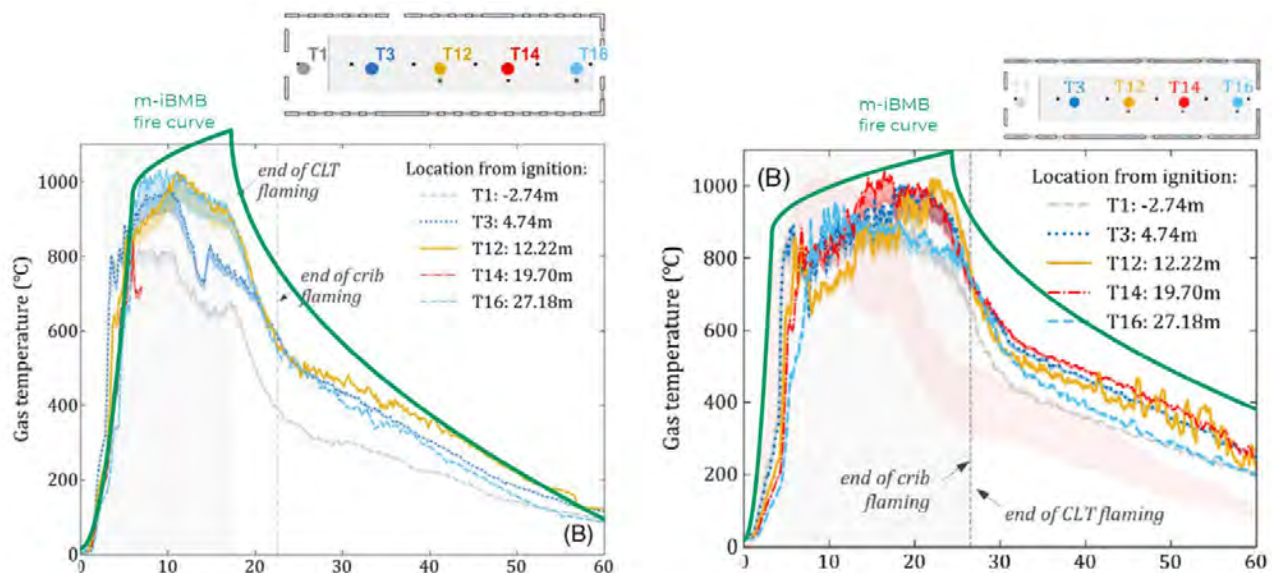


Figure 2. Comparison of CodeRed #1 [8] and #2 [9] fire experiments vs. iBMB parametric fire curve.

5. Conclusions

The influence of burning CLT floor slabs in fire scenarios is addressed utilizing methodologies and data elucidated by McNamee et al. (2020), Bartlett et al. (2019), and MacLeod et al. (2023). The results of the temperature versus time curves calculation, utilizing iBMB parametric fire curves that include the influence of the burning soffit of exposed CLT floor slabs, were systematically compared against the following real-scale experiments (note that some fire experiments utilized for comparison were conducted without exposed CLT floor slabs); e.g., CodeRed #1 and #2 [8,9].

References

- [1] Zehfuss J and Hosser D. (2007). A parametric natural fire model for the structural fire design of multi-storey buildings. *Fire Safety Journal*, Vol. 42, Issue 2, 115-126. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2006.08.004>
- [2] Eurocodes. (2015). *DIN EN 1991-1-2/NA:2015-09 – German National Annex for Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire*, 50pp.
- [1] McNamee R, Zehfuss J, Bartlett AI, Heidari M, Robert F, and Bisby LA. (2020). Enclosure fire dynamics with a cross-laminated timber ceiling. *Fire and Materials*, 45:847-857. <https://doi.org/10.1002/fam.2904>
- [1] Bartlett AI, Hadden RM., and Bisby LA. (2019). A Review of Factors Affecting the Burning Behaviour of Wood for Application to Tall Timber Construction. *Fire Technology*, 55:1-49. <https://doi.org/10.1007/s10694-018-0787-y>
- [1] MacLeod CE, Law A, and Hadden RM. (2023). Quantifying the heat release from char oxidation in timber. *Fire Safety Journal*, 138: 103793. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.103793>
- [2] Structural Timber Association. (2020). *Structural timber buildings fire safety in use guidance: Volume 6 – Mass timber structures; Building Regulation compliance B3(1)*. Version 1.1 October 2020. 37pp.
- [3] Eurocodes. (2002). *EN 1991-1-2:2002 – Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire*, 62pp.
- [1] Kotosovinos P, Rackauskaite E, Christensen E, Glew A, O'Loughlin E, Mitchell H, Amin R, Robert F, Heidiri M, Barber D, Rein G, and Schulz J. (2022). Fire dynamics inside a large and open-plan compartment with exposed timber ceiling and columns: CodeRed#01. *Fire and Materials*, 2022:1-27. <https://doi.org/10.1002/fam.3049>
- [1] Kotosovinos P, Christensen EG, Rackauskaite E, Glew A, O'Loughlin E, Mitchell H, Amin R, Robert F, Heidiri M, Barber D, Rein G, and Schulz J. (2022). Impact of ventilation on the fire dynamics of an open-plan compartment with exposed timber ceiling and columns: CodeRed#02. *Fire and Materials*, 2022:1-28. <https://doi.org/10.1002/fam.3082>

1138

PROPOSTA DE PRODUTO CONSTRUTIVO FABRICADO COM RESÍDUOS DE MADEIRA

Bruna Bessa Rocha¹; Jorge Daniel De Melo Moura¹

¹ Universidade Estadual de Londrina, Departamento de Arquitetura e Urbanismo

Palabras clave / Palavras-chave:

Aproveitamento de resíduos, Desenvolvimento sustentável, Materiais alternativos, Produção de componentes

Resumen / Resumo:

Esse trabalho foca na análise do resíduo gerado pelo processo industrial madeireiro em serrarias de pequeno porte, desde a entrada da madeira até a saída dos componentes para uso, acompanhando o descarte ao longo do processo. Explora a produção de materiais derivados da madeira, como o OSB, destacando suas características e diferenças em relação a outros painéis. Aborda a falta de aproveitamento dos resíduos nas serrarias brasileiras, ressaltando a importância da gestão sustentável desses materiais. Destaca estudos que mostram os efeitos negativos do armazenamento prolongado dos resíduos de madeira na qualidade dos produtos finais. Além disso, discute a importância da biomassa na economia sustentável e nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU para 2030. Enfatiza a biomassa lignocelulósica, ressaltando suas propriedades e potenciais na indústria. Explora o processo de fabricação de painéis aglomerados utilizando resíduos de madeira e casca de cana-de-açúcar, onde a escolha de adesivos à base de óleo de mamona visa mitigar preocupações com emissões tóxicas. Apresenta análises das amostras de resíduos coletados, mostrando a rejeição de certos materiais devido a propriedades como alta matéria orgânica e higroscopicidade. Destaca a importância da classificação das partículas para a fabricação dos painéis, descrevendo o processo de seleção e avaliação granulométrica para garantir a uniformidade e precisão no produto final.

1. Introdução

Neste trabalho o resíduo proveniente do processo industrial madeireiro é acompanhado dentro das serrarias de pequeno porte, desde a chegada das toras de madeira até a saída do componente para o usuário, observando a dinâmica do resíduo que vai sendo lançado durante esse processo. A produção de materiais provenientes da madeira requer um sistema completo de informações em todos os níveis da cadeia de produção e consumo, a saber: técnicas de extração e beneficiamento, processos de transformação para a produção de materiais, fabricação de peças e componentes, montagem de produtos, reciclagem ou descarte final, incluindo em todas as fases o consumo de energia e de materiais, os custos de transporte e armazenamento [1].

Para exemplificar, o painel de madeira industrializado utilizado no mercado para fins construtivos, citamos o OSB (Oriented Strand Board), painel de partículas de madeira orientadas e coladas com resina à prova d'água sob prensagem a quente. Foi desenvolvido para aplicações estruturais, sendo considerado uma segunda geração dos painéis waferboard (painéis de partículas denominadas wafer) e produzido a partir de partículas (strands) de madeira. As partículas da camada interna podem estar dispostas aleatória ou perpendicularmente em relação às camadas externas. As principais diferenças entre o waferboard e o OSB consistem, primeiramente, na dimensão das partículas wafer e strands, que são mais curtas nos wafers, em torno de 40 mm x 40 mm, e mais alongadas no OSB, 25 mm de largura por 80-150 mm de comprimento. Em segundo lugar, diferenciam-se, entre si, na maneira como o colchão é formado. Os resíduos podem ser aproveitados no próprio setor madeireiro na produção de produtos reconstituídos e na geração de energia.

2. Fundamentação teórica

A maioria das serrarias no Brasil não tem um programa de aproveitamento dos seus resíduos, que ficam acumulados em pilhas volumosas e acabam sendo dispostos incorretamente [2]. No trabalho de [3], os resultados apresentados concluíram que os cavacos de madeira não devem ser empilhados por mais de um mês para minimizar o efeito negativo das condições de armazenamento ao ar livre na qualidade da placa de fibra. A degradação biológica e térmica das aparas de madeira danificou a parede celular das fibras de madeira.

A exploração dos recursos renováveis está no centro das grandes transformações econômicas que desafiam a sociedade do século XXI na busca por seus objetivos de desenvolvimento sustentável e por processos e produtos limpos e amigáveis ao meio ambiente no aproveitamento de recursos naturais renováveis e com baixo impacto no processo de obtenção de matéria-prima [4]. Nesse contexto, está se desenvolvendo uma nova economia baseada em biomassa que se alinha com os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Organização das Nações Unidas (ONU) para o horizonte 2030 [5]. Segundo [6], dentre as classes de biomassa vegetal que possuem potencial econômico para a exploração industrial, destaca-se a biomassa lignocelulósica, formada por celulose e hemicelulose, que são polímeros polissacarídeos, e por lignina.

Os três componentes são constituintes importantes da parede celular das plantas e suas quantidades variam de acordo com a espécie vegetal, a idade das plantas, a região de cultivo e o período de coleta. Para a produção de componentes na construção civil, os resíduos devem apresentar características que os qualifiquem para determinadas aplicações; portanto, as vantagens e os inconvenientes devem ser balanceados antes de se propor a utilização dos materiais definidos como “alternativos”, como o caso da biomassa, e dependem do processo produtivo e dos equipamentos disponíveis [7].

O processo de manufatura de painéis aglomerados é uma operação intrincada, envolvendo a união de partículas de madeira através da incorporação de adesivos sintéticos. Em sequência, essas partículas são submetidas a altas temperaturas e pressão por meio de prensagem. A literatura enfatiza que duas fases cruciais se destacam no processo de fabricação de painéis aglomerados: a formação do colchão e a subsequente prensagem em alta temperatura.

Porém no processo de produção dos painéis de partículas, foram empregados resíduos provenientes da madeira em forma de cavacos, maravalha e pó de serra somente da espécie *Eucalyptus grandis*, e de casca de cana-de-açúcar *Saccharum officinarum*. A madeira de *Eucalyptus grandis* exibiu uma densidade aparente de 0,52 g/cm³. Quanto ao material da casca de cana, sua densidade aparente foi registrada como 0,092 g/cm³, conforme os dados fornecidos pela entidade responsável pelo material nesta pesquisa.

Os resíduos de madeira foram obtidos na serraria situada na cidade de Álvares Machado, no estado de São Paulo. Importa ressaltar que a madeira *Eucalyptus grandis* foi originada de diferentes estados. A obtenção da casca de cana ocorreu através de uma indústria do setor localizada em Narandiba, no estado de São Paulo. A resina Poliuretana derivada do óleo de mamona (PU) foi escolhida como adesivo devido à sua origem vegetal, eliminando preocupações relacionadas à emissão de gases tóxicos. As amostras foram analisadas de forma in natura, ou seja, sem nenhum pré-tratamento, a fim de identificar as propriedades da matéria-prima e sua composição com o objetivo de direcionar a composição que mais se adequa aos resíduos coletados.

Os materiais foram analisados pelo MEV, o equipamento produz imagens das amostras com alta resolução da superfície, com aparência tridimensional e ampliação de até 300 mil vezes, sendo útil para avaliar a estrutura superficial, a morfologia e o tamanho de partículas.

3. Conclusões

A partir das análises realizadas, concluiu-se que o material coletado cavacos e pó de serra proveniente da espécie de eucalipto foram descartados para a produção dos painéis. Os cavacos apresentaram muita matéria orgânica devido à sua disposição no pátio da serraria. O pó de serra foi descartado devido sua propriedade higroscópica, como analisado e concluído na etapa de investigação. A fração de adesivo calculada para ser incorporada na produção dos painéis pode aumentar devido ao fato do pó de serra ter superfícies abertas em sua forma.

O volume de maravalha coletado na serraria destacou-se por apresentar a morfologia mais homogênea em comparação aos outros materiais, porém com gramaturas de partículas distintas. Considerando que os demais materiais foram descartados, a demanda por reutilização desse resíduo tornou-se ainda mais significativa. Por essa razão, faz-se necessário classificar a maravalha, a fim de obter o melhor aproveitamento possível. Para a fabricação dos painéis, as partículas passaram por um agitador de peneiras com aberturas de malha de tamanhos 9,52 mm, 6,3 mm, 4,76 mm, 2,38 mm e 850 μ m. Esse processo visou classificar as partículas adequadamente, buscando obter dimensões entre 2 mm e 6 mm.

O módulo de finura foi utilizado como um parâmetro para avaliar se as partículas se enquadram dentro desse intervalo desejado. Dessa forma, foi possível garantir a uniformidade e a precisão na seleção das partículas para a composição do painel P1. O cálculo do módulo de finura é realizado a partir da análise granulométrica, que consiste em passar o material por uma série de peneiras com diferentes aberturas de malha, coletando o material retido em cada uma delas. Em seguida, são feitas as porcentagens acumuladas retidas em cada peneira.

O módulo de finura é obtido somando as porcentagens acumuladas retidas em algumas peneiras específicas e dividindo o resultado por 100. O valor resultante do cálculo do módulo de finura é um número que ajuda a entender o tamanho médio das partículas do material. Quanto maior o valor, mais fino é o material, e quanto menor, mais grosso. Três classificações de amostras de maravalhas foram realizadas para determinar o módulo de finura. As curvas resultantes estão bastante próximas, indicando que as dimensões das partículas são semelhantes e estão dentro do intervalo de 2 mm a 6 mm, que é o requisito estabelecido para a produção de painéis de partículas.

Consequentemente, os resultados demonstraram que as partículas possuem tamanhos compreendidos entre 3 mm e 5 mm, o que atende aos padrões desejados para a fabricação dos painéis.

Referências

- [1] Medina, Heloísa Vasconcellos de. A análise de ciclo de vida aplicada à pesquisa e desenvolvimento de ecomateriais no Brasil. Rio de Janeiro, 2005.
- [2] Moraes, Sandra Lúcia de et al. Cenário brasileiro da geração e uso de biomassa adensada. Revista IPT: Tecnologia e Inovação, v. 1, n. 4, 2017.
- [3] Ergül, Emrah; AYRILMIS, Nadir. Effect of outdoor storage conditions of wood chip pile on the technological properties of wood-based panel. Biomass and Bioenergy, [S. l.]: Elsevier BV, v. 61, p. 66-72, Feb. 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.11.025>.
- [4] Gutiérrez, Evelin Tamayo; MIRANDA, Oscar Sarasty; QUELAL, Elizabeth Mosquera. Aprovechamiento de residuos ligno-celulósicos en la elaboración de empaques secundarios ecológicos. Industrial Data, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, v. 20, n. 2, p. 37, 21 dic. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.15381/idata.v20i2.13959>.
- [5] Bomtempo, José Vitor. A nova economia baseada em biomassa. 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/>. Acesso em: 8 maio 2021.
- [6] Marafon, Anderson Carlos. Análise quantitativa de crescimento em cana-de-açúcar: uma introdução ao procedimento prático. Aracaju, SE: Embrapa, 2012. 31 p. Disponível em: http://www.cpatc.embrapa.br/publicacoes_2012. Acesso em: 20 jul. 2021.
- [7] Beraldo, Antonio Ludovico. Utilização de resíduos agroindustriais na construção. Campinas, SP: UNICAMP, 2020. 404 p.

1139

MÉTODO DE INSPEÇÃO DE MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM ELEMENTOS ESTRUTURAIS DE MADEIRA

Leandro Dussarrat Brito¹; Carlito Calil Júnior¹

¹ LaMEM/SET/EESC/USP

Palabras clave / Palavras-chave:

Conservação de estruturas, Engenharia civil, Manutenções periódicas e preventivas

Resumen / Resumo:

O objetivo deste trabalho foi elaborar um método de inspeção fundamentado em técnicas não destrutivas, pouco intrusivas e/ou minimamente intrusivas para avaliações de manifestações patológicas em elementos estruturais de madeira. Para isto foram realizadas pesquisas de maneira sistêmica sobre as características dos agentes deterioradores da madeira e as suas principais manifestações patológicas. Com base no “Sistema de categorias de uso” proposto no projeto de revisão da norma de “Projeto de Estruturas de Madeira” ABNT NBR 7190: 2011, atual norma ABNT NBR 7190: 2022 – Parte 1, de acordo com a região em que os elementos estruturais de madeira ficam expostos na edificação, avalia-se o potencial risco de biodeterioração. O método consiste basicamente em dois níveis de inspeção a serem realizados em trabalhos “in loco”, sendo que, diante do enquadramento na “Categoria de uso”, avalia-se de maneira geral as características visuais de biodeterioração de cada elemento estrutural de madeira inspecionado em uma inspeção preliminar de “Nível 1”, em função da eminência do risco detectado, avalia-se a “Classe de prioridade de intervenção” e recorre-se ao método de inspeção mais detalhado de “Nível 2”. Como resultado das pesquisas realizadas, o método de inspeção apresentado pode ser aplicado adequadamente para avaliações de manifestações patológicas em trabalhos de inspeções periódicas preventivas, assim como, em manutenções preventivas e/ou corretivas, seja na conservação e/ou na reabilitação de elementos estruturais de madeira.

1. Introdução

No Brasil, num período compreendido entre 1925 e 1960, a empresa Hauff predominou em produções expressivas de estruturas de madeira. A fase de maior produção em estruturas de madeira correspondeu, coincidentemente com a implantação da empresa do Engenheiro Erwin Hauff, que defendeu o emprego da madeira, por enxergar a grande potencialidade tecnológica desse material, como também por ver no Brasil uma fonte de recursos naturais de madeira, percebendo, não só a grande variedade e quantidade de espécies exploráveis, como a ótima qualidade das madeiras de florestas nativas tropicais do país (CESAR, 1991)[1]. Assim, as grandes e emblemáticas

estruturas de madeira originaram com a empresa Hauff, e com as empresas sucessoras a ela, cuja produção destas estruturas contribuiu em grande medida para o avanço tecnológico da indústria de engenharia de construção com madeira no Brasil. Os sistemas estruturais de madeira do tipo Hauff foram utilizados em várias regiões do Brasil. Diversas destas estruturas construídas naquela época permanecem existentes, sendo que algumas delas requerem passar por manutenções preventivas e/ou ainda por reabilitações corretivas (CALIL JR., 2011)[2]; (BRITO, 2014)[3]. Contudo, a utilização da madeira e de produtos engenheirados de madeira na construção de estruturas vem crescendo no Brasil na medida em que as pesquisas científicas e as novas tecnologias avançam. Além disto, sabe-se que a madeira é uma combinação de polímeros naturais que apresenta resistência mecânica adequada como material estrutural e boa durabilidade quando utilizada e tratada corretamente. A partir do instante em que a madeira é usinada, se não tratada adequadamente na indústria, elas podem ficar susceptíveis a biodeterioração por agentes bióticos e/ou sofrer deterioração por agentes abióticos. Uma vez em que a madeira fica exposta ao ambiente externo, o dano na madeira pode variar desde pequenas descolorações ou manchas escuras causadas por fungos manchadores, substâncias químicas, ou intemperismo, até deteriorações mais severas, oriundas por ataques de insetos xilófagos e/ou fungos apodrecedores. Diante deste contexto é fundamental elaborar um método de inspeção para avaliações de manifestações patológicas em elementos estruturais de madeira.

2. Manifestações patológicas

A familiaridade do inspetor em conhecer os agentes de biodeterioração e/ou deterioração é um dos aspectos mais importantes na eficiência de inspeções em elementos estruturais de madeira. Com esse conhecimento, a inspeção pode ser abordada com uma profunda compreensão dos processos envolvidos principalmente na biodeterioração e nos fatores que favorecem ou inibem o seu desenvolvimento.

Highley e Scheffer (1989)[4] descrevem que a deterioração da madeira geralmente é originária por três categorias principais: biológicas, físicas, e químicas. Ritter e Morrell (1990)[5] e Calil Junior et al (2006)[6] simplificadamente atribuem a origem da deterioração por duas causas principais: agentes bióticos (vivos); e agentes abióticos (não vivos).

Dentre os agentes bióticos as manifestações patológicas podem ser identificadas através da presença de: orifícios e de pequenos granulos ovalados de cupins-de-madeira-seca; orifícios e dejetos em pó de brocas-de-madeira; superfícies com túneis de terra de cupins-subterrâneos; túneis de terra de cupins-arborícolas; manchas de fungos emboloradores; manchas de fungos manchadores; biodeterioração por fungos apodrecedores; e orifícios de perfuradores marinhos.

Enquanto que as manifestações patológicas por agentes abióticos (condicionantes físicos, químicos, climáticos e danos devido ao fogo) destacam-se: características visuais de abrasão mecânica em tabuleiros de pontes; manchas pela ação da luz ultravioleta do sol; aspecto de corrosão metálica em elementos de ligações; efeito de corrosão na madeira; manchas por degradação química; peças de madeira removidas da estrutura; movimento de nós de ligações, parafusos soltos e/ou ausência de parafusos; instabilidade da estrutura por ausência de sistemas de contraventamento; deslocamentos e flechas por efeito da fluência; defeitos e/ou fissuras por secagem da madeira verde “in loco”; fraturas incipientes; dano devido ao fogo, entre outras.

3. Método de inspeção

A técnica não destrutiva [ingl.: Non Destructive Technique (NDT)] trata-se da ciência aplicada para identificar as propriedades físicas e mecânicas dos materiais sem alterar sua capacidade de uso final e então usar essas informações para tomada de decisões sobre aplicações apropriadas (PELLERIN; ROSS, 2002)[7]; (CALIL JR., 2011)[2]; (BRITO; CALIL JR., 2013)[8]; (BRITO, 2014)[3]. A aplicação de determinadas técnicas não destrutivas têm contribuído significativamente para detectar manifestações patológicas em elementos estruturais de madeira (BRASHAW et al, 2005)[9]; (BRASHAW et al, 2005) [10]; (BRITO e CALIL JR., 2013)[8]; (BRITO, 2014)[3].

O método consiste basicamente em dois níveis de inspeção a serem realizados em trabalhos “in loco”: o “Nível 1”, que trata-se de uma “Inspeção Preliminar”; e o “Nível 2”, que trata-se de uma “Inspeção Detalhada”.

Na “Inspeção Preliminar de Nível 1” devem ser identificados todos os elementos estruturais de madeira da estrutura a serem inspecionados e realizar uma avaliação geral (global), pela “Técnica de Inspeção Visual Geral”.

Fundamentado no “Sistema de categorias de uso” proposto no projeto de revisão da norma NBR7190:2011[11]; atual NBR7190:2022-1[12], descrito em Calil Jr. e Brito (2010)[13], de acordo com a região em que os elementos estruturais de madeira ficam expostos na edificação, pode-se avaliar o potencial risco de biodeterioração (BRITO, 2014)[3]. Assim, diante do enquadramento na “Categoria de uso”, avalia-se de maneira geral as características visuais de biodeterioração de cada elemento estrutural de madeira inspecionado na inspeção preliminar de “Nível 1”, em função da eminência do risco detectado, avalia-se a “Classe de Prioridade de Intervenção (CPI)”, baseado no conceito apresentado por Bonamini (1995)[14] e recorre-se ao método de inspeção mais detalhado de “Nível 2”. Na Tabela 1 apresenta-se o método de inspeção, indicando-se os níveis de inspeções para avaliações de elementos estruturais de madeira.

Tabela 1. Método de inspeção: Níveis de inspeções a realizar “in loco” para avaliações de elementos estruturais de madeira.

Nível de inspeção	Método de inspeção
Nível 1 (Inspeção preliminar)	Condições mínimas de viabilidade para inspeções de Nível 1
	Técnica de Inspeção Visual Geral (avaliação global)
	Avaliação de risco de biodeterioração (Categorias de uso/risco de biodeterioração)
	Avaliação de danos e de deteriorações aparentes
	Classificação dos elementos estruturais de madeira de acordo com a Classe de Prioridade de Intervenção (CPI), avaliando-se cada peça individualmente:
	● Classe Verde → Baixa prioridade de intervenção ● Classe Amarela → Média prioridade de intervenção ● Classe Vermelha → Alta prioridade de intervenção ● Classe Cinza → Regiões não acessíveis para inspecionar
	Documentações Técnicas do Projeto de Nível 1
Nível 2 (Inspeção detalhada)	Condições mínimas de viabilidade para inspeções de Nível 2
	Técnica de Inspeção Visual Detalhada (avaliação individualizada de cada elemento estrutural de madeira)
	Avaliações do teor de umidade da madeira
	Avaliações com uso do Resistograph® (microperfuração controlada pontual)
	Avaliações de seção transversal residual
	Avaliações das ligações e/ou de conectores
	Avaliações de intervenções anteriores (históricas e/ou recentes)
	Documentações Técnicas do Projeto de Nível 2

Fonte: Tabela adaptada de BRITO (2014)[3].

Vale destacar que o sistema de classificação adotado na “Inspeção Preliminar de Nível 1” para avaliação da “Classe de Prioridade de Intervenção (CPI)” pode auxiliar na elaboração de um mapeamento esquemático dos elementos estruturais de madeira, indicando-se em desenhos de detalhamento em projeto/relatório de inspeção, as respectivas regiões que requerem maior prioridade de intervenção em função do potencial de risco de biodeterioração identificados, diante do enquadramento na “Categoria de uso”. Recomenda-se também, apresentar junto as documentações técnicas, as indicações das manifestações patológicas identificadas, através do registro de fotos digitais obtidos tanto na inspeção visual geral de “Nível 1”, quanto na inspeção visual detalhada de “Nível 2”.

4. Conclusões

O estudo sistematizado realizado nas pesquisas sobre as características dos agentes deterioradores da madeira, as manifestações patológicas em elementos estruturais de madeira e as principais técnicas de inspeção com ênfase nas Técnicas Não Destrutivas (NDT), técnicas pouco intrusivas e/ou minimamente intrusivas foram fundamentais na contribuição para a elaboração deste método de inspeção. Conforme apresentado, o método consiste em dois níveis de inspeção a serem realizados em trabalhos “in loco”. Na inspeção preliminar de “Nível 1” identifica-se todos os elementos estruturais de madeira da estrutura a serem inspecionados e realiza-se uma avaliação geral (global), pela técnica de inspeção visual geral, com registro de fotos digitais, identificando-se quais são as peças de madeira que necessitam ser inspecionadas com técnicas de avaliações mais detalhadas de “Nível 2”. Por conseguinte, na etapa de “Nível 2” avalia-se detalhadamente cada elemento estrutural em que foi identificado pontualmente a presença de agentes bióticos (cupins, brocas, fungos...) e/ou abióticos (fendas, rachas...). O Resistograph® IML-RESI-F500-S (Tabela 1) tem demonstrado ser um bom equipamento para a avaliação pontual, interna na peça de madeira (BRITO & CALIL JUNIOR, 2013)[8]. Diante do resultado das pesquisas realizadas neste trabalho, o método de inspeção indicado para avaliações de manifestações patológicas de elementos estruturais de madeira pode ser aplicado adequadamente na elaboração de trabalhos de inspeções periódicas preventivas, assim como, em manutenções preventivas e/ou corretivas, seja na conservação e/ou na reabilitação de estruturas de madeira.

Agradecimentos

Os autores agradecem pelo apoio o Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira, o Departamento de Engenharia de Estruturas, à Escola de Engenharia de São Carlos e a Universidade de São Paulo.

References

- [1] CESAR, S. F. (1991). As estruturas Hauff de madeira no Brasil. Dissertação de Mestrado. Arquitetura e Planejamento. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil. 213 p.
- [2] CALIL JUNIOR, C. (2011). Assessment of historic timber structures in Brazil. Anais SHATIS'11: International Conference on Structural Health Assessment of Timber Structures. June 16-17. Lisbon, Portugal. Pg. 1-9.

- [3] BRITO, L. D. (2014). Patologia em estruturas de madeira: metodologia de inspeção e técnicas de reabilitação. Tese de Doutorado. Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira. Departamento de Engenharia de Estruturas. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil. 502 p.
- [4] Highley, T. L.; Scheffer, T. (1989). Controlling decay in waterfront structures. Evaluation, Prevention, and Remedial Treatments. United States Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. FPL-RP-494. Madison, WI, United States.
- [5] Ritter, M. A.; MORRELL, J. J. (1990). Timber Bridges: Design, Construction, Inspection, and Maintenance. Chapter 13: Bridge Inspection for Decay and Other Deterioration. United States Department of Agriculture, USDA. Forest Service. United States.
- [6] CALIL JUNIOR., C. et al. (2006). Manual de projeto e construção de pontes de madeira. ISBN: 85-98156-19-1. *Suprema*, São Carlos, 2006. 252p. E-book disponível em: <<https://set.eesc.usp.br/wp-content/uploads/2023/08/manual-de-projeto-e-construcao-de-pontes-de-madeira.pdf>> Acesso em: 17 out. 2023.
- [7] PELLERIN, R. F.; ROSS, J. (2002). Nondestructive Evaluation of Wood. Forest Products Society. Madison, WI, USA.
- [8] BRITO, L. D.; CALIL JR., C. (2013). Uso do Resistograph IML-RESI-F500-S em inspeções NDT para avaliações internas de elementos estruturais de madeira. In: IX International Congress on Pathology and Recovery Structures. João Pessoa, Brasil.
- [9] BRASHAW, B. K.; VATALARO, R. J.; WACKER, J. P.; ROSS, R. J. (2005)a. Condition assessment of timber bridges, 1. Evaluation a Micro-Drilling Resistence Tool. USDA. Forest Service. General Technical Report. FPL-GTR-160. FPL. April 2005.
- [10] BRASHAW, B. K.; VATALARO, R. J.; WACKER, J. P.; ROSS, R. J. (2005)b. Condition assessment of timber bridges, 1. Evaluation of Several Stress-Wave Tools. USDA. Forest Service. General Technical Report. FPL-GTR-160. FPL. July, 2005.
- [11] Brazilian standard (2011) ABNT CB-02 Revisão da NBR 7190:2011. Projeto de estruturas de madeira. Novembro de 2011. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro, Brasil.
- [12] Brazilian standard (2022) NBR 7190: 2022 - Parte 1. Projeto de estruturas de madeira, Critérios de dimensionamento. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro, Brasil.
- [13] CALIL JUNIOR., C.; BRITO, L. D. (2010). Manual de Projeto e Construção de Estruturas com Peças Rolças de Madeira de Reflorestamento. Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. ISBN: 978-85-8023-000-0. São Carlos, 2010. 312 pg. E-book disponível em: <<https://set.eesc.usp.br/wp-content/uploads/2023/08/manual-de-projeto-e-construcao-de-estruturas-com-pecas-rolcas-de-madeira-de-reflorestamento.pdf>> Acesso em: 17 out. 2023.
- [14] BONAMINI, G. (1995). Restoring timber structures - Inspection and evaluation. Università degli Studi di Firenze. In: Timber Engineering STEP 2 lecture D3, Design – Details and structural systems, Eurofortech. ISBN 90-5645-002-6. The Netherlands.

1140

PROPOSTAS DE LIGAÇÕES RESISTENTES A MOMENTOS PARA PÓRTICOS DE MADEIRA

Aléxia Ribeiro¹; João Negrão²; Alfredo Dias¹

¹ ISISE, Universidade de Coimbra

² Universidade de Coimbra;

Palabras clave / Palavras-chave:

Ligações resistentes a momentos, Madeira, Sistemas, Resistência, Rigidez

Resumen / Resumo:

A descontinuidade do fio da madeira, nos nós de interseção viga-pilar, dificulta a transmissão de momentos entre estes elementos. Na literatura, encontram-se propostas de solução para o problema que podem, de maneira simplificada, ser classificadas em três grupos, segundo o mecanismo de transmissão do momento fletor: poligonal, alavanca e pré-esforço. Uma solução teoricamente fundamentada e muito disseminada na prática é a da disposição poligonal de ligadores ao corte, inseridos normalmente ao plano de flexão. Nos sistemas de alavanca, as forças atuam no mesmo plano do momento, que é equilibrado por um binário, realizado com tração de um ligador metálico e compressão direta contra a madeira. Este sistema apresenta diferentes variantes, como alavanca com o pilar estendido vs. alavanca com a viga estendida e com diversos materiais e dispositivos de ligação, como varões colados de aço ou de polímeros reforçados por fibras, parafusos de porca ou peças especificamente produzidas para cada sistema. Uma nova proposta consiste na realização de nós de betão armado, solução na qual a continuidade do momento fletor entre a viga e o pilar é assegurada por armaduras de aço de construção corrente, ancoradas nos elementos de madeira por colagem com uma resina epoxy estrutural, com o betão a preencher o volume de interseção dos prismas correspondentes àqueles elementos. Este trabalho propõe-se apresentar e classificar essas soluções e compará-las em termos de comportamento estrutural, nomeadamente em termos de resistência à flexão, rigidez e ductilidade. Para esse fim, consideram-se as conclusões e resultados de estudos experimentais disponíveis na bibliografia.

1. Introdução

Ao contrário do aço e do betão, com os quais é possível a constituição de nós de pórtico rígidos, seja por via da soldadura (no caso do aço) ou do monolitismo do nó (no caso do betão), a descontinuidade do fio da madeira na interseção de vigas e pilares dificulta a realização de ligações de continuidade ao momento fletor.

A solução mais difundida na prática, suportada por um modelo de análise simplificado, mas comprovadamente seguro, é a ligação com parafusos de porca ao corte, dispostos num padrão circunferencial ou poligonal na interseção daqueles elementos. Na sua forma mais simples, trata-se de uma ligação madeiraa-madeira ao corte duplo, constituída por um duplo pilar com uma viga central ou uma dupla viga com um pilar central, sendo a primeira variante a mais comum. Pretendendo-se uma ligação plana, pode recorrer-se a chapas de aço internas ou nas faces dos elementos de madeira. As forças transmitidas pelos conetores contra a madeira circundante realizam o momento de continuidade (Figura 1-a) (Faria & Negrão, 2009). Aqueles são, habitualmente, cavilhas ou parafusos de porca, mas o uso de cavilhas de madeira ou tubos metálicos expandidos também oferece perspectivas de utilização. Esta ligação apresenta baixa rigidez rotacional e é sempre de resistência parcial (i.e., inferior à resistência à flexão das peças ligadas), porque o diâmetro do polígono tem de ser acomodado na limitada área do nó, em respeito pelos espaçamentos regulamentares entre ligadores e destes aos lados e cantos das peças de madeira. Outra limitação é a de não permitir uma ligação plana, exceto recorrendo à interposição de chapas de aço (Figura 1-b) (Leijten & Brandon, 2013; Shu et al., 2019; Solarino et al., 2017) a qual, no entanto, requer a duplicação da ligação e agrava substancialmente o custo de materiais e de mão-de-obra. Apesar de ser já um sistema de ligação relativamente antigo, continuam a publicar-se trabalhos dedicados a estudar e melhorar o seu comportamento estrutural, nomeadamente a respeito do comportamento sísmico e à melhoria das capacidades de resistência e rigidez, veja-se (van Bakel et al., 2017); (Yang et al., 2020); (Johanides et al., 2021); (Johanides et al., 2022).

Outra alternativa também explorada por diversos autores é a do uso do princípio da alavanca para a transmissão de carga. Diferentemente da junta poligonal, o equilíbrio de momentos em ligações deste tipo é alcançado por meio de conectores no plano de flexão, funcionando axialmente, em vez de ao corte (Figura 2-a). Este efeito de alavanca produz um binário equilibrante, com braço de dimensão próxima da altura da secção transversal, cabendo a força de tração a um elemento metálico, colado, enroscado ou chumbado numa peça e ancorado, diretamente ou com chapa de interposição, na face oposta da outra. A força de compressão é suportada diretamente por compressão da madeira, paralela ao fio numa barra e perpendicular ao fio na outra, no caso de nós unindo barras ortogonais. Da literatura constam diversas abordagens que exploram esse mesmo princípio físico de maneiras diferentes (Batchelar, 2006; Fragiacomio et al., 2010; Komatsu et al., 2006; Madhoushi & Ansell, 2008; O'Neill et al., 2017; Scheibmair, 2012; Sirumbal-Zapata et al., 2019; Vašek, 2008). Por exemplo, implementações usando barras coladas (Van Houtte et al., 2004), parafusos (Nakatani et al., 2006) e até mesmo componentes metálicos específicos foram criados (Komatsu et al., 2006). Outras variantes recorrem à extensão do pilar ou da viga, tendo sido propostos procedimentos de cálculo para ambos os casos (Fragiacomio & Batchelar, 2012).

O principal problema das soluções baseadas em alavanca é a introdução de elevadas forças de compressão na direção perpendicular ao fio da madeira da coluna (na variante da coluna estendida, Figura 2-a, esquerda) ou da viga (na variante da viga estendida, Figura 2-a, direita). Alguns autores propõem soluções para contornar ou atenuar este problema, como a divisão da madeira na diagonal proposta por (Walker & Xiao, 2014) ou a utilização de uma peça de aço para o caso do estudo (Navaratnam et al., 2022).

Em (Negrão et al., 2016), foi pela primeira vez proposta a ligação em betão armado, baseada num modelo mecânico essencialmente igual ao que governa o comportamento dos nós, naquele tipo de estruturas (Figura 2-b). Em particular, o papel da aderência aço-betão, que nas estruturas de betão armado assegura a transferência de forças entre os dois materiais colaborantes, é desempenhado, nos

pórticos de madeira, por colagem das armaduras na viga e na coluna, por meio de uma cola estrutural (epoxy). Os bons resultados obtidos e reportados naquele trabalho, a respeito do desempenho deste tipo de ligação, suscitaram o lançamento de um programa de investigação mais ambicioso, agora perto do seu termo. Tomando como base de comparação a mais forte ligação poligonal que pôde ser acomodada nas dimensões das peças de madeira utilizadas nos provetes de ensaio, também aquela produzida e ensaiada, obtiveram-se ganhos de cerca de 300% na resistência à flexão e de uma ordem de magnitude (10×) na rigidez (Ribeiro *et al.*, under review).

Uma última linha de investigação em ligações resistentes a momentos para pórticos de madeira é a das ligações pré-esforçadas (Figura 2-c). Nestas, o momento equilibrante obtém-se pela redução/aumento (consoante o lado considerado) das tensões de compressão introduzidas pelo pré-esforço, inicialmente uniformes. Estas ligações apresentam alta rigidez e resistência e boa resposta a eventos sísmicos, mas tendo o problema da incerteza na quantificação das perdas de tensão dos varões pré-tensionados (Li *et al.*, 2018, 2020; Newcombe *et al.*, 2008; Smith *et al.*, 2014; Wanninger & Frangi, 2014, 2016) e o das elevadas compressões perpendiculares ao fio, sob a peça de ancoragem do cabo de pré-esforço.

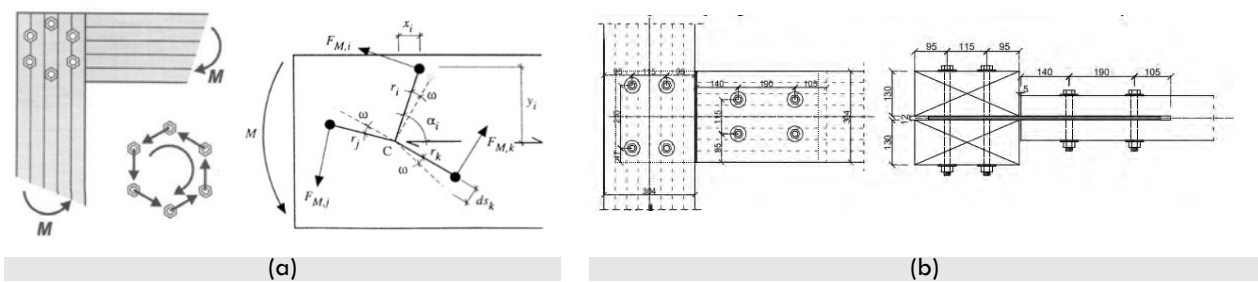


Figura 1. (a) Ligação poligonal (b) Ligação poligonal plana

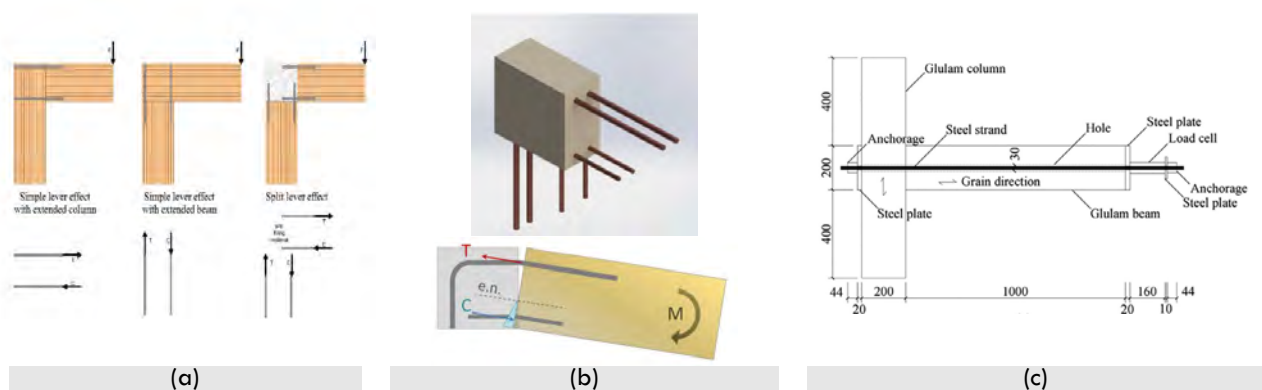


Figura 2. (a) Geometria das ligações baseadas no efeito alavanca (b) Ligação em betão armado (c) Pré-esforçadas

Bibliografía

- [1] Batchelar, M. (2006). Timber Frame Moment Joints with Glued-In Steel Rods-A Designer's Perspective. *9th World Conference on Timber Engineering*.
- [2] Faria, A., & Negrão, J. (2009). *Projecto de Estruturas de Madeira* (Publindústria, Ed.).
- [3] Fragiacom, M., & Batchelar, M. (2012). Timber frame moment joints with glued-in steel rods. I: Design. *Journal of Structural Engineering (United States)*, 138(6), 789–801. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000419](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000419)
- [4] Fragiacom, M., Batchelar, M., Wellington, C., & Buchanan, A. (2010). Moment joints in timber frames using glued-in steel rods: Experimental investigation of long-term performance. *11th World Conference on Timber Engineering 2010, WCTE 2010*, 1, 700–709.
- [5] Johanides, M., Kubíncová, L., Mikolášek, D., Lokaj, A., Sucharda, O., & Mynarčík, P. (2021). Analysis of rotational stiffness of the timber frame connection. *Sustainability (Switzerland)*, 13(1), 1–15. <https://doi.org/10.3390/su13010156>
- [6] Johanides, M., Lokaj, A., Dobes, P., & Mikolasek, D. (2022). Numerical and Experimental Analysis of the Load-Carrying Capacity of a Timber Semi-Rigid Dowel-Type Connection. *Materials*, 15(20). <https://doi.org/10.3390/ma15207222>
- [7] Komatsu, K., Hosokawa, K., Hattori, S., Matsuoka, H., Yanaga, K., & Mori, T. (2006). Development of Ductile and High-Strength Semi-Rigid Portal Frame Composed of Mixed-Species Glulams and H-shaped Steel Gusset Joints. *Proceedings of the World Conference on Timber Engineering 2006*.
- [8] Leijten, A. J. M., & Brandon, D. (2013). Advances in moment transferring dwv reinforced timber connections – Analysis and experimental verification, Part 1. *Construction and Building Materials*, 43, 614–622. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.020>
- [9] Li, Z., He, M., & Wang, K. (2018). Hysteretic Performance of Self-Centering Glulam Beam-to-Column Connections. *Journal of Structural Engineering*, 144(5). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0002012](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0002012)
- [10] Li, Z., Zheng, X., He, M., Sun, Y., & He, G. (2020). Experimental and analytical investigations into the time-dependent performance in post-tensioned timber beam-column joints under sustained loads and varied environment. *Construction and Building Materials*, 251. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118943>
- [11] Madhoushi, M., & Ansell, M. P. (2008). Behaviour of timber connections using glued-in GFRP rods under fatigue loading. Part II: Moment-resisting connections. *Composites Part B: Engineering*, 39(2), 249–257. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2006.11.002>
- [12] Nakatani, M., Mori, T., & Komatsu, K. (2006). Development of moment-resisting joint systems using lagscrewbolts. *9th World Conference on Timber Engineering 2006, WCTE 2006*, 1, 845–851.
- [13] Navaratnam, S., Thamboo, J., Ponnampalam, T., Venkatesan, S., & Chong, K. B. (2022). Mechanical performance of glued-in rod glulam beam to column moment connection: An experimental study. *Journal of Building Engineering*, 50. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104131>
- [14] Newcombe, M. P., Pampanin, S., Buchanan, A., & Palermo, A. (2008). Section analysis and cyclic behavior of post-tensioned jointed ductile connections for multi-story timber buildings. *Journal of Earthquake Engineering*, 12(SUPPL. 1), 83–110. <https://doi.org/10.1080/13632460801925632>

- [15] O'Neill, C., McPolin, D., Taylor, S. E., Harte, A. M., O'Ceallaigh, C., & Sikora, K. S. (2017). Timber moment connections using glued-in basalt FRP rods. *Construction and Building Materials*, 145, 226–235. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.241>
- [16] Scheibmair, F. (2012). *CONNECTIONS FOR TIMBER*.
- [17] Shu, Z., Li, Z., Yu, X., Zhang, J., & He, M. (2019). Rotational performance of glulam bolted joints: Experimental investigation and analytical approach. *Construction and Building Materials*, 213, 675–695. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.002>
- [18] Sirumbal-Zapata, L. F., Málaga-Chuquitaype, C., & Elghazouli, A. Y. (2019). Experimental assessment and damage modelling of hybrid timber beam-to-steel column connections under cyclic loads. *Engineering Structures*, 200. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109682>
- [19] Smith, T., Ponzo, F. C., Di Cesare, A., Pampanin, S., Carradine, D., Buchanan, A. H., & Nigro, D. (2014). Post-tensioned glulam beam-column joints with advanced damping systems: Testing and numerical analysis. *Journal of Earthquake Engineering*, 18(1), 147–167. <https://doi.org/10.1080/13632469.2013.835291>
- [20] Solarino, F., Giresini, L., Chang, W. S., & Huang, H. (2017). Experimental tests on a dowel-type timber connection and validation of numerical models. *Buildings*, 7(4). <https://doi.org/10.3390/buildings7040116>
- [21] van Bakel, R., Rinaldin, G., Leijten, A. J. M., & Fragiaco, M. (2017). Experimental–numerical investigation on the seismic behaviour of moment-resisting timber frames with densified veneer wood-reinforced timber joints and expanded tube fasteners. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 46(8), 1307–1324. <https://doi.org/10.1002/eqe.2857>
- [22] Van Houtte, A., Buchanan, A., & Moss, P. (2004). Moment-Resisting Connections In Laminated Veneer Lumber (LVL) Frames. *8th World Conference on Timber Engineering*, 247–252.
- [23] Vašek, M. (2008). Semi rigid Timber Frame and Space Structure Connections by Glued-in Rods Experimental program. *Proceedings of the 10th World Conference on Timber Engineering*.
- [24] Walker, J., & Xiao, R. (2014). *Experimental Testing of a Portal Frame Connection Using Glued-In Steel Rods* (pp. 555–566). https://doi.org/10.1007/978-94-007-7811-5_51
- [25] Wanninger, F., & Frangi, A. (2014). Experimental and analytical analysis of a post-tensioned timber connection under gravity loads. *Engineering Structures*, 70, 117–129. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.03.042>
- [26] Wanninger, F., & Frangi, A. (2016). Experimental and analytical analysis of a post-tensioned timber frame under horizontal loads. *Engineering Structures*, 113, 16–25. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.01.029>
- [27] Yang, J. Q., Smith, S. T., Wang, Z., Feng, P., & Sirach, N. (2020). Modelling of hysteresis behaviour of moment-resisting timber joints strengthened with FRP composites. *International Journal of Mechanical Sciences*, 179. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.10559>

1141

PROPUESTA DE DIVULGACIÓN DE CUMPLIMIENTO TÉCNICO EN OBRAS ARQUITECTÓNICAS EN MADERA PARA VALIDACIÓN EN EL MERCADO CHILENO

Rose Marie Garay Moena¹; Micaela Ruiz¹

¹ Universidad de Chile

Palabras clave / Palavras-chave:

Protección de la madera, Desempeño de edificios, Sustentabilidad, Construcción en madera

Resumen / Resumo:

El estudio selecciona y analiza connotadas obras arquitectónicas en Chile, las que fueron desarrolladas por profesionales expertos que estudian y resuelven los criterios técnicos fundamentales de resistencia estructural, al fuego, aislación térmica y acústica, además de atributos de desempeño ambiental, sustentabilidad, entre otras. Parte de los profesionales fueron entrevistados para conocer las soluciones respecto a seguridad y protección de la madera. Esta investigación evidencia la necesidad de contar con una especificación técnica detallada y completa, que pueda servir de difusión validada de los atributos de la madera en construcciones bien diseñadas y ejecutadas. Este tipo de obras se suelen informar a las autoridades mediante memorias de cálculo y especificaciones del cumplimiento de la normativa vigente, por lo tanto, se propone un esfuerzo adicional para adecuar esta información de manera entendible para los usuarios, utilizando plantillas para especificar requerimientos técnicos, itemizados y certificaciones como las de edificios sustentables que han sido creadas por organismos calificados como el Instituto de la Construcción, la Cámara Chilena de la Construcción, junto con pruebas, ensayos y certificaciones que brinden garantías en el mercado. Se realiza un análisis desde el punto de vista de especificaciones técnicas (complejidad, sustentabilidad, sofisticación y ciclo de vida de la madera) para edificios en madera que, a partir de ahora, pueda ser usado para el benchmarking y como medio de validación del desempeño de los edificios, al mismo tiempo servir de modelo para otros actores que lo vean como un medio para desarrollar confianza tanto para clientes como para el mercado.

1. Introducción

Las grandes obras arquitectónicas incluyen el diseño, el cumplimiento normativo que se establece en el lugar de emplazamiento y, dado que los edificios en madera son cada vez más altos, se van teniendo mayores requerimientos estructurales, sean estos de resistencia estructural o frente al fuego, entonces los componentes estructurales compuestos de madera se diseñan con madera contralaminada (CLT), madera laminada (LVL) o madera laminada encolada (Glulam). [1] Los edificios más connotados en el mundo son referentes para los países en vías de desarrollo, como es el caso de Chile por sus ventajas en materia de sostenibilidad derivadas del uso de la madera como material de construcción renovable. La madera es susceptible a degradarse por factores bióticos y abióticos en el medio natural,

condicionando su estabilidad para el uso estructural y perjudicando el desempeño de sus propiedades [2]. Por ende, la protección de ésta se ocupa de todos los aspectos que aumentan la vida útil de los productos de madera. Uno de los métodos es la preservación, mediante la incorporación de compuestos químicos, la modificación de la madera incorpora, entre otros, grupos radicales para acetilización o furfurilación [3]. En base a lo anterior, en Chile se han presentado connotadas obras arquitectónicas en madera, en donde por temas de sustentabilidad se ha optado por no incorporar productos químicos en ésta [4], provocando que el desempeño en servicio de la madera pueda verse afectado.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Conocer y difundir los cumplimientos técnicos, y las estrategias de protección de la madera en algunas connotadas obras arquitectónicas en Chile

2.2. Objetivos específicos

- Realizar un levantamiento de información respecto a obras arquitectónicas chilenas de gran impacto y sus especificaciones técnicas, incluyendo estrategias de protección de la madera en construcción.
- Entrevistar a los profesionales para conocer detalles de los cumplimientos normativos y los criterios de selección, incluyendo cuáles son sus argumentos tanto de sustentabilidad como de protección para la madera.
- Proponer como modelo una plantilla que resuma las especificaciones técnicas y un manual de mantenimiento.

3. Material y método

3.1. Materiales

Se utilizó material bibliográfico de carácter técnico-científico en formato digital sobre opciones respecto a las principales obras arquitectónicas realizadas en Chile en los últimos años

3.2. Método

Se indagó mediante medios de divulgación como internet, artículos científicos y otros respecto de connotadas obras arquitectónicas de Chile, se seleccionó un grupo de ellas y se entrevistó a los profesionales, arquitectos e ingenieros, de 5 de ellas. Indagando en cómo se resolvieron las exigencias de resistencia estructural, resistencia al fuego, aislación térmica y acústica y sobre la protección de los componentes de madera frente a la degradación biótica y abiótica. Esta indagatoria no se basó en la evidencia física o revisión de las especificaciones técnicas desarrolladas para cada caso. Para este estudio exploratorio sólo se han podido verificar por la visualización de las obras. Basado en los antecedentes se propone adecuar un modelo, tipo plantilla, desarrollado por organismos como el Instituto de la Construcción, Certificación de edificios Sustentables y Itemizado del Instituto de la Construcción para presentar un resumen informativo de las decisiones técnicas en etapas tempranas del diseño, lo

cual actualmente se hace escasamente sólo por algunos actores. Ello permitirá desarrollar confianza con clientes en un espectro más amplio y masivo de edificaciones, no acotado sólo a aquellos que por ley el mercado público exige. Se propone que las nuevas obras arquitectónicas de gran tamaño en madera, como edificios de mediana y gran altura, visibilicen estos cumplimientos presentándolos en un nuevo instrumento creado como “Ítemizado estándar de Especificaciones Técnicas (EETT) de Proyectos de Edificación” que contiene un listado detallado y ordenado secuencialmente de las especificaciones y medios de verificaciones que cumple el edificio. El cual deberá incluir Misma situación rdetalles de las soluciones de protección, sea por diseño o por tratamientos de preservación aplicados a madera y biomateriales, con la entrega de las certificaciones que garanticen su durabilidad en el tiempo.

Esta estrategia de EETT y manual de mantenimiento idealmente debiesen extenderse a otras materialidades. Sin embargo, se plantea que para las edificaciones nuevas en madera, dado que la penetración de estas en el mercado requiere de estrategias de consolidación.

4. Presentación y análisis de resultados

Tabla 1. Ejemplos de obras connotadas y sus referencias a la protección

Nombre	Casa Cala	Casa Fuego	Hotel Tierra Patagonia	Campamento minero	Edificio Peñuelas
Ilustración					
Protección	No posee [3].	Imprimante [3].	No posee [3].	Preservantes [4]	M. termo tratada
Argumentos técnicos del autor para la protección efectiva	La autora de esta obra apunta a que por temas de presupuesto se implementó el uso de madera en estado bruto recién aserriada como parte de la estructura y, hacer terminaciones en puntos estratégicos, como lo son las ventanas [3].	Zegers menciona que hoy se puede apreciar la madera maltratada sobre todo la fachada que queda expuesta al norte o, las que quedan más húmedas. No obstante, la obra posee imprimantes de buena calidad que permiten que subsista [3].	La arquitecta señala, “que la obra se construye bajo parámetros de sustentabilidad de diseño, con entablado de lenga lavada sin ningún tipo de imprimante, apuesta al clima seco de la Patagonia [3].	Yáñez señaló que el pino radiata y la madera laminada encolada fueron los protagonistas de esta construcción modular. Además, los revestimientos estructurales son de OSB [4].	Felipe Victorero menciona que el tinte se va decolorando y debe reemplazarse, pero la madera termotratada se mantiene intacta,. Solo perderá el color no es que se vaya a ver dañada significativamente [5]

En base a los antecedentes presentes en la Tabla 1, se propone a modo de pauta, ejemplificada en la Tabla 2, describir las especificaciones y manual de mantenciones para la construcción en madera, indicando si corresponde la existencia de ensayos, certificaciones u otros documentos. El objetivo es que el sector proveedor entregue información verificable para defender tanto el cumplimiento de normas, como la sustentabilidad de los proyectos, ello contribuirá a desarrollar confianzas tanto para el mercado tradicional como para el mercado emergente de edificación en altura en madera.

Tabla 2. Ejemplificación de pauta con especificaciones y manual de mantención para la construcción en madera.

Especificaciones técnicas	
Obra gruesa	Terminaciones
• Excavaciones y movimientos de tierra. • Estabilización del terreno. • Fundaciones y cimientos. • Sobrecimientos. • Bases de pavimentos. • Estructura Resistente. • Elementos verticales no soportante. • Estructura de techumbre. • Cubiertas.	• Comportamiento al fuego. • Aislación térmica. • Aislación acústica. • Revestimientos interiores y exteriores. • Tratamiento de fachadas. • Cielos. • Pavimentos. • Puertas y ventanas. • Pinturas y Barnices.
Manual de Mantención	

En función de la especialidad que tenga la madera que se use en la construcción, los instaladores y/o proveedores proporcionarán el manual de mantenciones, recopilando la información y disponibilizándola a los clientes de forma entendible y clara.

5. Discusión

Debido a que la Ordenanza General de Urbanismo y Construcción (OGUC) establece exigencias técnicas, estas deben quedar plasmadas en un documento disponible no sólo para respaldar la recepción final de obra, sino también para los clientes y futuros compradores. Estas prácticas que en el pasado pudieron haberse efectuado, se han ido perdiendo en el tiempo y actualmente al presentar la oferta de soluciones constructivas no se entregan antecedentes de validación para que los clientes se sientan confiados en las soluciones constructivas en madera. Un ejemplo de ello es la aplicación de la norma chilena NCh 819, por estar contenida dentro de la OGUC, obliga a preservar maderas no durables, como es el pino radiata principal especie usada en construcción en Chile, que rige para la mayoría de las obras porque es la especie más utilizada como es el caso del Edificio Campamento minero que utilizó para la construcción modular pino radiata [6]. Algunos de los proyectos analizados utilizaron madera de Lenga, una especie nativa catalogada como durable, esta normativa no obliga a que deba ser preservada [6]. No obstante, en línea con la sustentabilidad y ciclo de vida, la Lenga al estar expuesta a agentes ambientales de deterioro, podría ver afectado su desempeño mecánico y estético al acelerar el proceso de deterioro, disminuyendo el ciclo de vida del edificio [1]. Lo anterior llevaría a demandar mayor cantidad de materia prima, es decir, cortar más bosques nativos para la extracción de madera, entonces pone en duda qué tan sustentable es el uso de madera natural.

6. Conclusiones

En la línea de la construcción sostenible se definen cinco categorías como instrumentos de política: Los instrumentos regulatorios (RI); los instrumentos económicos (EI); las herramientas de la información (TI); las herramientas política voluntaria (VPT) y; las herramientas de investigación y desarrollo [7]. Implementando diseños y elementos sustentables y, que a su vez tengan un buen desempeño mecánico. Se cree que las estrategias de protección de la madera pueden ser una buena alternativa para disminuir la presión sobre extracción de madera para construcción, prologando su vida útil en servicio, y además un ahorro de costos en mantenimiento y arreglos.

Agradecimientos

Se agradece de gran manera a los arquitectos que aceptaron proporcionar de información respecto a sus obras.

Referencias

- [1] Wiegand, E; Ramage, M. (2022) The impact of policy instruments on the first generation of Tall Wood Buildings, *Building Research & Information*, 50:3, 255-275, DOI: 10.1080/09613218.2021.1905501
- [2] Acevedo, A; Bustos, C; Lasserre, J; Gacitua, W. (2013) Efecto de un envejecimiento acelerado mediante rayos UV en la propagación superficial de grietas de debobinado en tableros contrachapados de *Eucalyptus nitens*. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 15(1), 45-56. Epub December 13, 2012 doi. org/10.4067/S0718-221X2013005000004
- [3] Van Acker, J; Van den Bulcke, J; Forsthuber, B; Grüll, G. (2023) Wood Preservation and Wood Finishing. In: Niemz, P., Teischinger, A., Sandberg, D. (eds) *Springer Handbook of Wood Science and Technology*. Springer Handbooks. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-81315-4_15
- [4] Salazar, M. (2022) De origen nativo y de diálogo con el paisaje: La obra en madera de Cazú Zegers. *Madera 21 de CORMA*. <https://www.madera21.cl/blog/2022/05/19/de-origen-nativo-y-de-dialogo-con-el-paisaje-la-obra-en-madera-de-cazu-zegers/>
- [5] Salazar, M. (2022) La ingeniería detrás de los ocho edificios de madera construidos en un campamento minero de Chile. *Madera 21 de CORMA*. <https://www.madera21.cl/blog/2021/04/09/la-ingenieria-detras-de-los-ocho-edificios-de-madera-construidos-en-un-campamento-minero-de-chile/>
- [6] Corporación Chilena de la Madera. (2020). Sustentabilidad y confort: Las ventajas de los primeros edificios de madera en Chile. Noticias. <https://www.corma.cl/sustentabilidad-y-confort-las-ventajas-de-los-primeros-edificios-de-madera-en-chile/>
- [7] Norma Chilena. (2019) NCh819:2019 Madera preservada - Clasificación según riesgo de deterioro en servicio y muestreo. Instituto Nacional de Normalización (INN), Santiago Chile.

1142

PROTOTIPO MODULAR PREFABRICADO DE 'MADERA MACIZA INDUSTRIALIZADA' ADAPTABLE A LAS PENDIENTES PRONUNCIADAS DEL NORTE DE PORTUGAL

Juan Gilberto Bugarin Castillo¹; José Amorim Faria¹; Diego Calvetti¹

¹ Universidade do Porto

Palabras clave / Palavras-chave:

Portugal, Prefabricación, Madera maciza industrializada, LCA, Sostenibilidad, Prototipo modular

Resumen / Resumo:

El objetivo de este resumen es presentar un prototipo modular de Madera Masiva prefabricada adaptable a las diferentes pendientes pronunciadas de Portugal. El almacenamiento de carbono, en contraste con las técnicas tradicionales de construcción, junto con los beneficios del diseño biofílico para la salud de vivir en un espacio construido con madera sólida, la calidad del aire y la acústica, son todas razones sólidas para migrar de estructuras tradicionales a estructuras de Madera Masiva prefabricada. Un habitáculo de Madera Masiva prefabricada puede aprovechar la madera obtenida de bosques gestionados de manera sostenible en la península, aliviando la crisis de vivienda y desempeñando un papel crucial en la lucha contra el cambio climático a través del almacenamiento de carbono. Se presenta el prototipo concebido por el primer autor y se lleva a cabo un análisis de su sostenibilidad utilizando criterios que incluyen el Análisis del Ciclo de Vida (LCA), así como consideraciones en el proceso de ensamblaje en condiciones desfavorables del terreno y otros criterios aplicables.

1. Introducción

La elección del material adecuado para una vivienda sostenible y segura es una de las demandas de los propietarios que planean construir una unidad de vivienda en sus propiedades. Elegir la madera como sistema de construcción, ya sea una estructura ligera o madera laminada encolada, tiene beneficios para la construcción, como la versatilidad del material y una cadena de suministro sostenible; así como beneficios para los ocupantes, como resistencia térmica, acústica, sísmica y contra incendios. La madera también puede ayudar a maximizar el valor a través de ganancias en el área y la altura del edificio.

La construcción ligera de madera ha sido durante mucho tiempo la opción sustentable preferida para la construcción de viviendas residenciales. La rentabilidad, la eficiencia de los materiales, la facilidad de ensamblaje, el impacto ambiental mínimo y la disponibilidad de mano de obra y materiales hacen que la construcción de estructuras de marco ligero sea el tipo más común en una pequeña escala. Mientras que las estructuras de madera laminada encolada a menudo se construyen como componentes prefabricados y se ensamblan en el lugar del proyecto, la construcción de marco ligero generalmente se realiza completamente en el sitio.

Este proceso también reduce el ruido, los escombros y el impacto del tráfico de la actividad de construcción en los vecindarios donde se lleva a cabo. No hay almacén alrededor de puertas y ventanas. La estructura es altamente eficiente porque no hay puentes térmicos. Este diseño tiene el potencial de reducir los niveles de estrés y mejorar la salud de los ocupantes, ya que se ha demostrado que la exposición a algún elemento natural, en este caso la madera, reduce la activación del sistema nervioso simpático. Otra ventaja de una vivienda con interiores de madera laminada cruzada expuesta es que mejora la calidad del aire: la madera absorbe el exceso de humedad del aire interior y, cuando el aire está demasiado seco, la devuelve. De igual manera, la madera tiene un buen rendimiento acústico, amortigua el sonido de forma natural y ofrece un excelente control del ruido. Absorbe los sonidos y crea un ambiente tranquilo y relajante.

Los componentes de madera prefabricados utilizados tanto en la construcción de estructuras de marco ligero como en la de madera laminada encolada pueden ayudar a resolver muchos desafíos de diseño e ingeniería, como la eficiencia de materiales y procesos, el rendimiento ambiental y la seguridad.

La prefabricación de madera tiene una multitud de beneficios: eficiencia en el proceso, entorno controlado, mayor retorno de inversión, eficiencia de materiales, reducción de residuos tanto en el lugar como fuera de él, y sostenibilidad [1]. Debido a su tamaño, una unidad de vivienda prefabricada es ideal para la construcción prefabricada. En el creciente mercado de viviendas sostenibles, hay un sector que apuesta por la prefabricación de estas unidades. Estas empresas pueden reducir el tiempo de construcción en un 50%. El proceso implica la fabricación de toda la estructura fuera del sitio y su entrega en la parte trasera de un camión, donde se realiza todo el trabajo necesario en el lugar para preparar la cimentación en la que se instalará la unidad en el suelo [2]. “Modular” hace referencia a algo construido u organizado a partir de unidades independientes. Como se señala en el informe de McKinsey and Company titulado “Modular Construction: From Projects to Products”[3], la construcción ha quedado rezagada en cuanto a su desempeño en productividad en comparación con otros sectores durante décadas. Hoy en día, se está produciendo un cambio de paradigma, y muchos aspectos de la construcción están transitando de proyectos tradicionales en el lugar de construcción a una producción estilo fabricación fuera del sitio.

La construcción modular no es un concepto nuevo, pero está experimentando un renovado interés e inversión debido a los cambios en el entorno tecnológico y económico. Esta forma de construcción es parte de un subconjunto de la industria de vivienda en la que el tiempo de instalación en el lugar es el factor diferenciador en comparación con otras viviendas prefabricadas que no necesariamente se basan en un sistema modular. La mayoría de las empresas que ofrecen este sistema utilizan módulos predefinidos que pueden conectarse entre sí, generando diferentes configuraciones.

Para los fines de este resumen, presentaremos los componentes individuales del prototipo [4][5] que fue creado previamente, como los paneles, las vigas y las correas, así como los elementos modulares a partir de los cuales se diseña el prototipo.

2. Caso de estudio

Portugal, en su conjunto, cuenta con una topografía montañosa y accidentada en muchas regiones, lo que se traduce en la presencia de numerosas laderas empinadas en todo el país. Se presenta la adaptación del prototipo a este tipo de regiones, considerando aspectos como las tecnologías de cimentación y conexiones con los suelos y rocas circundantes, así como la tecnología de constructiva empleada.

Además, se realiza un análisis de sostenibilidad del prototipo utilizando criterios apropiados, como el Análisis del Ciclo de Vida (LCA), con un enfoque en las fases A 1-3 y A 1-5. Esto implica la evaluación del secuestro de carbono de las piezas antes de ser transformadas en elementos estructurales y térmicos, así como la medición de las emisiones necesarias durante este proceso. Se lleva a cabo un seguimiento exhaustivo de la trazabilidad de los elementos, desde su punto de origen hasta el montaje, considerando el proceso de ensamblaje en condiciones desfavorables del terreno y evaluando diversas técnicas. En relación con las fases C 1-4 del LCA, se evalúa el desmontaje, teniendo en cuenta que el diseño base se adhiere a los principios de DFMA (Diseño para la Fabricación y el Ensamblaje).

3. Conclusiones

Las ventajas que una vivienda de Madera Laminada encolada puede ofrecer son una ventaja como el almacenamiento de carbono, al mismo tiempo que proporciona los beneficios de un interior de madera natural para el ocupante. Una mayor velocidad y limpieza en el momento del montaje, así como menos ruido de construcción en comparación con el sistema de estructura de madera tradicional, son ventajas adicionales.

La variada topografía del Portugal requiere soluciones prácticas y rápidas para construir vivienda. El sistema propuesto en esta tesis pone a prueba la construcción de una vivienda que puede ser fácilmente instalada en cualquier terreno y permite su expansión de acuerdo con las necesidades del ocupante. En un momento en el que la absorción de carbono es tan importante debido a la crisis del calentamiento global, construir con Madera Laminada encolada asegura que el carbono se almacene durante mucho tiempo.

Agradecimientos

La parte de este trabajo realizada por Calvetti se realizó bajo los auspicios de Base Funding UIDB/04708/2020 of the CONSTRUCT - Instituto de I&A em Estruturas e Construções - funded by national funds through the FCT/MCTES (PIDDAC).

Referencias

- [1] Designing. OSM, O. S. M. (2018). Designing sustainable, prefabricated wood buildings.
- [2] Smith, R. E., Griffin, G., & Rice, T. (2015). Solid timber construction: Process, practice, performance. Report sponsored by American Institute of Architects, USDA Forest Products Laboratory and FPI Innovations.
- [3] Construction from Projects to Products, McKinsey Modular. Bertram, N., Fuchs, S., Mischke, J., Palter, R., Strube, G., & Woetzel, J. (2019). Modular construction: From projects to products. McKinsey & Company: Capital Projects & Infrastructure, 1-34.
- [4] Bugarin, J. (2022). Prefabricated Mass Timber Modular ADU Prototype Adaptable to the Steep Hillsides of Southern California [Tesis de Master] Institute for Advanced Architecture of Catalonia. (NNT :). (tel-04252850)
- [5] Bugarin, J. (2022). Prefabricated Mass Timber Modular ADU Prototype Adaptable to the Steep Hillsides of Southern California [Presentación de Poster] International Mass Timber Conference, Portland, Oregon, Estados Unidos

1143

QUALITY SORTING OF SAWN WOOD PRODUCTS USING NIR SPECTROSCOPY AND CHEMOMETRIC MODELS

René Herrera Diaz¹; Jakub Sandak¹; Anna Sandak¹

¹ InnoRenew CoE - University of Primorska

Palabras clave / Palavras-chave:

Non-destructive methods, Wood quality detection, Juvenile wood, Adult wood

Resumen / Resumo:

The ongoing investigation into non-destructive techniques for early wood quality detection holds significant importance in the field of wood construction. This study aimed to develop a rapid and simple approach to detect juvenile (core) or adult (outer) wood in the radial and transversal sections of raw materials used for manufacturing wood products, such as window frames. Two near-infrared (NIR) instruments, one in a laboratory setting and another portable, were employed for this research. The experimental samples included industrially manufactured window profiles containing both juvenile and adult wood. A total of 1500 spectra were collected with both instruments on radial and cross sections in a conditioned environment (65% RH and 20 °C). Preliminary results demonstrate the successful development of robust chemometric models based on NIR spectra and associated analysis. The potential of NIR measurement to detect juvenile and adult wood suggests its use in supporting the quality sorting of sawn wood products.

1. Introduction

Natural wood variability is a great technical challenge for wood processing industries. One of the most important quality features is presence of juvenile wood, which should be minimal in a high-quality product, such as window frames. Core wood, also known as juvenile wood, constitutes the innermost section of the tree trunk near the pith. It represents the primary tissue that experienced rapid growth during the early stages of the tree's life. The characteristics of juvenile wood evolve progressively through successive growth rings until reaching maturity and transforming into adult wood. Juvenile wood has a cellular structure with lower tracheid length, lower density, lower stiffness and cellulose/lignin ratio, higher spiral grain and microfibril angle, and, usually, wider yearly rings [1]. Above mentioned characteristics have deep negative effects on physical-mechanical and technological properties of the material. To ensure proper quality, it is necessary to identify and quantify the presence of juvenile wood. However, the current procedure used for that purpose relies mainly on visual verification. This fact makes necessary the development of an alternative procedure capable of identifying the presence of juvenile wood with higher accuracy and by quick and easy measurements

Various studies have been conducted to determine the point of demarcation between inner-outer wood using different methodologies. These include the use of specific gravity data, where linear regressions, segmented regression or discriminant analysis are widely used to determine the demarcation point [2-3]. In addition, the measurement of the cellulose microfibril angles (MFA) is also used to describe the core-outer wood, as it provides useful information to distinguish regions of the wood, since the MFA are large in the core wood and small in the outer wood [4]. However, these methods require long and careful sample preparation and are not applicable in situ.

1.1. Materials and methods

1.1.1. Materials

Sets of glued wood joints composed of three different boards of Scots pine (*Pinus sylvestris* L) were randomly selected for the NIR measurements. The radial and transversal surfaces of each piece were sanded before measurements and kept conditioned at 20 °C and 65% RH in a dark room before and during the measurements. Zones of juvenile, adult, as well as reaction and heartwood were identified, marked, and measured by both instruments. Spectra were collected on cross and radial sections. In total, 1 500 spectra were collected with microNIR and 360 with FT-NIR instrument.

1.1.2. Spectroscopy

Near-infrared spectra were collected using two different instruments, laboratory and portable one.

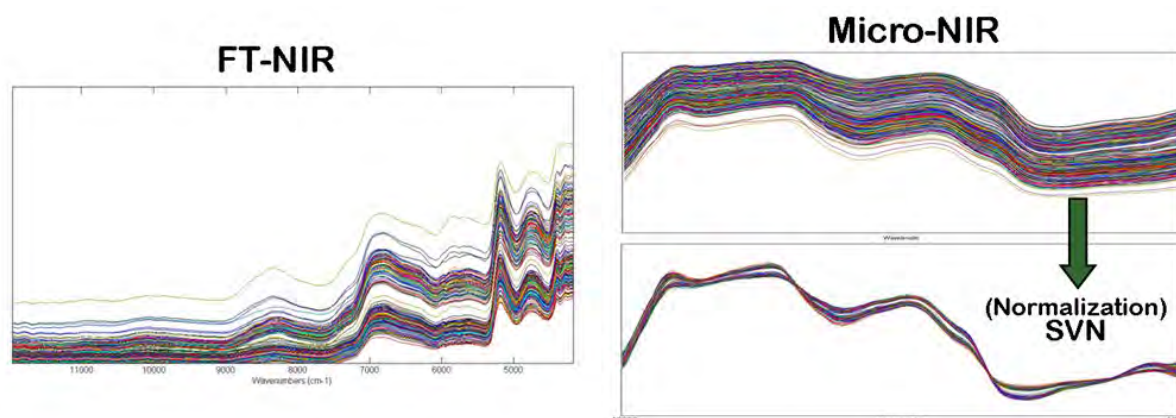
Laboratory Fourier-transform NIR spectrometer:

A Vector N-22 Fourier-transform NIR spectrometer, produced by Bruker Optics GmbH (Ettlingen, Germany), was equipped with a fibre optic probe and operated in the measurement range between 12000 cm⁻¹ to 4000 cm⁻¹ (833 to 2500 nm). The spectral wavenumber interval was 3.85 cm⁻¹ with zero-filling equal to 2. The spectral resolution was 8 cm⁻¹ and 32 internal scans were averaged at each spectrum.

Portable Micro-NIR:

A Portable MicroNIR Pro 1700 spectrometer by VIAVI Solutions Inc. (Santa Barbara, USA), integrated with a tungsten lighting lamp and 128-pixel InGaAs photodiode array detector, was used as an alternative instrument. Spectra were acquired with a scanning frequency of 80 Hz, allowing 12.5 ms of the integration time. The effective spectral range covered by the sensor was 950-1650nm (10526 – 6060 cm⁻¹).

1.1.3. Analysis



The data analysis from both instruments was carried out with PLS Toolbox software (Eigenvector Research, Inc.). The pre-treatments applied were normalization (Normalization, SNV), filtering (EMSC, derivatives (Savitzky-Golay 1st and 2nd derivative)), scaling (Mean Centre), and removal of some wavelength regions. Then different analyses were performed in order to obtain the most suitable model for our goal (Figure 1). The classification was done by PLS-DA, SVM, KNN, and SIMCA methods.

Figure 1. Raw signals and preprocessing

2. Results

2.1. Classification

Support Vector Machine (SVM) as a pre-processing step was identified as the optimal approach, providing the highest discrimination between juvenile and adult wood. The classification success for juvenile and adult wood using FT-NIR and Micro-NIR with these chemometric models was 83% and 92.7%, respectively. The independent validation set, comprised of diverse wood samples used for calibration, demonstrated high accuracy in discriminating juvenile wood (100%) and adult wood (81.3%). Extension of the models with spectra from reaction and heartwood resulted in a 100% success rate for discriminating reaction wood and 45.5% for heartwood (Tables 1,2). These preliminary findings highlight the high feasibility of NIR spectroscopy in discriminating juvenile and adult wood., the preliminary results prove a high feasibility for NIR spectroscopy in the discrimination of juvenile and adult wood.

Table 1. Prediction of model of FT-NIR

FT-NIR	Adult	Heart	Juvenile	Reaction
Predicted as adult	77	8	21	31
Predicted as heart	8	77	0	23
Predicted as juvenile	15	15	64	0
Predicted as reaction	0	0	14	46
Unassigned	0	0	0	0

Table 2. Prediction of model of Micro-NIR

Micro-NIR	Adult	Heart	Juvenile	Reaction
Predicted as adult	81	55	0	0
Predicted as heart	0	45	0	0
Predicted as juvenile	11	0	100	0
Predicted as reaction	7	0	0	100
Unassigned	0	0	0	0

Figure 2 illustrates the Hotellings T2 versus Q residuals, which helps to explain how precise the model was in describing a given class (core-transition-outer). The samples belonging to the assigned classes fit within the 95% Qlimit, which was a good indicator of the model performance. The initial findings indicate the successful development of robust models based on NIR spectra for the detection of juvenile wood. Consequently, these models have the potential to support the quality sorting of sawn wood products. however, the model developed has to be extensively validated to deal with other sources of wood variability as related to the provenance, defect presence, or drying history.

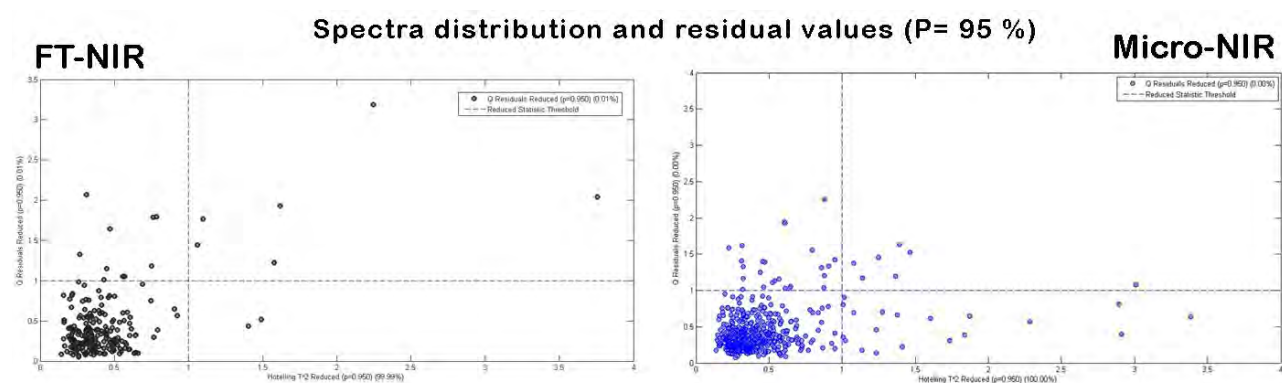


Figure 2. Class discriminations results (Hotellings T2 versus Q residuals)

3. Conclusions

The preliminary results show that it was possible to develop robust models based on NIR spectra for the discrimination between juvenile, adult, and heartwood. Therefore, these models have the potential to support the quality sorting of sawn wood products. However, the model developed has to be extensively validated to deal with other sources of wood variability.

Acknowledgement

This research was funded by the European commission's funding of the Innorenew project (grant agreement #739574 under the horizon 2020 widespread-2-teaming program) and the republic of Slovenia (investment funding from the republic of Slovenia and the European regional development fund). This research presents a study related to MULTI-WOOD project #101067636 funded by

Horizon Europe MSCA PF. Co-funded by the European Union (ERC, ARCHI-SKIN, #101044468). Views and opinions expressed are, however, those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Research Council. Neither the European Union nor the granting authority can be held responsible for them.

References

- [1] Ruano, A., Garcia de Ceca, J. L., Cabrero, J. C., & Hermoso, E. (2022). Shrinkage pattern assessment for black pine juvenile wood delimitation. *European Journal of Wood and Wood Products*, 80(1), 131-138.
- [2] Bobadilla, I., Martínez, R. D., Esteban, M., & Llana, D. F. (2018). Estimation of wood density by the core drilling technique. *Holzforschung*, 72(12), 1051-1056.
- [3] Lehnebach, R., Bossu, J., Va, S., Morel, H., Amusant, N., Nicolini, E., & Beauchêne, J. (2019). Wood density variations of legume trees in French Guiana along the shade tolerance continuum: heartwood effects on radial patterns and gradients. *Forests*, 10(2), 80.
- [4] Kita, Y., Mizuno-Tazuru, S., & Sugiyama, J. (2020). Two-dimensional microfibril angle mapping via polarization microscopy for wood classification. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 415, No. 1, p. 012028). IOP publishing.

1144

REFORMA Y AMPLIACION CASA CHANOS

Miguel C. Cabo Fernández¹

¹ ETS Arquitectura, DCTA, UPM

Palabras clave / Palavras-chave:

Arquitectura popular, Casas de madera, Corredor, Galería, Autoconstrucción

Resumen / Resumo:

Se trata de una obra de reforma y ampliación sobre una casa tradicional de muros de piedra y forjados de madera de una antigüedad de más de 200 años. La casa conservaba los muros exteriores de mampostería de piedra con la formación de huecos en espera de ser transformada algún día en vivienda. La reforma respeta los muros existentes con sus huecos y se plantea la ampliación con una solana de nueva creación hacia el suroeste y una galería hacia el noroeste en planta baja hacia el jardín. La madera se ha utilizado de una manera tradicional en el interior y en exteriores protegidos por los aleros, como es el caso de puertas, ventanas y corredores. La intervención ha respetado la mayor parte de las vigas de madera existentes, casi todas de chopo país. La cubierta de losas de pizarra sobre estructura de madera fue sustituida en su totalidad debido al mal estado de conservación. El corredor se ha diseñado y construido al modo tradicional local utilizando madera de castaño, por ser habitual en la zona y por tener un buen comportamiento en espacios exteriores protegidos, donde una cierta exposición a la lluvia es habitual. La galería se ha diseñado pensando en un elevado grado de prefabricación ligera. Los módulos de fachada consistieron en marcos ligeros (70X240 cm), para facilitar su fabricación en el taller de la propia casa y con un peso apto para su manejo por el propietario, el cuál ha intervenido en su construcción.

1. Introducción

1.1.Datos de obra

Situación: C/ Chanos, 5, Noceda del Bierzo, León

Propiedad: Miguel Cabo

Arquitecto: Miguel Cabo

Comienzo de obra: 2007

Fin de obra: 2015

1.2.Estado inicial

Noceda del Bierzo es una pequeña localidad situada en el noreste del Bierzo, provincia de León, situada a los pies de una zona montañosa. Antes de comenzar la rehabilitación la casa conservaba su envolvente en mamposterías mixtas de lajas de arenisca, piedra de grano y piedra realenga con una tipología usual en la comarca incorporando algún hueco recercado con ladrillo macizo. La casa nunca llegó a ser habitada y de hecho se utilizó como cobijo para ganado ovino. La madera de la vigería era mayoritariamente de chopo país, localmente conocido con el término de chopas (*populus nigra*). La antigüedad de la vigería era de unos 200 años y su estado de conservación era bastante aceptable por lo que solo se necesitó un tratamiento curativo y preventivo para su puesta de nuevo en servicio. El peor estado se concentraba en el conjunto de la cubierta por lo que se decidió su sustitución completa.

2. La transformación en vivienda

Toda la intervención ha sido realizada en el ámbito de la arquitectura popular tradicional española [1], [2], [3].

2.1.Adecuación de los interiores

La planta baja semienterrada se reservó para localizar una bodega con zona para meriendas y reuniones, y la parte principal destinada a un pequeño taller artesanal dedicado a la carpintería tradicional, con pequeña maquinaria electro- mecánica. Este taller se utilizó por el propietario como zona de fabricación y ayuda para determinadas partes de la reforma, como el caso de la escalera y especialmente de la galería.

La planta alta se destina a la vivienda reservando gran parte del espacio para salón con cocina integrada en un solo espacio, un baño, un dormitorio y un despacho. En el espacio bajocubierta se ubicaron dos dormitorios, un baño, y un estudio-galería.

2.2.Resumen de la intervención

La obra se comienza con el derribo de la cubierta, pero manteniendo los tirantes como sistema de vigería plana para el piso de bajocubierta. Luego se procede a formar un cordón perimetral de vigas de madera aserrada que se sobrepone sobre los apoyos de las vigas para formar un cuerpo que servirá de estribado a la armadura de cubierta. Toda la madera nueva de estructuras a emplear en la rehabilitación, salvo excepciones, es de madera de pino norte aserrada en escuadrías habituales de 10x15 y 10x20 cm, según necesidades. Para la tablazón de los paños de cubierta también se utiliza pino norte en formato de tabla ancha machihembrada de 190x29 mm (calidad quintas y sextas, según ubicación). La tabla se protege con una lámina geotextil transpirable y luego se colocan rastreles y aislamiento para terminar con una pizarra local recortada con boca de pala y tomada con gancho. Terminada la cubierta ya se puede trabajar a cubierto por dentro de la casa.

En la siguiente etapa se emprende una reforma en la vigería del primer piso, en la zona de mayor luz. Se coloca un nuevo pilar de madera apoyo sobre la solera de planta baja para que sirva de apoyo a una nueva viga transversal que cortará la luz a varias vigas de la zona más ancha de la casa. Se utiliza una viga de pino silvestre de la zona careada a mano con hacha. En el piso primero

se colocan dos pies derechos sobre esa viga y se llevan hasta la viguería de cubierta para servir de apoyo a la hilera que formará la cumbrera con la intención facilitar la apertura de unos buhardillones en cubierta, especialmente uno destinado a estudio y que se diseñó con un frente de ventanas de unos 4 m, para servir como estudio.

Para la tabla de suelos se buscó por los aserraderos locales chopo país de parecidas características, aunque fue muy difícil encontrar la cantidad necesaria, pues ya casi no quedan chopos de esas características. Los tablones eran de 4 cm. y de ancho de aserrado variable, con lo que no hay dos tablas de igual ancho. Esta tabla irregular resuelve la estructura secundaria entre vigas, pero no es buena como acabado de pavimento para el piso superior. Por ello se coloca una lámina de separación y se clavan rastreles; se coloca aislamiento de lana mineral entre los rastreles para mejorar el aislamiento térmico y acústico y luego se coloca tabla machihembrada clavada sobre los rastreles. En el primer piso se coloca tabla de pino norte de 190x29 mm y en el piso de bajocubierta se coloca tabla machihembrada de castaño asturiano de 160x24 mm.

Las escaleras también se construyen de madera de pino en su totalidad, tanto la estructura como las tabicas y las huellas, que en este caso son de madera de pino alistonado, ante la dificultad de conseguir tablas de unos 32 cm de ancho en madera aserrada. La solución constructiva consiste en practicar un rebaje acanalado sobre las tabicas para albergar el ancho de los peldaños. Se presentan a mano y luego se empotran mediante el atirantado de varilla roscada de 6mm de diámetro. Con ello se evita todo tipo de puntas o tornillería.

3. El corredor

En un determinado momento se decide construir un corredor en la parte suroeste de la casa, mirando hacia el río, pues dada la orientación de la casa, es la zona más soleada, y como la cocina se situó en el primer piso, serviría de sitio para comer en primavera o verano. El corredor se fundamenta sobre 2 pilares de madera nuevos que descansan sobre unas basas de hormigón hechas expreso en el patio. Sobre estos dos pilares de sección octogonal se apoya una viga con sus dos extremos en voladizo para compensar el vano y alargar el tamaño del corredor. La estructura horizontal de viguetas de pino aserrado de 10x15 cm. se intestan en el muro de piedra y se apoyan sobre la viga previamente colocada consistente en dos viguetas de 10x20 cm. adosadas. Esta primera parte de base del corredor es de pino, pero a partir de ahí, la parte más expuesta al agua se construye en madera de castaño. Se comienza colocando la tablazón de castaño de 150x30 mm. Las tablas se separan entre sí unos 3 mm para que el agua de lluvia no se quede sobre el pavimento y se filtre hacia al patio en caída libre, evitando de este modo la formación de charcos y posterior podredumbre de la madera.

Sobre la tablazón se coloca un perfil que sirve de solera, sobre el que se levantan los 4 pies derechos de 10x10 cm y a la que se fijan los balaustres y pasamanos superior e inferior, siguiendo en todo momento el modo tradicional de la comarca. El giro de los balaustres a la posición de 45° se solía hacer para minimizar el frente al sol de estas pequeñas piezas de 4x4 cm. No hay que olvidar que el peor enemigo de la madera en estas geografías es el sol, ya que abre la madera y la deja agrietada para el invierno. El techo del corredor, al estar protegido, se hace de madera aserrada de pino.

El trabajo culmina con la colocación de la carpintería en madera de iroko que se trata con aceite de linaza crudo por el interior, aunque hacia el interior se utiliza un protector a poro abierto.



Figura 1. Vistas del corredor, escalera y estudio.

4. La galería

Más adelante se plantea una última ampliación con la creación de una galería en planta baja con orientación norte-norte noroeste. Esta es la parte de la obra con un mayor nivel de prefabricación realizada en el propio taller de la casa. Los marcos se armaron con pies derechos de madera de pino Valsain (pino silvestre) de 70x100 mm sujetos arriba y abajo con tabla de castaño de 30x100 mm mediante tirafondos de 5x70 mm. La rigidización del marco se garantiza con un tablero de aglomerado hidrófugo de 19 mm y de 650x800 mm, encolado a los pies derechos y al durmiente inferior mediante presillas para ejercer presión de encolado. El marco en su conjunto adquiere unas medidas exteriores de 2.270 mm de alto por 780 mm de ancho totales. Se arman un total de 8 marcos standard para los muros del patio y otros 2 un poco más anchos para el muro de la calle. Los marcos son apilables en horizontal y se conservan en el taller hasta el momento de iniciar la construcción sobre la solera de hormigón.



Figura 2. Vistas de la Galería

5. Conclusiones

Esta casa ha sido una experiencia en el mundo de la autoconstrucción con algunas ayudas puntuales de carpinteros.

Referencias

- [1] Flores Soto, J. A. (2012). El valor de la arquitectura popular en la búsqueda de una modernización de la arquitectura española de posguerra a través de la revista Cortijos y rascacielos.
- [2] Feduchi, L. M. (1974). Panorama actual de la arquitectura popular. *Arquitectura: Revista del Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid (COAM)*, (192), 3-12.
- [3] Sambricio, C. (2016). Tradición significa cambio. Sobre la arquitectura popular en la España del primer tercio del XX. Fernández Cabo, M.C. (1977); *Armaduras de cubierta*. Ambito Ediciones, Valladolid.

1145

RENDIMIENTOS DE PINO SILVESTRE (*PINUS SYLVESTRIS*) DE 2ª Y 3ª CALIDAD DE CARPINTERIA POR CLASIFICACION MECANICA A FLEXION Y TRACCION Y CLASIFICACION VISUAL

Mario Azaña Galán¹; José Luis Villanueva¹; Saúl Gutiérrez¹

¹ CESEFOR

Palabras clave / Palavras-chave:

Clases resistentes, Clasificación, Construcción, Flexión, Tracción

Resumen / Resumo:

En la industria de aserrado española, las mejores calidades de tabla y tablón de madera, tienen como destino principal la carpintería, donde se paga más por ellas, pero productos como la madera de 2ª y 3ª tienen un reducido valor añadido comparándolas con otros productos. Por ello, desde la industria surge la necesidad y demanda de conocer el rendimiento ofrecido por medios de clasificación mecánica estructural para la clasificación de estas piezas. Para ello, se realizó un muestreo de 415 piezas medidas en aserradero y clasificadas utilizando métodos no destructivos (MTG 690 de Brookhuis) para la obtención de la frecuencia longitudinal natural de vibración en una viga biapoyada. El estudio se realizó clasificando por dos vías, flexión y tracción, y dentro de cada una de ellas se aplicaron 2 Propiedades indicadoras diferentes. La primera donde se requiere largo, frecuencia de vibración, humedad y densidad y la segunda, donde la densidad no es requerida. Los resultados obtenidos muestran que, en la clasificación visual, el rechazo es muy superior al obtenido por medios mecánicos (ya sea por flexión o tracción). En general, en la clasificación a tracción, un porcentaje mayor de probetas alcanzó una clase resistente igual o superior a C24 en comparación con la prueba de flexión. Además, al comparar los resultados entre las propiedades indicadoras (IP) 1 y 2, se observó que IP1 tuvo mejores resultados para los paquetes de 3ª, mientras que IP2 fue más favorable para los paquetes de 2ª.

1. Introducción

La clasificación de la madera es un proceso fundamental para garantizar las propiedades estructurales de este material. Por tanto, la clasificación, tanto visual como mecánica, desempeña un papel crucial en el uso y aplicación de la madera estructural. Sin embargo, a menudo surgen desafíos en la clasificación visual, como la subjetividad, la variabilidad en la percepción de la calidad de la madera y el tiempo disponible para el clasificado.

En este contexto, se ha emprendido esta investigación, que se centra en comparar la clasificación visual con la clasificación mecánica en madera de pino silvestre de segunda y tercera categoría. El objetivo central

de este estudio es evaluar la viabilidad y la eficiencia de la clasificación mecánica en comparación con la clasificación visual tradicional, enfocándose en la eficiencia, la mejora en la clasificación y la consistencia.

La necesidad de esta investigación surge de la búsqueda de un método más eficaz y confiable para evaluar la calidad de la madera, especialmente en categorías donde la variabilidad puede ser significativa. Al comparar estos dos enfoques de clasificación, se busca identificar las ventajas que la clasificación mecánica puede aportar, como una evaluación más objetiva y una mayor rapidez en la toma de decisiones.

A lo largo de este documento científico, se describirán en detalle los métodos utilizados en la clasificación visual y mecánica del pino silvestre, se analizarán los resultados obtenidos y se discutirán las implicaciones de estos hallazgos en términos de eficiencia y precisión en la selección de madera. Este estudio representa un paso importante hacia una clasificación más efectiva y consistente de la madera, lo que puede beneficiar a la industria, la economía y la gestión sostenible de los recursos forestales.

2. Material

El material de muestreo se resume en la Tabla 1, donde, n el número de piezas de la muestra; b es el valor medio del canto de menor dimensión de las piezas en mm; h es el valor medio del canto de mayor dimensión de las piezas en mm; l es media de la longitud total de las piezas en mm; MC es la humedad de la pieza en %.

Tabla 1. Datos generales de las muestras estudiadas

	Paquete	Calidad	n	b	h	l	MC
Rupérez	1	3	140	50	150	2510	12,5
	2	3	100	50	200	2510	11,5
De María	1	2	53	55	150	4500	11,7
	2	2	52	55	150	3500	11,1
	3	3	70	55	200	3500	10,6
Total	5		415				

Además, también fue necesario el uso de cinta métrica para tomar las dimensiones de las piezas, una báscula para medir su peso y obtener la densidad; y el MTG 690 de Brookhuis para la medición de la frecuencia natural de vibración.

3. Metodología

El primer paso fue medir la humedad de la madera en diferentes piezas del paquete para comprobar si el secado había sido adecuado, la humedad era uniforme en los diferentes paquetes y en consecuencia obtener una humedad de referencia.

A continuación, se midieron con cinta métrica las dimensiones de la pieza a analizar, fue pesada en las básculas y se midió su frecuencia natural de vibración longitudinal sobre las mismas básculas ya que cuentan con una superficie antideslizante apta para este uso.

Como último paso, se evaluó la calidad visual de las piezas de acuerdo a la UNE-EN 56544:2022[1] Clasificando como ME1, ME2 o rechazo.

3.1. Clasificación mecánica

Se clasificó la muestra mecánicamente con 2 IPs diferentes. El primero, IP1, se obtiene a partir del largo, frecuencia de vibración, coeficiente de ajuste por humedad y densidad de la pieza como se muestra en la ecuación (1).

$$IP1 = (2f_0 * L * CF_{Brookhuis})^2 * \rho_{12} * 10^{-6} \quad (1)$$

Donde, f_0 es la frecuencia del pico de vibración longitudinal en Hz, L la longitud de la pieza en m, $CF_{Brookhuis}$ es un coeficiente de ajuste dependiente de la humedad de la pieza, ρ_{12} , es la densidad al 12% de humedad en kg/m³.

El segundo, el IP2, es como el IP1, pero se sustituye la densidad de la pieza por un valor constante. Esta densidad cambia entre la fórmula utilizada para la flexión en la ecuación (2) y la usada a tracción en la ecuación (3) como se puede observar. En ambos casos, los informes de clasificación están en conocimiento del CEN [2], [3] de acuerdo a lo dispuesto en EN 14081-2:2018 [4]

$$IP2 = (2f_0 * L * CF_{Brookhuis})^2 * 550 * 10^{-6} \quad (2)$$

$$IP2 = (2f_0 * L * CF_{Brookhuis})^2 * 540 * 10^{-6} \quad (3)$$

De esta forma, se pretende cuantificar la mejora ofrecida por el IP1 frente al IP2 ya que el primero requiere de mayor inversión y costes al tener que medir dimensiones y peso para obtener la densidad.

4. Resultados y discusión

Debido al interés mostrado por la industria en la fabricación de MLE GL24c, se ha utilizado una configuración de clasificación para la obtención de C24 y C16 o sus homónimos T14 y T9 como se especifica en las UNE-EN 14080:2013 [5]. De esta forma se incluyen en la Tabla 2 los resultados obtenidos para la clasificación a flexión, en la Tabla 3 los resultados a tracción y en la Tabla 4 los resultados obtenidos para la clasificación visual donde se han sustituido las clases visuales ME1/ME2/R por sus equivalencias a flexión de acuerdo con la UNE-EN 1912:2012 [6] que corresponden con C27/C18/R respectivamente.

Tabla 2. Rendimientos obtenidos de caracterización mecánica a flexión para la IP1 e IP2 y 3ª y 2ª calidad

	3ª				2ª			
	IP1		IP2		IP1		IP2	
C24	278	91%	264	86%	88	84%	96	91%
C16	29	9%	43	14%	17	16%	9	9%
R	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%

Tabla 3. Rendimientos obtenidos de caracterización mecánica a tracción para la IP1 e IP2 y 3ª y 2ª calidad

	3ª				2ª			
	IP1		IP2		IP1		IP2	
T22	67	22%	35	11%	23	22%	47	45%
T14	218	71%	214	70%	70	67%	48	46%
T9	20	7%	57	19%	10	10%	9	9%
R	2	1%	1	0%	2	2%	1	1%

Tabla 4. Rendimientos obtenidos de caracterización visual para la 3ª y 2ª calidad

		3ª		2ª	
C27	ME1	122	40%	43	41%
C18	ME2	132	43%	38	36%
R	R	53	17%	24	23%

5. Conclusiones

La madera clasificada visualmente tiene rechazos superiores al 15% mientras que, en la clasificación mecánica, ya sea por flexión o tracción y con ambos IPs, el rechazo no ha superado el 2%. Además, las clases resistentes obtenidas por este método de clasificación no se ajustan a la demanda que tiene la industrial.

Al comparar los resultados obtenidos del muestreo a flexión con el de tracción, en la mayoría de casos en tracción, un porcentaje mayor de las probetas alcanza una clase resistente igual o superior a C24.

Al comparar los resultados obtenidos para la IP1 y la IP2 se observa que la IP1 obtuvo mejores resultados para los paquetes de 3ª mientras que la IP2 fue más favorable para los paquetes de 2ª.

Agradecimientos

Este estudio fue desarrollado en el ámbito del proyecto KVH Sykvestris PC14, financiado por el “FONDO EUROPEO AGRÍCOLA DE DESARROLLO RURAL” a través de la Dirección General de Competitividad de la industria Agroalimentaria y de la Empresa Agraria de la Junta de Castilla y León.

Referencias

- [1] AENOR, “UNE 56544:2022 Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas,” 2022.
- [2] G. Moltini and V. Baño, “TG1/202104/07_02. Derivation of machine settings for T-classes of Scots pine from Spain according to EN 14081-2:2018. Confidential to CEN TC124 WG2 TG1,” pp. 1–116, 2021.
- [3] G. Moltini and J. L. Villanueva, “TG1/202211/11. Derivation of machine settings for C-classes of Scots pine from Spain according to EN 14081-2:2018. Confidential to CEN TC124 WG2 TG1,” 2023.
- [4] CEN, “EN 14081-2:2018 -Timber structures - Strength graded structural timber with rectangular cross section - Part 2: Machine grading; additional requirements for type testing,” 2018.
- [5] AENOR, “UNE-EN 14080:2013 Estructuras de madera. Madera laminada encolada y madera maciza encolada. Requisitos.” 2013.
- [6] AENOR, “UNE-EN 1912:2012. Madera estructural. Clases Resistentes. Asignación de calidades visuales y especies,” 2012.

1147

RESISTENCIA AL APLASTAMIENTO PARA UNIONES TIPO CLAVIJA EN PINO ELLIOTTI

Alfredo Anibal Guillaumet¹; Roberto Daniel Manavella¹; María Cecilia Filippetti¹; Lia Caren Meyer¹; Andrea Daina Tosco¹

¹ Universidad Tecnológica Nacional

Palabras clave / Palavras-chave:

Madera; Estructuras, Conexiones mecánicas, Capacidad portante, Pasadores

Resumen / Resumo:

El Reglamento Argentino de Estructuras de Madera INTI-CIRSOC 601 [1] incorporó en sus suplementos valores admisibles, para el comportamiento en flexión, compresión y tracción, a partir de numerosas publicaciones y normas que proponen metodologías de clasificación visual resistente para madera proveniente de bosques implantados en Argentina. En tanto que, para determinar la capacidad portante de las uniones, ante la escasa cantidad de trabajos publicados, anexó una tabla, con origen en la norma NDS [2], que propone valores de tensiones admisibles al aplastamiento en función de la densidad específica anhidra de la madera, el diámetro del perno y la dirección de carga. Los pocos estudios publicados a la fecha sobre esta propiedad, para las maderas cultivadas en Argentina, muestran que las tensiones así determinadas resultan superiores a las verificadas experimentalmente, generando incertezas sobre el comportamiento de la conexión. Los pinos resinosos elliotti y taeda (*Pinus elliottii* y *Pinus taeda*) son las especies con mayor superficie forestada en Argentina y las más utilizadas en la construcción. Este trabajo presenta los resultados experimentales para 4 diámetros de perno (5 mm, 7mm, 8 mm y 10 mm) sobre madera de pino elliotti proveniente de la provincia de Misiones en Argentina. La determinación de la resistencia al aplastamiento se realizó de acuerdo con la norma UNE EN 383 [3]. Los resultados experimentales obtenidos muestran valores inferiores a los propuestos en el Reglamento [1], especialmente en los pernos de mayor diámetro donde los valores obtenidos son del orden del 50%.

1. Introducción

Johansen [4] desarrolló un modelo -el European Yield Model (EYM)- para describir y predecir la resistencia de una conexión considerando la falla por aplastamiento de los miembros unidos, la falla por rótulas plásticas en la clavija o una falla de ambos en forma simultánea. Este modelo inicial se basó en dos propiedades de los materiales: la resistencia al aplastamiento de la madera y el momento de plastificación de los elementos de fijación.

El Reglamento [1] se basa en el formato de tensiones admisibles, criterio de diseño que se corresponde con el adoptado por las reglas de las NDS [2] en su versión ASD. Las expresiones para obtener la capacidad portante admisible de cada elemento de fijación se basan en los modelos de

rotura mencionados, considerando doble o simple cortadura. Como se mencionó, la resistencia al aplastamiento constituye un insumo básico para esta determinación, y dado que en Argentina hay pocas publicaciones, entre las que podemos mencionar [5-8], que permitan proponer con un margen de seguridad razonable esta propiedad para las maderas provenientes de bosques implantados en Argentina, el Reglamento [1], en su tabla S.4.1.1-1, propone los valores de diseño de referencia para la resistencia al aplastamiento en función de la densidad específica anhidra, el diámetro de perno y la dirección de carga, basada en las NDS [2].

Los bosques implantados en Argentina cubren aproximadamente una superficie de 1,12 millones de hectáreas de las cuales el 64% está constituido por coníferas, fundamentalmente pino elliotti / taeda. La mayor concentración de bosques cultivados en Argentina se ubica en la Mesopotamia, conformada por las provincias de Misiones, Corrientes y Entre Ríos.

El objetivo de este trabajo es determinar la resistencia al aplastamiento en las direcciones paralela y perpendicular a la fibra, de acuerdo a la norma UNE-EN 383 [3], en madera de pino elliotti proveniente de la provincia de Misiones, Argentina, para clavijas de diámetro 5 mm, 7 mm, 8 mm y 10 mm; y compararlos con los valores de referencia propuestos en el Reglamento [1], a fin de confirmar su validez o eventualmente proponer su modificación.

2. Material y método

La madera utilizada para todos los ensayos fue pino elliotti proveniente de bosques implantados en la provincia de Misiones en Argentina. Se ensayaron probetas para 4 diámetros de perno y para las direcciones paralela y perpendicular a las fibras de acuerdo al siguiente detalle: perno de 5 mm (66 paralelas y 63 perpendiculares), perno de 7 mm (64 paralelas y 67 perpendiculares), perno de 8 mm (65 paralelas y 67 perpendiculares) y 8 mm (64 paralelas y 68 perpendiculares). La confección de las probetas y el procedimiento de ensayo se realizó de acuerdo a las prescripciones de la norma UNE-EN 383 (2007) [3]. La colocación de las clavijas se realiza con orificio pretaladrado con una holgura de 0,25 mm para cada diámetro. Para cada probeta se determinó la humedad y la densidad según las normas ISO 13061-1 (2014) [9] e ISO 13061-2 (2014) [10] respectivamente. Se ajustaron los valores de densidad a la humedad de referencia del 12%, de acuerdo a lo prescripto por la norma UNE-EN 384 (2016) [11].

Los valores de referencia de la resistencia al aplastamiento propuestos por el Reglamento [1] se determinaron con las siguientes expresiones:

Para diámetro de perno (D) menor a 6,35 mm y para ambas direcciones de carga.

$$F_e = 114,4 G^{1,14} \quad (1)$$

Para diámetro de perno (D) mayor o igual a 6,35 mm.

$$F_{e//} = 77,2 G \quad (2)$$

$$F_{e\perp} = 212 G^{1,45} / D^{0,5} \quad (3)$$

Donde: F_e : valor de referencia de la resistencia al aplastamiento para ambas direcciones [N/mm²]. $F_{e//}$: valor de referencia de la resistencia al aplastamiento en la dirección paralela a las fibras [N/mm²]. $F_{e\perp}$: valor de referencia de la resistencia al aplastamiento en la dirección perpendicular a las fibras [N/mm²]. G : valor característico (5%) de la gravedad específica anhidra [g/cm³]. D : diámetro del perno [mm].

3. Análisis de resultados

3.1. Resistencia al aplastamiento experimental

En la Tabla 1 se presentan los resultados de las determinaciones de la resistencia al aplastamiento y densidad para las direcciones paralela y perpendicular a las fibras respectivamente. Se observa que los valores de la densidad son similares para todos los diámetros con un coeficiente de variación del 13%, los mismos están ajustados a una humedad del 12% de acuerdo a las prescripciones de norma UNE-EN 384 [11]. La humedad promedio de las probetas resultó del 11,9% con valores oscilando entre 9,3% y 14,0%. Se observa para ambas direcciones un decrecimiento de la resistencia con el aumento del diámetro del perno. Para el diámetro de perno 5 mm la resistencia en la dirección perpendicular a las fibras resultó ser de un 90% de la resistencia en la dirección paralela y los análisis estadísticos indican que no hay diferencias significativas entre las muestras, esta igualdad no se verifica para los otros pernos. Este comportamiento está en línea con la propuesta del Reglamento [1], que para diámetros de perno menores a 6,35 mm establece el mismo valor de la resistencia para las dos direcciones.

Tabla 1: Resistencia al aplastamiento y densidad por diámetro de perno

D	Dirección paralela a las fibras				Dirección perpendicular a las fibras				Densidad		
	C	$f_{h,0.5}$	$f_{h,m}$	COV	C	$f_{h,0.5}$	$f_{h,m}$	COV	$\rho_{0.5}$	ρ_m	COV
mm	n	N/mm ²	N/mm ²	%	n	N/mm ²	N/mm ²	%	Kg/m ³	Kg/m ³	%
5	66	25,8	37,7	20	63	23,4	42,3	33	366	457	13
7	64	26,8	37,1	19	67	18,3	34,3	31	362	455	13
8	65	22,9	32,6	22	67	16,8	28,2	28	359	450	13
10	64	21,9	30,7	17	68	15,3	27,8	35	366	458	12
	259					265			364	455	13

D: diámetro del perno. C: cantidad de probetas. $f_{h,0.5}$: resistencia al aplastamiento percentil 5%. $f_{h,m}$: resistencia al aplastamiento media. $\rho_{0.5}$: densidad percentil 5%. ρ_m : densidad media. COV: coeficiente de variación. n: cantidad de probetas

El análisis de regresión lineal múltiple permitió determinar: a) la ecuación (4) para un modelo de predicción en la dirección paralela a las fibras con un R-cuadrada=71,6%, b) la ecuación (5) para la dirección perpendicular a las fibras y diámetro de perno menor o igual a 7 mm con un R-cuadrada=72,7% y c) la ecuación (6) para la dirección perpendicular a las fibras y diámetro de perno mayor 7 mm con un R-cuadrada=79,6%.

$$f_{h,0} = 3,76419 + 96,2259 \times \rho_{00} - 1,35004 \times D \quad (4)$$

$$f_{h,90}^{D \leq 7} = -21,8454 + 185,834 \times \rho_{00} - 3,04618 \times D \quad (5)$$

$$f_{h,90}^{7 < D < 10} = -16,9377 + 134,40 \times \rho_{00} - 1,34215 \times D \quad (6)$$

Donde: $f_{h,0}$ = resistencia al aplastamiento en la dirección paralela a las fibras [N/mm²]; $f_{h,90}^{D \leq 7}$ = resistencia al aplastamiento en la dirección perpendicular a las fibras y $D \leq 7$ mm [N/mm²]; $f_{h,90}^{7 < D < 10}$ = resistencia al aplastamiento en la dirección perpendicular a las fibras y $7 < D < 10$ mm [N/mm²]; ρ_{00} = densidad anhidra [g/cm³]; D = diámetro del perno [mm].

3.2. Análisis de la resistencia al aplastamiento propuesta en el reglamento inti-cirsoc (2016) [1]

El Reglamento [1] propone los valores de resistencia al aplastamiento para una duración de la carga de 10 años e indica un coeficiente $C_D=1,6$ a los efectos de relacionar esos valores con los obtenidos en ensayos de 10 minutos. La Tabla 2 presenta los valores de la resistencia al aplastamiento experimentales ajustados para una carga de 10 años, los valores determinados por las ecuaciones (4), (5) o (6), según corresponde, divididos por el mismo coeficiente C_D y los valores determinados por la expresión propuesta en la Tabla S.4.1.1-1. de los suplementos del Reglamento [1]. Del análisis de los valores para la dirección paralela a las fibras se aprecia que los determinados por la ecuación (4) oscilan entre el 91% y 111% de los experimentales, mientras que los propuestos en el Reglamento [1] oscilan entre el 95% y el 191%, con una diferencia superior en los pernos de mayor diámetro. Del análisis de los valores para la dirección perpendicular a las fibras se aprecia que los originados en la ecuación (5), para los diámetros de perno de 5 mm y 7 mm, se encuentran entre un 116% y 103 % respectivamente de los experimentales, mientras que los que propone el Reglamento [1], para los mismos diámetros, están en un 110% y un 142% respectivamente; para los diámetros de perno de 8 mm y 10 mm los determinados por la ecuación (6) son del 101 % y el 98% de los experimentales, mientras que los propuestos en el Reglamento [1] están en un 145% y un 141% respectivamente.

Tabla 2: Resistencia al aplastamiento, percentil 5%, por diámetro de perno. Comparación entre los valores experimentales, los determinados por las expresiones propuestas y los propuestos en el Reglamento INTI-CIRSOC (2016) [1]

D	Experimental (10 años)		Ecuaciones 4, 5 o 6 (10 años)			CIRSOC (10 años)	
	$f_{h,0}$	$f_{h,90}$	$f_{h,0}$ (4)	$f_{h,90}^{D \leq 7}$ (5)	$f_{h,90}^{7 < D < 10}$ (6)	$f_{h,0}$	$f_{h,90}$
mm	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
5	16,1	14,6	16,7 [104%]	16,9 [116%]		15,5 [95%]	16,1 [110%]
7	16,8	11,4	18,6 [111%]	11,8 [103%]		26,0 [155%]	16,3 [142%]
8	14,3	10,5	15,6 [109%]		10,6 [101%]	25,7 [180%]	15,2 [145%]
10	13,7	9,6	12,4 [91%]		9,4 [98%]	26,1 [191%]	13,5 [141%]

$f_{h,0}$: resistencia al aplastamiento paralelo a las fibras percentil 5%. $f_{h,90}$: resistencia al aplastamiento perpendicular a las fibras percentil 5%. [] valor porcentual respecto del valor experimental. D: diámetro del perno en mm. () número de ecuación utilizada.

4. Conclusiones

En cuanto a la resistencia al aplastamiento de la madera pino elliotti discutida precedentemente se puede arribar a las siguientes conclusiones:

- Para el diámetro de perno de 5 mm se puede considerar la misma resistencia al aplastamiento tanto para dirección paralela como para la perpendicular a las fibras.
- La ecuación (4) " $f_{h,0} = 3,76419 + 96,2259 \times \rho_{00} - 1,35004 \times D$ " permite determinar, con una diferencia máxima del 11%, el valor de la resistencia al aplastamiento, percentil 5%, para la dirección paralela a las fibras para los diámetros de perno de 5 mm, 7 mm, 8 mm y 10 mm, en función de la gravedad específica anhidra y el diámetro.
- La ecuación (5) " $f_{h,90}^{D \leq 7} = -21,8454 + 185,834 \times \rho_{00} - 3,04618 \times D$ " permite determinar, con una diferencia máxima del 16%, el valor de la resistencia al aplastamiento, percentil 5%, para la dirección perpendicular a las fibras para los diámetros de perno de 5 mm y 7 mm, en función de la gravedad específica anhidra y el diámetro.

- La ecuación (6) " $f_{h,90}^{7<D<10} = -16,9377 + 134,40 \times \rho_{00} - 1,34215 \times D$ " permite determinar, con una diferencia máxima del 2%, el valor de la resistencia al aplastamiento, percentil 5%, para la dirección perpendicular a las fibras para los diámetros de perno de 8 mm y 10 mm, en función de la gravedad específica anhidra y el diámetro.
- El Reglamento INTI-CIRSOC 601 (2016) [1] propone valores de resistencia al aplastamiento superiores a los obtenidos experimentalmente (hasta 91% superior para la dirección paralela a las fibras y perno de diámetro 10 mm y hasta 45% superior para la dirección perpendicular a las fibras y diámetro de perno 8). Esta diferencia se aprecia especialmente para los pernos de mayor diámetro.
- Se deberían realizar ensayos para más especies, diámetros y densidades a los efectos de validar o modificar la propuesta del Reglamento [1].

Referencias

- [1] INTI-CIRSOC (2016). Reglamento Argentino de Estructuras de Madera. Disposiciones generales y requisitos para el diseño y la construcción de estructuras de madera en edificaciones. Suplemento actualización 2020. Buenos Aires, Argentina.
- [2] NDS 2005. American Forest & Paper Association American Wood Council. National Design Specification (NDS) for Wood Construction with commentary and Supplement: Design Values for Wood Construction. 2005 Edition. Washington. (2005).
- [3] UNE-EN 383:2007. Agencia Española de Normalización y Certificación. Estructuras de madera. Métodos de ensayo. Determinación de la resistencia al aplastamiento y del módulo de aplastamiento para los elementos de fijación tipo clavija. (2007).
- [4] Johansen K.W. (1949) Theory of timber connections. International Association of Bridge and Structural Engineering. Publication 9: 249-262, Bern.
- [5] Guillaumet A.A., Manavella R.D; Filippetti M.C., Diab J. y Armas A. Tensiones de aplastamiento en uniones tipo clavija en madera de Araucaria Angustifolia .XXXIV Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural. San Juan. Argentina. (2010).
- [6] Manavella R.D., Guillaumet A.A., Filippetti M.C., Tortoriello M., Alí Mossre C. Resistencia al aplastamiento en madera de álamo. XXXVII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural. Asunción. Paraguay. (2016).
- [7] Manavella R.D., Guillaumet A.A., Filippetti María C., Tortoriello M. Determinación de la Resistencia al Aplastamiento en Madera de Álamo. XXXVI Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural. Montevideo. Uruguay. (2014).
- [8] Sosa Zitto Alexandra. Tesis doctoral (2015). "Comportamiento resistente y elástico de uniones construidas con elementos de fijación de acero tipo clavija en piezas aserradas de Eucalyptus grandis cultivado en Argentina".
- [9] ISO 13061-1. 2014. Physical and mechanical properties of wood – Test methods for small clear wood specimens. Determination of moisture content for physical and mechanical tests. International Organization for Standardization.
- [10] ISO 13061-2. 2014. Physical and mechanical properties of wood – Test methods for small clear wood specimens. Determination of density for physical and mechanical tests. International Organization for Standardization
- [11] UNE-EN 384:2016. Agencia Española de Normalización y Certificación. Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad. (2010).

1148

RESPUESTA DE LA ADHESIÓN AL ENCOLADO EN VERDE UTILIZANDO ESPECIES DE *NOTHOFAGUS* CRECIDAS EN CHILE

Víctor Rosales Garcés¹; Gonzalo Rodríguez-Grau²; Claudio Montero¹; Carlos Galarce²; Claudia Alvarado³; Régis Pommier⁴; Lisa Muñoz⁵

¹ Universidad del Bío-Bío

² Pontificia Universidad Católica de Chile

³ Centro de Investigación y Desarrollo en Ciencias Aeroespaciales;

⁴ Université de Bordeaux

⁵ Pontificia Universidad Católica de Valparaíso

Palabras clave / Palavras-chave:

Green gluing; Cizalle en línea de cola; Delaminación en línea de cola; Valorización de especies

Resumen / Resumo:

La valoración y protección de los bosques nativos en Chile requiere de un plan de gestión y creación de productos que permita el uso responsable del recurso. El empleo de la técnica de encolado en verde podría aportar a la recuperación de madera en zonas en que el recurso se encuentra disponible y que actualmente se utiliza en productos de bajo valor agregado, menos beneficiosos para la comunidad y el medio ambiente. Este trabajo investigó la respuesta de la adhesión en bilaminados encolados con madera húmeda, en tres tipos de *Nothofagus* crecidos en Chile, y con la utilización de un adhesivo de poliuretano monocomponente. Los indicadores de calidad de adhesión, medidos a través de pruebas de cizalle y delaminación en la línea de cola, mostraron resultados satisfactorios, pero también establecen interrogantes sobre los estándares utilizados para este tipo de maderas en el mundo.

1. Introducción

El uso productivo de madera proveniente de bosques nativos en Chile es actualmente marginal en términos de exportaciones, pero de gran importancia en cuanto a la producción de madera y uso local [1]. En Chile el consumo de madera nativa ha mostrado una disminución sostenida desde 1994 a la fecha pasando de 4 MM de m³ a 0.5 MM de m³ [1]. En particular, la utilización de las especies *Nothofagus alpina* (Raulí), *Nothofagus obliqua* (Roble) y *Nothofagus dombeyi* (Coigüe) tienen un interés particular, dada por su localización y disponibilidad; y en los próximos años es probable que la presión sobre los bosques aumente aún más, existiendo fuerzas políticas e industriales que abogan por que los bosques desempeñen un rol preponderante hacia una economía ecológica o de base biológica, basada en recursos renovables [2].

La técnica de encolado en verde es un método donde la madera aserrada es utilizada con un contenido de humedad no habitual para el empleo de adhesivos [3], quiere decir, que la fabricación de madera laminada encolada se utilizan piezas de madera con un alto contenido de humedad (o madera verde), y un adhesivo capaz de asegurar un desempeño de sus uniones encoladas adecuado a los niveles de humedad presentes en las piezas [4], normalmente del tipo poliuretano (PU). Lissouck et al (2022), utilizaron un PU mono componente en 8 especies de madera dura de la cuenca del Congo y evaluaron su resistencia, encontrando que la tendencia de falla de la madera estuvo de acuerdo con varios requisitos internacionales [5].

Es por lo anterior, que se propone explorar el uso de la técnica de encolado en verde, para ser utilizada en especies nativas crecidas en Chile, de manera de potenciar su valor como elemento constructivo y revertir su empleo inadecuado. Para evaluar la técnica de encolado en verde se realizaron pruebas de cizalle y delaminación sobre muestras de piezas bilaminadas, encoladas en verde utilizando un adhesivo PU de un componente, manteniendo constantes los parámetros de manufactura y encolado, para de esta forma, evaluar la factibilidad de emplear esta técnica para las especies de *Nothofagus* crecidas en Chile.

2. Materiales y método

Se utilizó maderas provenientes de dos productores locales Maderas Nalcahue y Maderas Martini, ubicados en la región de la Araucanía, Chile. El rango de humedad estudiado se encontró entre 21.0 y 28.9 %.

2.1. Obtención de propiedades físicas

A las piezas de madera se le extrajeron muestras para determinar el contenido de humedad, densidad de referencia y densidad anhidra (ver Figura 1), según los procedimientos estipulados por la norma chilena NCh176/1: Of2003. (Madera - Parte 1: Determinación del contenido de humedad) y la norma NCh176/2. Of86. Modificada 1988 (Madera - Parte 2: Determinación de la densidad). Las muestras fueron obtenidas mediante cortes efectuados con una sierra escuadradora marca SCM. Las mediciones fueron efectuadas con pie de metro digital marca Mitutoyo de precisión 0,01 mm, la masa con una balanza de precisión 0,01 g marca Drawell y las muestras fueron llevadas a estado anhidro en horno de secado marca Drawell a $103 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ por 24 h. y posteriormente vueltas a medir y pesar.

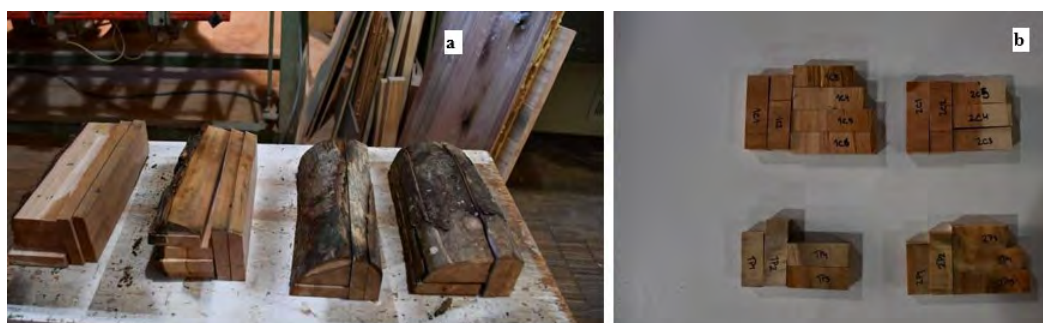


Figura 1. Maderas empleadas (a), codificación y extracción probetas para determinación densidad anhidra (b)

2.2.Confección de los bilaminados

Las piezas de madera aserrada fueron trabajadas superficialmente y formateadas empleando máquinas de carpintería tradicional. Se obtuvieron piezas de 20 mm x 120 mm x 300 mm, las que fueron encoladas por una cara, con adhesivo del tipo Poliuretano Mono-Componente de la marca JOWAT. El gramaje empleado fue de 150 g/m² y luego prensados en prensa por 3 horas. Esto permitió confeccionar bilaminados de 40 x 120 x 300 mm, los cuales fueron dejados en reposo fuera de prensa por 48 h. Las condiciones ambientales de los procesos de encolado, prensado y reposo fueron de 16 ± 3 °C y de 55 ± 5 % de humedad relativa, las que se monitorearon con termómetro e higrómetro disponibles en los laboratorios de la Universidad del Bío-Bío.

2.3.Evaluaciones de conformidad

De cada laminado se extrajeron probetas para posterior evaluación de la delaminación y cizalle en línea de cola según las recomendaciones de la norma NCh 2148:2013 [6], extraída desde la ISO 12580/2007 [7], la cual indica que las probetas de delaminación deben ser del ancho y espesor del bilaminado y de largo 75 mm, a una distancia mínima de 50 mm desde el extremo. Para la delaminación, el primer paso fue determinar la masa de las muestras inicial en una balanza marca Drawell de precisión de 0,01 g., después se realizó una medición inicial en las líneas de encolado en ambos extremos. Luego se ingresaron en un cilindro de vacío-presión donde se saturaron en agua y aplicó ciclo de vacío a 65 KPa por 0.5 h y de presión a 650 KPa por 2 h. El siguiente paso fue secarlas en estufa a 65°C por 15 h o hasta alcanzar una masa entre el 100 a 115% de la masa inicial. Una vez finalizado el tratamiento, se midió la delaminación, la cual consistió en medir aberturas detectadas en las líneas de encolado y luego aplicar la siguiente relación (1).

$$total\ delamination = \frac{l_{tot,delam}}{l_{tot,glueline}} \times 100 \quad (1)$$

Donde $l_{tot,delam}$: Longitud de la delaminación presente en los extremos del bilaminados (mm), $l_{tot,glueline}$: Longitud de las líneas de cola antes del ciclo de vacío-presión (mm).

Para efectuar los ensayos de cizalle, todas las muestras fueron medidas con un pie de metro (precisión de 0,01 mm) en el área de corte. Después fueron ensayadas en una máquina universal de ensayos marca INSTRON (modelo 4468, Instron Corp., Canton, USA) equipada con una celda de carga de 50 KN y equipado con el correspondiente dispositivo de cizalle. Se aplicó una carga en compresión a una velocidad constante de 0.6 mm/min, hasta producir el corte de la cada muestra, la cual correspondió a la carga máxima expresada en KN. Para calcular la resistencia en cizalle de la línea de cola de cada muestra (f_s), expresada en N/mm² se utilizó la ecuación (2).

$$f_s = \frac{F_u}{A} \quad (2)$$

Donde F_u : Carga máxima de rotura (N) y A: Área de corte (mm²), (A = largo x ancho de la probeta).

3. Resultados

3.1.Valores de cizalle

Los valores alcanzados en los test mecánicos de cizalle, sobre piezas encoladas en verde y luego acondicionadas al 12 % de contenido de humedad para el ensayo, arrojaron que los mejores resultados se consiguen en la especie *Nothofagus alpina*, tal como se muestra en la Figura 2, con un valor promedio de 6.82 N/mm², utilizando un rango de contenido de humedad para el encolado de 21 a 28.9 %, alcanzándose una tasa de éxito sobre el valor contemplado en el estándar del 58 %. Si el valor del contenido de humedad de encolado fue inferior al 24%, la tasa de éxito sobre el valor contemplado en el estándar aumentó al 77,8 % de las muestras, obteniéndose un valor promedio de 7.42 N/mm². Las otras especies no alcanzan el valor mínimo exigido por la norma.

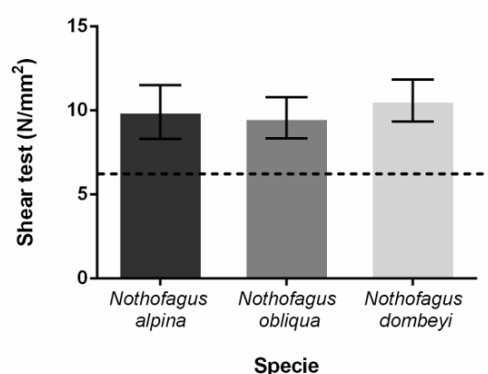


Figura 2. Valores de cizalle para distintas especies encoladas en verde, línea roja representa estándar mínimo exigido NCh2148.

3.2.Valores de delaminación

Los resultados indican que todas las especie de *Nothofagus* presentarán problemas con la delaminación, para el mismo rango de contenido de humedad utilizado en el encolado en verde (21.0 a 28.9 %). Por su parte, la especie *Nothofagus dombeyi* (Coigüe) alcanzó el mejor desempeño en esta prueba, con un 11.22 % de delaminación, cuando el proceso de encolado se contrasta al realizarlo en seco (12% de contenido de humedad), tal como se muestra en la Figura 3.

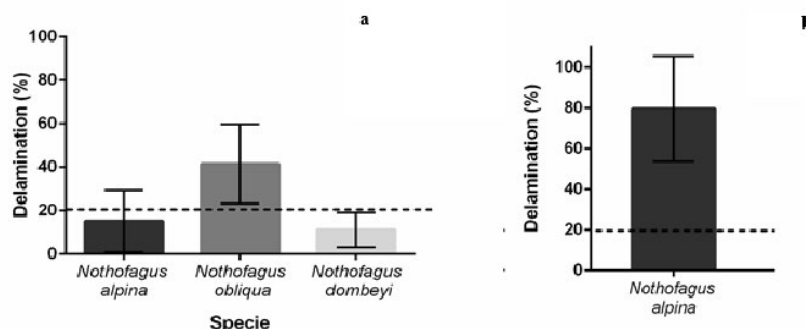


Figura 3. Valores para distintas especies encoladas en seco (12% CH) (a), Valor obtenido para encolado en verde (b)

4. Conclusiones

El encolado en verde es una técnica prometedora para aumentar el valor de las especies de madera evaluadas, y permitir su uso, en ciertas condiciones, con un mínimo consumo de energía para lograr su secado. A pesar de que las especies de *Nothofagus* crecidas en Chile, poseen excelentes propiedades mecánicas, estas no se encuentran disponibles en el tamaño requerido y a un precio hoy competitivo, por lo que el desarrollo de esta técnica podría incrementar su utilización, disminuyendo su uso alternativo como combustible.

Agradecimientos

Este trabajo fue apoyado por la Universidad del Bío-Bío y la Pontificia Universidad Católica de Chile, a través del proyecto FONDEF IDEA código Id21i10241. Los autores también agradecen al proyecto ANID BASAL FB210015 por la colaboración científica.

Referencias

- [1] Rodríguez-Grau, G.; Pinto-González, F.; Cortés-Rodríguez, P.; Marín-Urbe, C. Native Wood Revaluation through Green Gluing: A Systematic Review. *World Conference on Timber Engineering 2021, WCTE 2021* **2021**.
- [2] Jeannette Eggers, Johanna Lundström, Tord Snäll & Karin Öhman (2022) Balancing wood production and biodiversity in intensively managed boreal forest, *Scandinavian Journal of Forest Research*, 37:3, 213-225.
- [3] Sterley, M. Green Gluing of Wood, KTH- Royal Institute of Technology, Stockholm, 2004.
- [4] Rodríguez-Grau, G.; Marín-Urbe, C.; Cortés-Rodríguez, P.; Montero, C.; Rosales, V.; Galarce, C. Bibliometric Analysis of the Green Gluing Technique (2000–2020): Trends and Perspectives. *Forests* 2022, 13, 1714. <https://doi.org/10.3390/f13101714>
- [5] Oum Lissouck R.; Ngono Mvondo R.; Ateba F.; Pommier R. (2022) Investigation of green-glued laminated timber from the Congo Basin: durability, mechanical strength and variability trends of the bondlines, *Southern Forests: a Journal of Forest Science*, 84:3, 225-241, DOI: 10.2989/20702620.2022.2045881
- [6] Instituto Nacional de Normalización Madera Laminada Encolada Estructural - Requisitos, Métodos de Muestreo 462 e Inspección (NCh 2148). 2013
- [7] ISO 12580:2007 Timber Structures — Glued Laminated Timber — Methods of Test for Glue-Line Delamination. 2007.

1149

RESPUESTA DINÁMICA DE LA PASARELA DE MADERA DE 270 M SOBRE EL RIO GUADALHORCE

Álvaro Magdaleno González¹; Juan José Villacorta Calvo¹; Álvaro Iglesias Pordomingo¹; Guillermo Fernández Ordóñez¹; Julio Vivas²; Antolín Lorenzana Iban¹

¹ Universidad de Valladolid

² Media Madera Ingenieros

Palabras clave / Palavras-chave:

Tránsito peatonal, Análisis modal, Evaluación de la aptitud al servicio frente a vibraciones

Resumen / Resumo:

Esta comunicación muestra la metodología que se ha seguido para identificar dinámicamente una pasarela peatonal de 270 m de longitud, 3 m de ancho y siete vanos, así como la evaluación del estado límite de servicio respecto a las vibraciones debidas al tránsito peatonal. Construida por Media Madera Ingenieros Consultores S.L., es el principal hito estructural de la Senda Litoral de Málaga, a su paso por el Paraje Natural de la Desembocadura del Guadalhorce. Además de la cimentación compuesta por 8 soportes de hormigón armado, la estructura emplea 215 toneladas de madera *glulam* de pino silvestre de procedencia escandinava y casi 15 t de acero inoxidable, todo ello adecuado para ambiente marino donde se emplaza. Tras su puesta en servicio, a principios del 2020, se realizaron ensayos dinámicos para estimar las propiedades modales. La campaña se complementó con tránsitos coincidentes con alguno los modos excitables por un peatón andando o corriendo. Por debajo de 3.7 Hz la estructura presenta 5 modos de flexión y de torsión, todos ellos con amortiguamientos superiores al 1.5%. Tras los tránsitos resonantes de un solo peatón se consiguen valores de aceleración pico del orden de 1.0 m/s², con valores eficaces máximos inferiores a 0.60 m/s², pudiéndose concluir que la estructura es plenamente funcional para su uso previsto (zonas verdes).

1. Introducción

Las pasarelas peatonales, como cualquier otra estructura de construcción civil, arquitectónica o residencial, deben satisfacer una serie de criterios descritos en las normativas [1], incluyendo estados límite últimos y de servicio, así como condicionantes medioambientales y estéticos. Aunque el dimensionamiento viene generalmente marcado por criterios de seguridad, también se deben cumplir los condicionantes de comodidad, en su mayoría relacionados con valores de aceleración de las vibraciones bajo condiciones de uso, evaluados con distintas metodologías e indicadores descritos en múltiples normativas [2, 3 y 4]. Cuando tanto el comportamiento del material, de los elementos estructurales y de sus uniones, está bien definido, el cumplimiento de los criterios se puede asegurar mediante técnicas computacionales (simulación). Este es generalmente el caso de estructuras bajo comportamiento predominantemente estático donde, para muchas comprobaciones, las cargas dinámicas pueden simplificarse considerando las cuasiestáticas equivalentes.

Sin embargo, cuando el comportamiento no está tan bien definido (caso de las estructuras de madera, sus herrajes y su interacción con la cimentación) o las cargas son predominantemente dinámicas (caso del tránsito peatonal), la evaluación por simulación presenta múltiples deficiencias, principalmente debidas al desconocimiento del coeficiente de amortiguamiento a emplear. A esto se añade la posible dependencia de algunas propiedades con factores ambientales tales como humedad y temperatura, así como condiciones de montaje y mantenimiento. Por todo ello, tras el dimensionamiento y comprobación por simulación en base a parámetros estimados, se hace necesario comprobar, tras la instalación, que esas estimaciones son correctas o al menos conservadoras. Para ello se realizan ensayos dinámicos (no destructivos) como los descritos en esta comunicación. Con ellos, además de verificar el cumplimiento de las condiciones de servicio respecto a vibraciones, se obtienen parámetros valiosos en base a los cuales poder calibrar el modelo computacional. De esta manera se podría simular la respuesta de la estructura, para cada temperatura y humedad, ante condiciones difícilmente ensayables como cargas sísmicas o condiciones de alta ocupación peatonal.

2. Descripción de la estructura

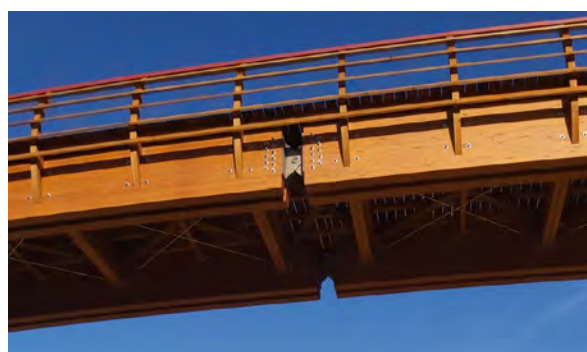
En la pasarela, diseñada, construida e instalada por Media Madera Ingenieros Consultores, se identifican (figura 1) siete vanos simétricos, destacando el central, sobre el río, de 66 m, siendo los laterales, secuencialmente, de 55, 31 y 15 m. Además de los dos estribos en los extremos, se apoya en seis pilas intermedias de distintas alturas, cimentadas en el lecho aluvial. En su estética destacan las formas curvas de los arcos principales y su barandilla envolvente de formas redondeadas. Las uniones entre los arcos y los soportes son articuladas (figura 2.a) y los arcos de mayores dimensiones están divididos en dos mitades que se montan también mediante articulaciones (figura 2.b). El uso de madera tratada en autoclave con sales hidrosolubles y los herrajes de acero inoxidable garantizan una larga vida útil con un mínimo de mantenimiento. Es un proyecto único en Europa dentro de su tipología, resultando un conjunto estructural tan llamativo como respetuoso con el medioambiente y perfectamente integrado en el emplazamiento.



Figura. 1. Pasarela en el Paraje Natural de la desembocadura del río Guadalhorce.



(a)



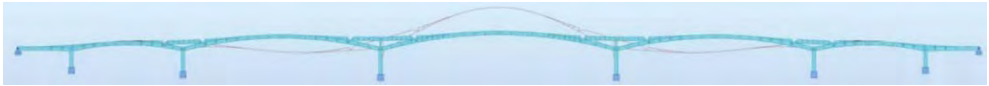
(b)

Figura. 2. Detalles de las uniones articuladas: (a) a las pilas y (b) entre partes del arco..

3. Campaña experimental e identificación modal

En marzo de 2020 se hicieron los ensayos adecuados para obtener experimentalmente los valores recogidos en la tabla 1. Corresponden a modos de flexión vertical (los cuatro primeros) y de torsión (el quinto). No se aprecian, de forma significativa, modos laterales o de flexión combinada con torsión. Se indica no solo el valor de la frecuencia y su forma modal sino también el correspondiente valor del factor de amortiguamiento respecto al crítico.

Tabla 1. Frecuencias, amortiguamientos y formas modales.

[Hz]	ζ [%]	Forma modal
1.263	2.737	
1.624	2.046	
2.238	1.653	
2.800	1.585	
3.622	1.605	

4. Evaluación del estado límite de servicio respecto a vibraciones

Adicionalmente se realizaron pruebas de tránsito resonante para evaluar la aptitud al servicio respecto a vibraciones. Para ello, la forma habitual de proceder es andar o correr precisamente a las frecuencias identificadas en la tabla anterior. Los tránsitos los hace con un peatón de 90 kg entrenado que recorre la pasarela, bien por su parte central (pudiéndose excitar los modos de flexión) o por uno de los laterales (para tratar de excitar los de torsión). Se transita a frecuencias de paso coincidentes con todos los modos. Se muestran en la figura 3 distintos registros temporales para el tránsito pésimo, correspondiente a la ida y vuelta del peatón corriendo por uno de los laterales a 217 pasos por minuto, tratando de excitar el modo de torsión. Al no superar valores pico del orden de 1.0 m/s^2 ni eficaces (MTVV) de 0.60 m/s^2 , se considera que la pasarela cumple los requisitos de comodidad para su uso previsto (entorno turístico o zona verde).

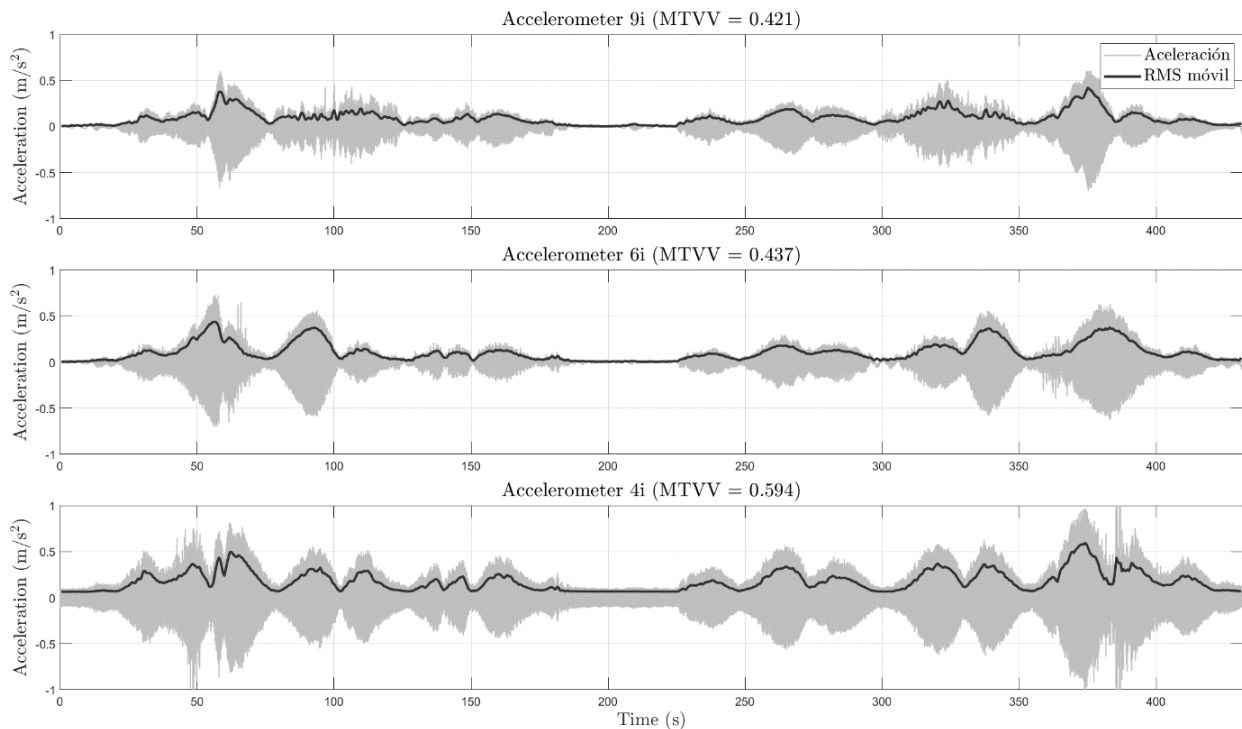


Figura. 3. Respuestas temporales: ida y vuelta corriendo a 3.622 Hz (217 ppm)

5. Conclusiones

Se ha demostrado que para estructuras esbeltas y mediante equipos portátiles, fácilmente transportables por dos personas, se puede llevar a cabo de forma satisfactoria tanto la identificación modal como la evaluación del estado límite de servicio respecto a vibraciones. Para la pasarela bajo estudio, mediante técnicas de análisis modal experimental y con la instrumentación indicada, se han identificado 4 modos de flexión vertical y uno de torsión en el rango excitable por los peatones. Tratando de excitar todos ellos mediante tránsitos de un solo peatón se consiguen respuestas estructurales de tan solo 1 m/s^2 (valor pico) o 0.6 m/s^2 (MTVV), concluyéndose que la pasarela está dentro de los límites de comodidad para su uso previsto. Durante todos los tránsitos realizados, tanto a ritmos de paso coincidentes con los modos identificados como mediante marchas sin ritmo definido (tránsito peatonal aleatorio) no se han registrado aceleraciones laterales que evidencien una respuesta transversal significativa, pudiéndose concluir que estos posibles modos laterales están alejados del rango frecuencial de la excitación peatonal.

Como conclusión adicional, destacar la adecuación de la madera como material de construcción para este tipo de infraestructuras de gran envergadura, consiguiendo satisfacer los requerimientos normativos junto a otras consideraciones valorables como son aquellas de tipo medioambiental y estético.

Agradecimientos

The authors wish to acknowledge to the AEI, Spanish Government (10.13039/501100011033), and to “ERDF A way of making Europe”, for the partial support through the grant PID2022-140117NB-I00.

Referencias

- [1] UNE-EN 1995-2:2010. Eurocódigo 5: Proyecto de estructuras de madera. Parte 2: Puentes. AENOR, 2010.
- [2] ISO. "Mechanical vibration and shock. Evaluation of human exposure to whole-body vibration. I: General requirements." ISO 2631-1, AENOR, Madrid, Spain, 1997.
- [3] International Standard ISO 10137: 2007(E), Bases of for design of structures - Serviceability of buildings and walkways against vibrations. ISO 10137:2007, International Organization for Standardization, 2007.
- [4] SETRA. Technical guide - footbridges - Assessment of vibrational behavior of footbridges under pedestrian loading, Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes, 2006.
- [5] D. J. Ewins, Modal testing : theory, practice, and application. Research Studies Press, 2000.
- [6] N. M. M. Maia and J. M. M. Silva, Theoretical and Experimental Modal Analysis. Research Studies Press, 1997.
- [7] E. Shahabpoor, A. Pavic, V. Racic, and S. Zivanovic. Effect of group walking traffic on dynamic properties of pedestrian structures. *Journal of Sound and Vibration*, 387:207–225, 2017.
- [8] J. Sebastian, I. M. Diaz, C. M. Casado, A. V. Poncela, and A. Lorenzana. Evaluación de la predicción de aceleraciones debidas al tránsito peatonal en una pasarela en servicio. *Informes de la Construcción*, 65(531):335–348, 2013.

1150

ROBINIA PSEUDOACACIA “ACACIA BLANCA”: PROPIEDADES MECÁNICAS DE SU MADERA

Ana Clara Cobas¹; Miguel Tortoriello¹; Patricio Arrien¹

¹ Laboratorio de Ensayos Materiales y Estructuras-Sede Junín (LEMEJ) - Universidad Nacional Noroeste Buenos Aires (UNNOBA) – Argentina

Palabras clave / Palavras-chave:

Compresión paralela, Dureza, Flexión estática, Madera aserrada, Probetas

Resumen / Resumo:

En Argentina, en la subregión de la Pampa Deprimida se verifican crecimientos aceptables de distintas especies de eucaliptos y acacia blanca formando pequeños montes de abrigo. Sin embargo, esta estructura de forestaciones de la región no ofrece las maderas que demanda el mercado en relación a la construcción, a la industria del mueble y del debobinado, cubriéndose ésta con madera proveniente del noreste del país. El desabastecimiento de maderas de calidad y al aumento de precio de las maderas de esta zona posibilitan la búsqueda de nuevas fuentes de abastecimiento, fomentando el estudio de especies que no han sido consideradas comerciales hasta el presente. De manera informal la madera de *Robinia pseudoacacia* (acacia blanca) se usa en construcciones rurales y carpintería de obra dando buenos resultados, sin embargo, no participa en la oferta del mercado local debido a la falta de superficie y manejo en sus plantaciones. Por tal motivo su revalorización tecnológica podría permitir su integración como madera redonda y aserrada sustituyendo, en algunas aplicaciones, a la madera de pino y de eucalipto impregnados que se utiliza actualmente. El objetivo de este trabajo fue estudiar algunas de las propiedades mecánicas (relacionadas a la calidad) de la madera de acacia blanca, de manera de considerar su utilización en productos de mayor valor e incentivar su plantación y comercialización. Para ello, se seleccionaron 10 árboles de *Robinia pseudoacacia* con edades comprendidas entre 7-15 años en un monte de reparo, sin manejo silvícola, ubicado en el establecimiento Lanfranchi, Chivilcoy, provincia de Buenos Aires, Argentina (35° 0' 44" S; 59° 38' 95" O). Los datos epidométricos de los ejemplares fueron presentados en un trabajo anterior. Se procesaron las probetas de pequeñas dimensiones y libre de defectos para los ensayos mecánicos (sin diferenciación entre madera interna y externa, ni albura y duramen). Los procedimientos de ensayo se ajustaron a las normas IRAM y ASTM. Para los ensayos de flexión se usaron 40 probetas libres de defectos de 2 cm x 2 cm x 34 cm, para los ensayos de compresión paralela a la fibra se utilizaron 40 probetas de 5 cm x 5 cm x 20 cm, mientras que para la determinación de dureza Brinell se usaron 40 probetas cuyas dimensiones fueron 2 cm x 2 cm x 10 cm. Todas las probetas fueron previamente cepilladas y estacionadas. Los ensayos se realizaron en una máquina universal Baldwin de 300 kN de capacidad. Se obtuvieron los valores estadísticos descriptivos básicos para las variables evaluadas (media, desvío estándar y el coeficiente de variación). Como resultado se obtuvo que el ensayo de flexión arrojó valores de 154,80 N/mm² (MOR) y 10.390,29 N/mm² (MOE). El ensayo de compresión paralela a las fibras presentó valores de 5.878,68 N/mm² (MOE) y 66,82 N/mm² (MOR). De acuerdo a los valores de dureza Brinell (8,86 HB) se la puede considerar una madera dura y estable. Los valores obtenidos en todos los ensayos son comparables con los datos reportados para las especies comerciales más difundidas en Argentina. Por lo tanto estos resultados permitirían considerarla apta para utilizarla como madera redonda y/o madera aserrada.

1151

SECADO BAJO VACIO CON CALENTAMIENTO POR RADIOFRECUENCIA DE MADERA JUVENIL DE EUCALYPTUS NITENS PROVENIENTE DE PLANTACIONES EN CHILE

Rubén A. Ananías¹; Linette Salvo-Sepulveda¹; Víctor Sepulveda-Villaruel¹; Natalia Perez-Peña¹; Carlos Salinas-Lira¹

¹ Universidad del Bío-Bío

Palabras clave / Palavras-chave:

Calidad del secado, Colapso, Contenido de humedad, Contracción, Curvas de secado, Maderas duras

Resumen / Resumo:

Las plantaciones de *Eucalyptus nitens* representan un poco más del 12% del total de plantaciones forestales en Chile, siendo una importante fuente de recurso principalmente para la industria celulósica. El bajo índice de calidad de la madera obtenida con las tecnologías de secado utilizadas actualmente, ha limitado el desarrollo de productos de mayor valor agregado, evidenciando una brecha tecnológica en secado para la industria del aserrío, remanufactura y construcción. En este contexto, este trabajo tuvo como objetivo estudiar el secado bajo vacío con calentamiento por radiofrecuencia, de madera juvenil de *Eucalyptus nitens*. La madera se obtuvo de árboles cosechados en plantaciones creciendo en el sector Rucamanque (Región de Ñuble, Chile). La madera aserrada fue obtenida mediante cortes paralelos resultando principalmente madera en corte tangencial con escuadrías en 26 y 50 mm de espesor, 160 mm de ancho y 3100 mm de largo. Para el secado bajo vacío con calentamiento por radiofrecuencia de la madera, se utilizó un equipo semi-industrial de 3 m³. Se recuperó el colapso mediante reacondicionado con vapor en un horno convectivo flexible de 3m³. Se construyeron las curvas de secado, se evaluó la contracción, el colapso y la calidad de la madera seca en base a estándares normalizados. Se observó la factibilidad técnica del secado bajo vacío con calentamiento por radiofrecuencia de madera aserrada proveniente de plantaciones de *Eucalyptus nitens* creciendo en Chile. Sugiriendo que la brecha tecnológica fue dable de reducir mediante el secado RFV, favoreciendo el uso de *Eucalyptus nitens* en la industria del aserrío, la remanufactura y construcción.

1. Introducción

El *Eucalyptus nitens* en Chile cubre una superficie de 285.974 ha, lo que corresponde aproximadamente a un 12% de la superficie total de plantaciones. Cerca del 94% de este recurso es destinado a la producción de pulpa celulósica y astillas [1]. Ciertos esfuerzos se han estado desarrollando para incorporar esta especie a la industria del aserrío, remanufactura y construcción, siendo el secado una brecha tecnológica a reducir [2, 3, 4].

El secado de la madera es un proceso térmico importante para agregar valor y fabricar productos innovadores. Las maderas duras son intrínsecamente difíciles de secar, debido a la propensión natural al agrietamiento superficial e interno, el colapso, lo que condiciona una baja recuperación de la madera después del secado.

En los procesos tradicionales de calentamiento y secado convencional, la transferencia de calor está predominantemente limitada debido al suministro de calor desde la superficie del producto a su centro. Por lo tanto, las regiones de calentamiento o secado más lentas se encuentran en el centro de la madera, lo que conduce a un recalentamiento excesivo de las regiones superficiales [5]. En cambio, las ondas electromagnéticas de radiofrecuencia (RF) calientan volumétricamente desde el interior a la superficie, dependiendo la intensidad del calentamiento tanto del contenido de humedad de la madera como de la densidad de potencia. Además, el movimiento interno de humedad depende de la permeabilidad de la madera y la presión de vapor al interior de la madera [6, 7].

Diversos autores demuestran que el secado bajo vacío con calentamiento por radiofrecuencia (RFV) es una alternativa viable para el secado de eucalipto y otras maderas duras [4, 8, 9, 10]. Tales autores coinciden en que el secado RFV disminuye los tiempos de secado y se relaciona con una menor ocurrencia de grietas y colapso, mejorando la calidad del producto final.

En esta línea, este trabajo tiene como objetivo explorar el secado RFV de madera aserrada de *Eucalyptus nitens* en 26 y 50 mm de espesor provenientes de plantaciones creciendo en Chile.

2. Metodología

2.1. Material y equipos

La madera en trozas fue recogida a partir de árboles cosechados en plantaciones de *Eucalyptus nitens* de 15 años, creciendo en el sector Rucamanqui (Región de Ñuble, Yungay, Chile). Las trozas fueron aserradas en cortes paralelos y convertidas en piezas de madera aserrada mayoritariamente en corte tangencial y dimensionadas a 26 y 50 mm de espesor, 160 mm de ancho y 3100 mm de largo.

Las piezas de madera aserrada fueron inmediatamente empaquetadas cubiertas con polietileno para limitar su agrietamiento y colapso. Luego fueron almacenadas bajo cobertizo a la espera de su turno de secado. Para el secado se utilizó un equipo RFV de 3 m³ de capacidad. Para el reacondicionado se usó un horno convectivo flexible de 3 m³ de capacidad.

2.2. Procedimientos

Se determinó el contenido de humedad (CH) inicial en base al método de secado en estufa según especificaciones de la norma chilena NCh176/1 [11]. Se evaluó la evolución temporal de la humedad durante el secado RFV, en base a la pérdida de la masa de madera de toda la carga registrada en el sistema de adquisición de datos del secador. La madera fue secada a un contenido de humedad final objetivo de 10%.

La humedad final fue determinada utilizando un aparato resistivo de acuerdo a la norma chilena NCh176/1 [11]. Se estimó la calidad de la madera en base al contenido de humedad objetivo en

concordancia a la norma europea UNE-EN14298 [12] y los criterios de evaluación especificados por la norma europea UNE-CEN/TS12169 [13].

Se midió el colapso a 18% de contenido de humedad mediante reacondicionado de la madera con vapor usando el horno convectivo flexible. La contracción fue medida al final del secado RFV en base a la norma chilena NCh176/3 [14].

3. Resultados & discusion

3.1. Curvas de secado

Las curvas de secado RFV de la madera de *Eucalyptus nitens* en 26 mm y 50 mm de espesor se presentan en la Figura 1. Para el espesor de 26 mm y con un CH inicial de 73,8% y un CH final de 11,1%, la duración del secado RFV fue de 6,3 días, lo que significa una tasa de secado promedio de 9,9 (%/día). Para un espesor de 50 mm, la duración del secado RFV fue de 30 días desde un CH inicial de 140% hasta un CH final de 11,4%, resultando una tasa de secado promedio de 4.3 (%/día). Otros autores, obtuvieron una tasa de secado entre 5,9 y 9,5 (%/día) durante el secado RFV de *Eucalyptus globulus* de 32 mm de espesor [9].

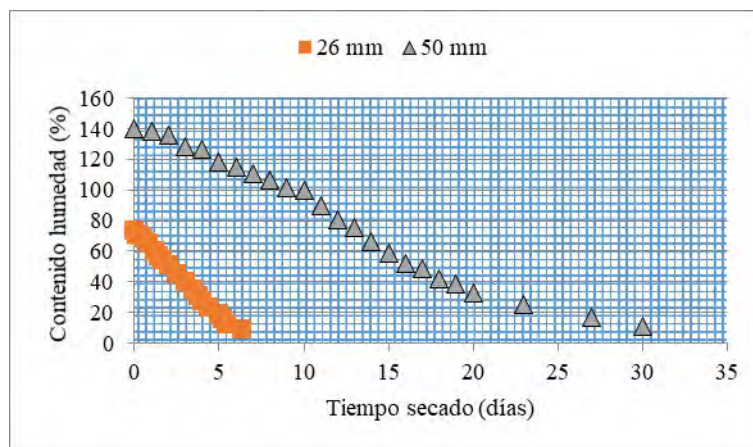


Figura 1. Curvas secado RFV *Eucalyptus nitens*.

3.2. Contraccion y colapso

La magnitud de la contracción y el colapso, en espesor y ancho, se muestra en la Tabla 1. Se observa que en ambas escuadrías la contracción y el colapso resultan de mayor magnitud en el ancho, lo cual es consistente con el tipo de corte de la madera. Igualmente la contracción y el colapso volumétrico son mayores en 50 mm de espesor. El comportamiento del colapso estaría asociado al efecto de la baja temperatura de secado RFV en adición al efecto de la presión de vapor interna [9]. El coeficiente de contracción unitario (C_u) y el punto de intersección de la contracción (PIC), se encuentran en el orden de magnitud reportado en la literatura para la especie [15].

Tabla 1. Contracción y colapso.

Espesor (mm)	Contracción a CH=17%				Colapso		Contracción a CH=11%		Cu		PIC	
	(%)											
	Espesor		Ancho		(%)		(%)		(/)		(%)	
	AR	DR	AR	DR	Espesor	Ancho	Espesor	Ancho	Espesor	Ancho	Espesor	Ancho
26	6,0 (1,3)	2,4 (1,5)	9,9 (2,1)	3,7 (1,9)	3,6 (2,2)	6,2 (2,6)	3,6 (1,6)	5,7 (1,7)	0,20 (0,02)	0,33 (0,03)	29,0 (2,5)	28,1 (2,7)
50	7,3 (1,3)	3,0 (1,6)	10,4 (1,3)	4,0 (1,7)	4,3 (1,8)	6,4 (2,0)	4,4 (1,8)	6,1 (1,8)	0,23 (0,02)	0,35 (0,02)	30,1 (2,4)	28,4 (2,2)

CH: contenido de humedad, AR: antes reacondicionado, DR: después reacondicionado, Cu: coeficiente de contracción unitario, PIC: Punto de intersección de la contracción. (/): desviación estándar

3.3.Calidad

La calidad de la madera seca, en base al contenido de humedad objetivo se muestra en la Tabla 2. El CH promedio en ambos espesores está en el rango admisible (8,5%-11,5%) y el 90% y 85,5% del total de piezas resulta entre los límites de calidad admisibles para las piezas individuales (7% a 13% de CH). Tal homogeneidad del secado es probablemente debida al calentamiento volumétrico durante el secado RFV.

Tabla 2. Contenido de humedad objetivo.

Espesor (mm)	CHobjetivo (%)	CHpromedio (%)	Límite 7-13% (% piezas)
26	10,0	11,1	90,0
50	10,0	11,4	85,5

4. Conclusiones

El secado RFV de *Eucalyptus nitens*, cuanto menor fue el espesor de la madera, resultó más rápido, bajo colapso y con mayor cantidad de piezas en el rango admisible de humedad final.

Los resultados sugieren, que la brecha tecnológica para la utilización de la madera aserrada de *Eucalyptus nitens* en la industria del aserrío, la remanufactura y construcción, se puede reducir adoptando el secado RFV.

Agradecimientos

Los autores agradecen el financiamiento de los proyectos de investigación Anid/Fondef ID22110189 “Procedimiento RFV/MTM para productos de maderas de alto valor” y UBB/VRIP 2260324IF/R “Tratamientos térmicos de maderas duras”.

Referencias

- [1] INFOR. (2023). Anuario forestal 2023. Boletín Estadístico N° 192. 280p.
- [2] INFOR. (2004). *Eucalyptus nitens* en Chile: Procesos industriales de la madera. Informe Técnico N° 164. Instituto Forestal, Santiago, Chile. 74p
- [3] Ananías, R.A.; Sepúlveda, V.; Pérez, N.; Leandro, L.; Salvo, L.; Salinas, C.; Cloutier, A.; Elustondo, D. 2014. Collapse of *Eucalyptus nitens* wood after drying depending on the radial location within the stem. *Drying Technol* 32(14):1699-1705.
- [4] Ananías, R.A.; Sepúlveda-Villarreal, V.; Pérez-Peña, N.; Torres-Mella, J.; Salvo-Sepúlveda, L.; Castillo-Ulloa, D.; Salinas-Lira, C. (2020). Radio frequency vacuum drying of *Eucalyptus nitens* juvenile wood. *Biores* 15(3):4886-4897.
- [5] Perré, P.; Rémond, R.; Almeida, G.; Augusto, P.; Turner, I. (2023). State-of-the-art in the mechanistic modeling of the drying of solids: a review of 40 years of progress and perspectives. *Drying Technol* 41(6):817-842.
- [6] Avramidis, S.; Lazarescu, C.; Rahimi, S. (2023). Basics of wood drying. Ch 13 in *Handbook of Wood Sci & Technol* 679-706.
- [7] Resch, H. (2006). High-frequency electric current for drying of wood – historical perspectives. *Maderas-Cienc Tecnol* 8:67–82.
- [8] Lee, N-H.; Jung, H-S. (2000). Comparison of shrinkage, checking, and absorbed energy in impact bending of Korean ash squares dried by a radio-frequency/vacuum process and a conventional kiln. *Forest Prod J* 50(2): 69-72.
- [9] Hansmann, C.; Stingl, R.; Gonzalez-Prieto, O.; Baso-Lopez, C.; Resch, H. (2008). High-frequency energy–assisted vacuum drying of fresh *Eucalyptus globulus*. *Drying Technol* 26:611-616.
- [10] Rabidin, Z. A.; Gan, K. S.; Mohd, J. A. (2017). Characteristics of timbers dried using kiln drying and radio frequency-vacuum drying systems. *MATEC Web of Conferences*, 108:10001.
- [11] Norma chilena (2002) NCh176/1. Madera - Parte 1: Determinación de humedad. (NCh 176/1. cR2002). Instituto nacional de normalización Chile. 13p.
- [12] Norma europea (2018) UNE-EN14298. Estimación de la calidad del secado. (UNE-EN14298). Asociación Española de Normalización y certificación, Madrid, España. 9p.
- [13] Norma europea (2009) UNE-CEN/TS12169. Criterios de la evaluación para la conformidad de un lote de madera aserrada. (UNE-CEN/TS 12169 EX). Asociación Española de Normalización y certificación, Madrid, España. 10p.
- [14] Ananías, R.A.; Díaz, C.; Leandro, L. (2009). Estudio preliminar de la contracción y el colapso en *Eucalyptus nitens*. *Maderas-Cienc Tecnol* 11(3):251-262.

1152

SEGUIMIENTO DE LA DEGRADACIÓN DE LA MADERA ESTRUCTURAL POR *HYLOTRUPES BAJULUS* L. MEDIANTE MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS

Carlos Osuna-Sequera¹; Juan Carlos Cabrero¹; Teresa De Troya¹; Eva Hermoso¹

¹ ICIFOR-INIA-CSIC

Palabras clave / Palavras-chave:

Non-destructive techniques; Hylotrupes bajulus; Stress waves; Timber degradation; Ultrasonics

Resumen / Resumo:

En la evaluación del estado patológico de estructuras de madera en edificios, los organismos xilófagos representan una amenaza considerable. Por ello, es necesaria la identificación temprana y el control del progreso de estos ataques para preservar la integridad estructural. Las técnicas no destructivas, como la resistografía, la tomografía, la termografía y los métodos acústicos, son medios para evaluar propiedades mecánicas y detectar daños por organismos xilófagos en la madera. En el presente estudio se ha analizado la evolución de la degradación de la madera infestada con larvas de carcoma grande producida por *Hylotrupes bajulus* L., mediante técnicas no destructivas acústicas con el objetivo de detectar el momento y zonas de daño crítico. Se identificaron tendencias en áreas de mayor infestación, pero no en todos los casos se detectaron los ataques tempranos, especialmente en mediciones longitudinales o superficiales. Se propone la implementación de sensores más sensibles y ondas ultrasónicas de alta frecuencia, así como la extensión del tiempo de ataque junto con una mayor homogeneización del material de estudio para futuras investigaciones.

1. Introducción

En la evaluación del estado patológico de los edificios la presencia de diversos organismos xilófagos, como termitas, hongos y carcomas, representan una amenaza significativa para la integridad de la estructura de madera en estos [1]. Estos ataques son la fuente de posibles daños irreparables y consecuentemente, ponen en riesgo la estabilidad de los componentes estructurales. Es necesario, por lo tanto, encontrar métodos preventivos que permitan detectar en etapas previas al momento crítico, ataques causados por xilófagos y permitan su control desde las fases iniciales de infestación [2].

En el ámbito de la evaluación de propiedades mecánicas y de estado patológico de la madera, las técnicas no destructivas cumplen una función esencial. Estas técnicas ya conocidas, como la resistografía, tomografía, métodos acústicos o termografía, entre otras, permiten obtener información precisa sobre propiedades mecánicas como la densidad, rigidez y resistencia de la madera sin causar daños visibles que puedan afectar al elemento estructural estudiado [3]. Adicionalmente, estas técnicas son útiles para detectar daños causados por insectos y hongos xilófagos, deduciendo así el estado sanitario de la madera.

Varios estudios han demostrado la eficacia de estas técnicas en la detección y cuantificación de patologías biológicas en la madera [4-6]. Sin embargo, existe una falta de investigación que monitorice la evolución de la degradación en madera con dimensiones estructurales desde las etapas iniciales hasta el momento crítico de destrucción de su estructura. El presente estudio se enfoca en el análisis experimental de la evolución del estado patológico de la madera infestada con carcoma a lo largo de un periodo determinado mediante técnicas no destructivas acústicas, con el objetivo de encontrar una tendencia en la degradación de la madera estructural mediante variaciones en las mediciones realizadas con equipos habitualmente utilizados.

2. Materiales y métodos

2.1. Material

Se utilizaron 30 piezas de madera de pino laricio (*Pinus nigra* Arnold) de dimensiones 200 x 80 x 500 mm³ para los ensayos. Estas piezas se obtuvieron al dividir 11 vigas de madera de 4,5 metros de longitud y una sección transversal de 200 x 80 mm² en 7 secciones de 500 mm de largo cada una. Se seleccionaron las piezas en función de su contenido de albura y duramen, priorizando aquellas con menos duramen debido a su menor resistencia a los ataques por carcomas.

2.2. Pretratamiento e infestación de la madera

Con el fin de acelerar lo máximo posible el ciclo larvario de la carcoma grande (*Hylotrupes bajulus* L.), se impregnó la madera con una solución de peptona y levadura en autoclave. Se realizó un proceso de vacío y presión en tres etapas. Luego, las muestras se secaron en estufa a 60°C durante aproximadamente 96 horas y se acondicionaron en una cámara a 28°C y un 80% de humedad relativa. Finalmente, se introdujeron larvas de carcoma en la madera mediante perforaciones y se taparon los orificios con algodón.

2.3. Mediciones no destructivas

El contenido de humedad se midió con un xilohigrómetro capacitivo en varias etapas y la densidad se calculó como la relación entre la masa y el volumen de la madera. Además, se llevó a cabo mediciones cada mes durante 28 meses, menos los dos primeros meses que se redujeron a 15 días. En ellas se recogía el tiempo de transmisión de la onda a través de la madera de testa a testa (dos puntos, medidas superiores e inferiores), superficiales (en las dos caras) y transversales (en cinco puntos a lo largo de la pieza), con ultrasonidos con el equipo Sylvatest Trio (SYL) (CBS-CBT, Lausanne, Switzerland), el equipo USLab (Agricef, Campinas, Brazil) y ondas de impacto con el equipo MicroSecond Timer (MST) (Fakopp, Sopron, Hungary). Se realizaron pre-taladros cuando fue necesario en la madera para acoplar los sensores cónicos o exponenciales de los equipos de transmisión de onda.

El cálculo de la velocidad de transmisión de la onda se llevó a cabo utilizando la distancia entre los sensores y el tiempo de transmisión de la onda medido con los equipos. Estos datos se analizaron de diversas formas, utilizando los tiempos de transmisión de onda en µs, con las velocidades sin corrección por humedad de las mediciones o corregidas por humedad, o también los incrementos de velocidad en diferentes ubicaciones (mediciones de testa a testa, superficiales o transversales) en función del tiempo.

3. Resultados y discusión

Entre los resultados obtenidos se observó que las variaciones temporales en las velocidades de onda se hallaban influenciadas en gran parte por las pequeñas variaciones de humedad en la cámara de acondicionado, lo cual condujo a utilizar una corrección de las velocidades en función de la humedad, empleando las relaciones obtenidas por otros trabajos de investigación [7]. Tras finalizar las mediciones, se llevó a cabo a un estudio detallado para examinar el progreso de las larvas de carcoma en cada pieza y discernir la manifestación de tendencias en las mediciones realizadas en las áreas de mayor desarrollo larvario y por tanto con mayores daños. El índice de éxito en la infestación de piezas en comparación con las no infestadas alcanzó el 27% en el proceso completo.

A modo de ejemplo, la Figura 1 ilustra una instancia representativa de las mediciones transversales de la velocidad de onda en la región central de la pieza 06-02, revelando con mayor claridad los resultados en contraste con las áreas más periféricas. Se observó que la detección temprana de ataques por larvas de carcoma en etapas iniciales no siempre se evidenciaba en todas las piezas mediante los métodos acústicos empleados en este estudio. No obstante, en los casos de infestaciones más avanzadas, se evidenciaba una tendencia más pronunciada en determinadas secciones transversales. Las mediciones realizadas en dirección testa a testa y superficiales presentaron resultados menos concluyentes. Este análisis se llevó a cabo en todas las piezas analizando todas las posibles tendencias por equipos y configuración de los sensores.

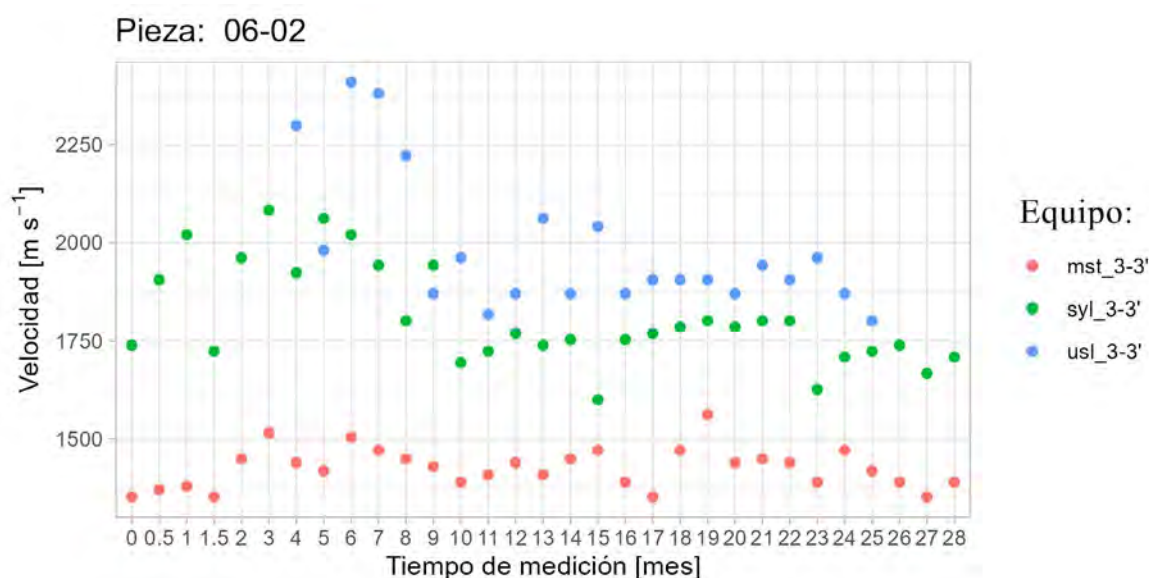


Figura 1. Velocidad de onda de las mediciones transversales centrales para la pieza 06-02 con equipos no destructivos a lo largo del periodo de ensayo en meses.

4. Conclusiones

En el transcurso del presente estudio, se constató que la variación de la velocidad de onda se mantuvo prácticamente inalterable cuando se realizaron mediciones en la misma dirección que las fibras, mientras que se evidenciaron indicios de decadencia en las propiedades acústicas cuando las mediciones se efectuaron transversalmente. A fin de abordar esta particularidad, se propone la implementación de sensores de mayor sensibilidad y el empleo de ondas ultrasónicas de alta frecuencia. Adicionalmente,

se observó que las piezas de madera presentan heterogeneidades debido a las distintas tasas de infestación larvaria, lo que motiva la necesidad de homogeneización del material de ensayo para realizar este tipo de estudio. Aunque en el presente trabajo no se logró la formulación precisa de un modelo de degradación temporal a través de monitoreo acústico, sería interesante tener en cuenta las recomendaciones observadas para un estudio posterior a fin de establecer un modelo robusto que permita una predicción más certera del proceso de deterioro en la madera, así como la extensión de tiempo de ensayo para asegurar daños más significativos.

Agradecimientos

Al Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades por el contrato obtenido con la convocatoria-ID: PTA2017-13492-I. A Ramón García por su ayuda con los ensayos no destructivos, Nuria Gómez por la cesión del uso del laboratorio de celulosas y papel del ICIFOR-INIA, CSIC. Emilio Camacho y Enrique Garriga por la preparación y corte de las muestras. A todo el equipo técnico y científico del ICIFOR-INIA, CSIC involucrado durante la pandemia por COVID que hizo posible continuar este estudio.

Referencias

- [1] Mendes, S.; Henriques, D.F.; Do Carmo Alves, M. (2018) Mechanical properties of timber deteriorated by beetles in ancient buildings: An experimental analysis. *Conservar Património*. 28:23-29. doi:10.14568/CP2017023
- [2] Bertolini, C.C.; Marzi, T. (2018) Conservation of historic timber roof structures of Italian architectural heritage: diagnosis, assessment, and intervention. *Int J Archit Herit*. 12(4):632-665. doi:10.1080/15583058.2018.1442523
- [3] Osuna-Sequera, C.; Llana, D.F.; Hermoso, E.; Arriaga F. (2021) Acoustic wave velocity in long pieces of Salzmann pine for in-situ structural assessment. *Constr Build Mater*. 269:121256. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.121256
- [4] Nowak, T.P.; Jasieńko, J.; Hamrol-Bielecka, K. (2016) In situ assessment of structural timber using the resistance drilling method - Evaluation of usefulness. *Constr Build Mater*. 102:403-415. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.11.004
- [5] De Reyser, D., Maurin, E.; Daudet, L.; Fontaine, J.M. (2005) Les Signaux Émis Par Les Larves d'insectes Xylophages et La Détection Acoustique. In: 14th Triennial Meeting The Hague Preprints. 12-16 September. The Hague, Netherlands. 2:1068-1075.
- [6] Sandak, A.; Ferrari S.; Sandak, J.; Allegretti, O.; Terziev, N.; Riggio, M. (2013) Monitoring of wood decay by near infrared spectroscopy. *Adv Mat Res*. Vol 778; 2013:802-809. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.778.802
- [7] Llana, D.F.; Íñiguez-González, G.; Martínez, R.D.; Arriaga, F. (2018). Influence of timber moisture content on wave time-of-flight and longitudinal natural frequency in coniferous species for different instruments. *Holzforschung*. 72(5):405–411. doi:10.1515/hf-2017-0113

1153

SEGUIMIENTO DE LAS PROPIEDADES MODALES DE UN EDIFICIO DE CLT DE MEDIANA ALTURA DURANTE EL MONTAJE POR MEDIO DE VIBRACIONES AMBIENTALES

Franco Benedetti Leonelli¹; Alan Jara Cisterna¹; Alexander Opazo Vega¹; Víctor Rosales Garcés¹

¹ Universidad del Bío-Bío

Palabras clave / Palavras-chave:

Análisis modal operacional, Variabilidad de períodos fundamentales, Madera contralaminada, Edificio Pymelab

Resumen / Resumo:

El entendimiento del comportamiento dinámico de estructuras de CLT es esencial para su uso seguro, especialmente en zonas de alta sismicidad. Se han desarrollado avances, pero aún es incipiente el estudio de ciertos aspectos, como la caracterización dinámica durante montaje y construcción. Investigar esto podría ayudar a la detección oportuna de problemas y la rápida toma de decisiones. Este trabajo analiza la variación de las propiedades dinámicas de un edificio prototipo de CLT de 5 niveles durante el proceso de montaje. Se consideran mediciones de vibración ambiental y la aplicación de técnicas de análisis modal operacional para diferentes estados de avance de la obra, desde el montaje del esqueleto estructural de CLT, la instalación de revestimientos y el retiro de las estructuras temporales. Se logran identificar los tres modos de vibrar predominantes, dos de traslación y uno torsional, además de la evolución de los períodos según el avance constructivo. Se observa que la colocación de revestimientos genera inicialmente una rigidización en el sistema, pero a medida que se avanza en la instalación de terminaciones, la masa adicional hace crecer los períodos hasta en un 13.3% con respecto a una condición con sólo el esqueleto estructural. Adicionalmente, se realiza una comparativa de los períodos experimentales con los calculados usando fórmulas aproximadas y con modelos de elementos finitos, observando un buen ajuste con los métodos aproximados, pero diferencias con los modelos según sea el enfoque de modelación. Finalmente, se desarrolla una evaluación preliminar de la respuesta dinámica observada bajo demandas sísmicas reales.

1. Introducción

Conocer los parámetros dinámicos de una estructura es fundamental para evaluar su comportamiento frente a cargas dinámicas. Este tipo de fenómeno en estructuras de madera ha sido estudiado en una torre de entramado ligero [1] y en CLT [2-4]. Los autores evidencian una alta sensibilidad de las propiedades dinámicas, como las frecuencias naturales del edificio a condiciones ambientales.

En estructuras de CLT, el monitoreo estructural ha sido utilizado para realizar calibración de modelos de elementos finitos para generar escenarios probables que entreguen información para realizar mantenimiento y simulaciones bajo diferentes fenómenos [2]. La calibración de los modelos de elementos finitos ha permitido alcanzar errores inferiores al 1% en la estimación de las propiedades dinámicas [2]. Opazo-Vega et al. [3] realizó la identificación de propiedades dinámicas de un prototipo de edificio experimental de CLT desarrollado con pino radiata. Aquí, fue posible identificar 5 frecuencias naturales de la estructura. Los autores utilizaron técnicas de análisis modal operacional para la identificación de los parámetros dinámicos mediante mediciones in situ.

En general, los estudios de propiedades dinámicas en construcciones de CLT se han enfocado en estructuras en servicio o bajo condiciones de laboratorio, mientras que el análisis del comportamiento dinámico durante los procesos de construcción y montaje es aún incipiente [4,5]. Analizar el comportamiento en etapas tempranas de la construcción de estos proyectos puede ser esencial para comprender de mejor forma la respuesta estructural de estos sistemas y permitir la toma de decisiones oportuna frente a eventuales problemas que aparezcan en obra. Este trabajo busca profundizar la caracterización dinámica de estructuras de CLT durante los procesos de construcción por medio del análisis modal de un edificio prototipo de 5 niveles durante la construcción.

2. Edificio prototipo

El edificio estudiado corresponde a la Torre Pymelab. Es un edificio experimental de 5 pisos de altura construido íntegramente de CLT. Está ubicado en la Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile, y representa un esfuerzo colaborativo empresa-gobierno-universidad para impulsar la innovación de las Pymes vinculadas a la industria de la construcción con madera [6].

La estructura posee una planta rectangular de 6.6 m x 4.2 m, y una altura total de 14.5 m. La Figura 1 muestra imágenes del edificio. Desde el punto de vista constructivo, el edificio combina el sistema plataforma, para los primeros tres niveles, con el sistema balloon-frame en los dos pisos superiores. Los muros de los tres primeros pisos y todas las losas corresponden a placas de CLT de pino radiata de 5 capas (165 mm de espesor), mientras que para el sistema balloon se consideran muros de 3 capas (100 mm de espesor). Benedetti et al. [7] presenta mayor detalle del diseño y comportamiento sísmico del edificio.



Figura 1. Vistas de la estructura durante la construcción (izquierda), en su estado terminado (centro) y de la configuración típica de uniones

3. Mediciones de vibración ambiental

Se consideraron 9 estados de avance para realizar las mediciones según lo detallado en la Tabla 1. Los 5 primeros corresponden a instantes en que el esqueleto estructural de cada piso estaba terminado. Los 4 últimos representan estados en que el esqueleto estructural estaba terminado pero los revestimientos y terminaciones aún estaban en proceso. Puesto que desde el estado E3 en adelante, para la construcción se instalaron andamios y un montacargas por el perímetro exterior del edificio. Para identificar el efecto de este sistema anexo en las propiedades dinámicas, se considera el estado E9 inmediatamente posterior al final de la obra, una vez que las estructuras temporales habían sido retiradas.

Tabla 1. Estados de avance de medición

Estado	Avance montaje estructura CLT	Avance en terminaciones	Descripción	Ubicación sensores
E1	Hasta Piso 1	Sin avance.	Altura 2.5 m.	Losa piso nivel 2
E2	Hasta Piso 2	Sin avance.	Altura 5.0 m.	Losa piso nivel 2
E3	Hasta Piso 3	Sin avance.	Altura 7.5 m. Instalación andamios.	Losa piso nivel 3
E4	Hasta Piso 4	Sin avance.	Altura 10.0 m.	Losa piso nivel 4
E5	Hasta Piso 5	Sin avance.	Altura 14.5 m.	Losa piso nivel 5
E6	Terminada	~50% interior, 0% exterior.	Avance en revestimientos interiores.	Losa piso nivel 5
E7	Terminada	100% interior, ~50% exterior.	Avance en revestimientos exteriores.	Losa piso nivel 5
E8	Terminada	100% interior, 100% exterior.	Fin de montaje y construcción.	Losa piso nivel 5
E9	Terminada	Terminada.	Desmontaje de estructuras temporales.	Losa piso nivel 5

4. Resultados

4.1. Identificación de modos de vibración

La identificación de propiedades dinámicas se realiza para cada una de las mediciones y estados estudiados. La Figura 2 presentan las formas modales obtenidas para la medición E9 usando ARTEMIS [8] y PyOMA [9].

4.2. Evolución de las frecuencias naturales

La Figura 2 presenta la variación de los períodos naturales de los tres modos de vibrar principales identificados por medio de las técnicas implementadas. Para todos los estados considerados, el modo traslacional en dirección transversal es que presenta el período más alto, seguido por el traslacional longitudinal y el torsional (este modo no pudo ser identificado para los estados E1 y E2). Se observa el aumento del período de los modos a medida que se avanzaba en el montaje del esqueleto estructural (desde estado E1 a E5), pasando de 0.054 s a 0.285 s en el modo transversal.

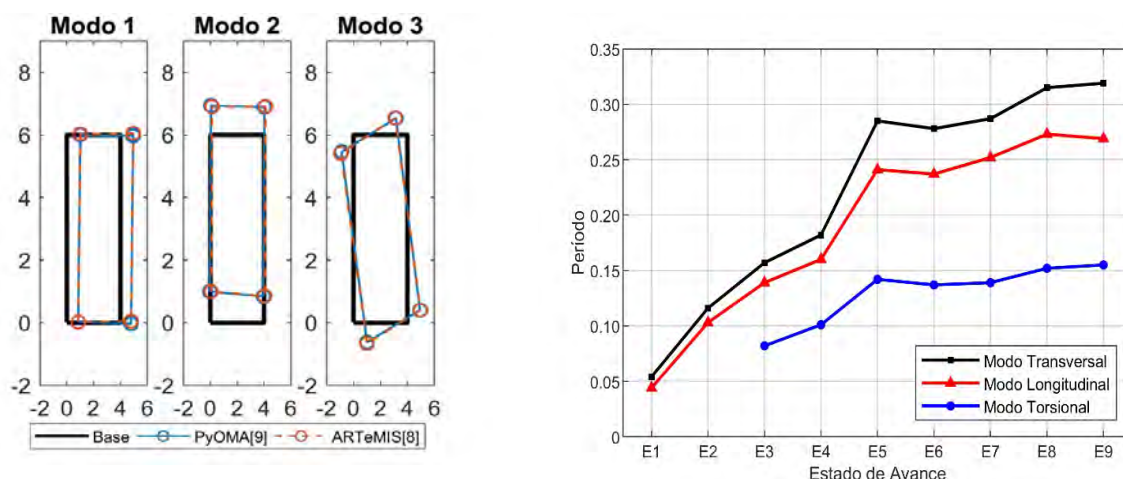


Figura 2. Formas modales identificadas para el estado E9 con las herramientas empleadas (izquierda) y variación del período natural de los modos de vibrar principales durante la construcción (derecha)

5. Conclusiones

Se identifican las formas modales y la evolución de los períodos de los tres modos predominantes de una estructura de CLT durante la construcción. Los resultados muestran que la colocación de los revestimientos interiores, aun cuando son elementos de elevada masa (doble tablero de yeso con entramado de madera), inducen una rigidización del sistema, ya que los períodos de los tres modos se reducen entre 1.5% (modo longitudinal) a 3.8% (modo torsional) con respecto al estado de sólo el esqueleto estructural (E5). No obstante, el aumento de la masa asociada a la colocación total de los revestimientos (interiores y exteriores) genera un alargamiento del período entre 6.5% a 13.3% con respecto del estado E5.

Se observa que existe un buen ajuste entre el período del modo fundamental de la estructura terminada con el calculado con la propuesta de Aloisio et al. [2], pero la diferencia se hace importante al utilizar la fórmula del código ASCE 7-16. Con relación a los modelos, para un modelo que incluya todas las segmentaciones del sistema y las rigideces elásticas de diseño, se representa una condición de mayor flexibilidad que la real medida para el estado final de la estructura (E9), siendo el modo torsional el que presenta la mayor diferencia (23.6%). Esta diferencia se podría deber a que las propiedades mecánicas de diseño de los conectores son menores que las altas rigideces iniciales típicas de los sistemas en madera para pequeña de formación bajo vibraciones ambientales. Por el contrario, al considerar el modelo pseudo-continuo se tiene que los períodos obtenidos son un 30% menores que los calculados experimentalmente.

Agradecimientos

Este trabajo fue apoyado por la Universidad del Bío-Bío a través de los proyectos DICREA 2260525 IF/R e INES I+D 22-18. Los autores también agradecen al proyecto ANID BASAL FB210015 por la colaboración científica con nuestros departamentos académicos.

Referencias

- [1] Alarcón, M.; Soto, P.; Hernández, F.; Guindos, P. (2023) Structural health monitoring of South America's first 6-Story experimental light-frame timber-building by using a low-cost RaspberryShake seismic instrumentation. *Engineering Structures*. 275:115278.
- [2] Aloisio, A.; Pasca, D.; Tomasi, R.; Fragiaco, M. (2020) Dynamic identification and model updating of an eight-storey CLT building. *Engineering Structures*. 213:110593. doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110593
- [3] Opazo-Vega, A.; Benedetti, F.; Jara-Cisterna, A. (2023) Vibration-Based Monitoring of a 5-Story Cross-Laminated Timber (CLT) Building Prototype. In *Proceedings of the International Conference on Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures*. 30 de Agosto a 1 de Septiembre. Milano, Italia. Pp. 211–221.
- [4] Baas, E.J.; Riggio, M.; Barbosa, A.R. (2021) Structural health monitoring data collected during construction of a mass-timber building with a data platform for analysis. *Data in Brief*. 35:106845. doi.org/10.1016/j.dib.2021.106845
- [5] Larsson, C.; Abdeljaber, O.; Dorn, M. (2023) Dynamic evaluation of a nine-storey timber-concrete hybrid building during construction. *Engineering Structures*. 289:116344. doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116344
- [6] Rosales V.; Benedetti F.; Suazo M.; Vargas M.; Rojas I.; Jara A.; Rebolledo A. (2021) Associativity between SMEs towards mid-rise building timber construction: Pymelab project. In *Proceedings of the World Conference on Timber Engineering 2021 (WCTE 2021)*. 9 a 12 Agosto. Santiago, Chile.
- [7] Benedetti, F.; Valenzuela, T.; Jara-Cisterna, A.; Opazo-Vega, A.; Rosales, V. (2023). Incremental dynamic analysis of a five storeys CLT building designed through force-based methods. In *Proceedings of the World Conference on Timber Engineering 2023, WCTE 2023*. 19-23 de Junio, Oslo, Noruega.
- [8] ARTEMIS Modal Pro, Version 7.2.1.6, Structural Vibration Solutions A/S, Aalborg Den-mark, Copyright 1999–2022. Available online: <http://www.svibs.com/index>, last accessed 2022/12/01.
- [9] Pasca, D. P.; Aloisio, A.; Rosso, M.M.; Sotiropoulos, S. (2022) PyOMA and PyOMA_GUI: A Python module and software for Operational Modal Analysis. *SoftwareX*. 20:101216. doi.org/10.1016/j.softx.2022.101216

1154

SHRINKAGE EFFECT ON RADIAL AND TANGENTIAL DIRECTION STRESSES IN CYLINDRICAL WOOD PIECES OF *PINUS TAEDA*

Nilson Tadeu Mascia¹

¹ Universidade Estadual de Campinas (Unicamp)

Palabras clave / Palavras-chave:

Compression test, Elastic coefficients, Lekhnitskii's coefficients, Orthotropy

Resumen / Resumo:

Shrinkage affects the stresses and strains that can act within wood structures. In this study, the shrinkage was determined based on the stress-strain relationship of a cylindrical piece of wood without external forces acting on it in a system of cylindrical coordinates. Due to its radial symmetry, the displacement field is a function of radius, and the angular displacement is null. Assuming constant longitudinal strains, the strains can be described by a function of the reduced strain coefficients and the associated coefficient, denoted by k , as presented by Lekhnitskii, where the coefficients depend on the elastic properties of the material. Thus, the equation that represents this problem is a function of the coefficients of strain and, consequently, of shrinkage. To demonstrate the effect of the shrinkage and to show how the stresses in the radial and tangential directions were affected, the elastic coefficients of the wood species *Pinus caribaea* were experimentally obtained and the coefficient k was determined. Overall, the results highlight the importance of considering shrinkage in the stresses of the radial and tangential directions in wood pieces.

1. Introduction

The purpose of this article is to present the influence of shrinkage on stresses, based on anisotropy concepts applied to wood. These concepts are derived from the study by Lekhnitskii [comp1], which focused on general anisotropy concepts, and a study by Hsu and Tang [2], which focused on the application of such concepts in the study of wood shrinkage.

The analysis of wood shrinkage in terms of stresses and strains can be performed by considering a cylindrical piece of wood with no external forces acting upon it. The shrinkage resulting from humidity variation can be computed as strain components, and therefore, from constitutive relations, the associated stresses and displacements can be calculated.

Because of the radial symmetry associated with the cylindrical shape, the displacement field is a function of the radial position and direction r , where it is assumed that the displacement in the longitudinal

direction z is zero, and the deformation is constant. Therefore, the deformations can be described as a function of the reduced coefficients of deformation that were proposed by Lekhnistkii [1]. Note that these coefficients and the associated coefficient, denoted k , are dependent on the elastic properties of the material constituting the structure or the analyzed structural piece.

By accounting for shrinkage in these deformations as components and consequently in the coefficients, it is possible to assess the influence of shrinking in the stresses by analyzing the solution of the differential equation containing the deformation coefficients.

In this paper, an application example of the shrinkage influence is performed focusing on a cylindrical piece of the reforestation wood species of *Pinus taeda*, using data of an experimental procedure to determine the elastic and shrinkage properties of the wood.

2. Materials and methods

From a wood block with growth rings that are approximately cylindrical surfaces, specimens were removed to determine the elastic properties of the wood (Figure 1), and the coefficient k can be determined.

Hence, the specimens were tested according to the scheme presented here in each direction with the following dimensions: 4 cm x 4 cm x 10 cm. The wood species *Pinus taeda* was used. Electrical KYOWA extensometers were used, denoted KFC-5-C1-11, with a length of 5 mm, a gauge factor of 2.10, and an electrical resistance of 120 W to obtain the deformations, and an AMSLER universal testing machine with a 250-kN capacity provided the loads. The procedures on this subject can be found in Mascia [3].

Six smaller pieces inside the block were then considered following the r , ϑ , and z -directions and in the respective planes, r - ϑ , z - r , and z - ϑ . The ϑ direction is adopted as illustrated in Figure 1, with the closest approximation possible to the coordinate system used.

Due to the wood block's dimensions of approximately 50 cm in diameter, these specimens were smaller than those typically used for simple compression tests for non-native species, as indicated in the Brazilian standard [4].

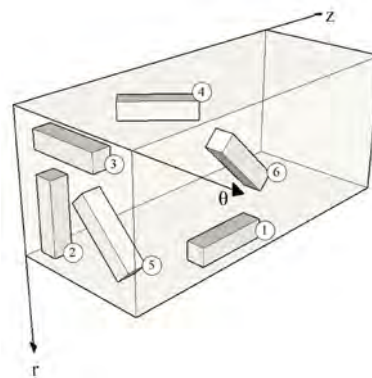


Figure 1: Wood block with specimens.

Thus, from the piece in the z -direction (Specimen 1), it is possible to obtain the following coefficients for the Poisson's ratios and elastic modulus in this direction:

$$\nu_{zr} = \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_z}; \nu_{z\theta} = \frac{\varepsilon_\theta}{\varepsilon_z}; E_z = \frac{\sigma_z}{\varepsilon_z} \quad (1)$$

Similarly, other coefficients were obtained from the piece in the r -direction (Specimen 2) and in the θ -direction (Specimen 3). From the existing symmetry conditions of the coefficients of elasticity, Bodig and Jayne [5], the following can be obtained:

$$\frac{\nu_{zr}}{E_z} = \frac{\nu_{rz}}{E_r}; \frac{\nu_{\theta r}}{E_\theta} = \frac{\nu_{r\theta}}{E_r}; \frac{\nu_{z\theta}}{E_z} = \frac{\nu_{\theta z}}{E_\theta} \quad (2)$$

The shear elastic modulus was determined using Specimens 4, 5, and 6 through coordinate transformations at an angle of approximately 45° . Table 1 shows the results for the overall elastic characterization of this wood species sample.

Table 1. Mean values of the coefficients of elasticity.

$E_z = 18,200 \text{ MPa}$	$E_\theta = 301 \text{ MPa}$	$E_r = 452 \text{ MPa}$
$G_{rz} = 390 \text{ MPa}$	$G_{r\theta} = 110 \text{ MPa}$	$G_{z\theta} = 280 \text{ MPa}$
$\nu_{rz} = 0.013$	$\nu_{r\theta} = 0.539$	$\nu_{\theta z} = 0.005$

Considering a system in cylindrical coordinates aligned with the main directions of elasticity, k is calculated as $\sqrt{\frac{\beta_{rr}}{\beta_{\theta\theta}}}$ with the participating terms of k [1] given by:

$$\beta_{rr} = S_{rr} - \frac{S_{rz}S_{rz}}{S_{zz}} = \frac{1}{E_z} - \frac{\nu_{rz}^2}{E_r}; \beta_{\theta\theta} = S_{\theta\theta} - \frac{S_{\theta z}S_{\theta z}}{S_{zz}} = \frac{1}{E_\theta} - \frac{\nu_{\theta z}^2}{E_z} \quad (3)$$

Note that the terms S_{ij} represent the compliance coefficients and β_{ij} are the Lekhnistkii's reduced coefficients of deformation, for $i, j = r, z$ and θ . From these relations, the mean value found for k is 0.865.

Finally, the shrinkage properties [6] were assessed for varying humidity in the wood from 30% up to 12%, whose mean values were $\alpha_\theta = 0.06$; $\alpha_r = 0.03$; $\alpha_z = 0.001$.

3. Calculations of the stresses and radial displacements

From the values determined with the experimental results, graphs of the stresses in the radial and tangential directions were plotted (Table 1). In this context, shrinkage (α_i) is computed as parts of the stresses and deformations relations.

Next, the parameters used for creating Figure 2 is displayed, showing variations of stress in r (the radial direction) σ_r , and in θ (the tangential direction) σ_θ , from the center of a wood piece toward the border, i.e., the r coordinate ranging from 0 to R . The terms β_r and β_θ and c depend on the elastic coefficients and shrinkage values. Thus:

$$\beta_{rr} = S_{rr} - \frac{S_{rz}S_{rz}}{S_{zz}} = \frac{1}{E_z} - \frac{v_{rz}^2}{E_r} \approx 2.21 \times 10^{-4}; \beta_{\theta\theta} = S_{\theta\theta} - \frac{S_{\theta z}S_{\theta z}}{S_{zz}} = \frac{1}{E_\theta} - \frac{v_{\theta z}^2}{E_\theta} \approx 3.32 \times 10^{-4}$$

$$\beta_r = \frac{S_{rz}}{S_{zz}}(c + \alpha_z) - \alpha_r = -v_{z\theta}(c + \alpha_z) - \alpha_r \approx -0.03; \beta_\theta = \frac{S_{\theta z}}{S_{zz}}(c + \alpha_z) - \alpha_\theta = -v_{z\theta}(c + \alpha_z) - \alpha_\theta \approx -0.06;$$

Consequently with $k = 0.8156$, $A_1 = \frac{\beta_r - \beta_\theta}{\beta_{\theta\theta} - \beta_{rr}} \approx 27.02$. Then, the stresses become:

$$\sigma_r = A_1 \left(1 - \frac{r^{k-1}}{R^{k-1}} \right); \sigma_\theta = A_1 \left(1 - \frac{kr^{k-1}}{R^{k-1}} \right) \quad (4)$$

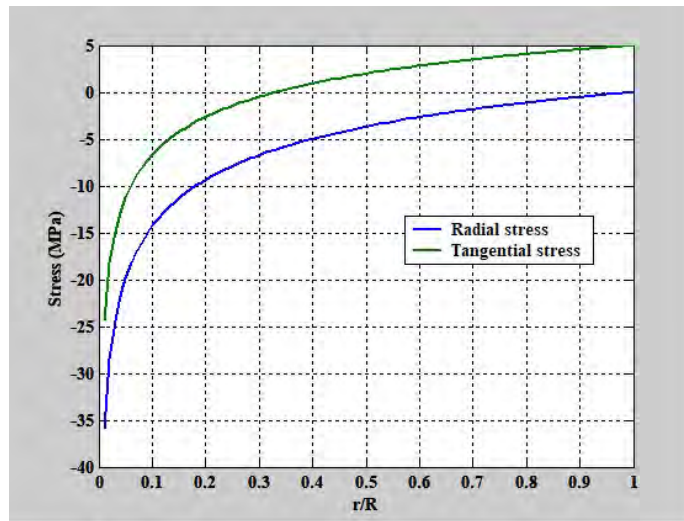


Figure 2. Radial and tangential stresses from the center toward the border of the wood piece.

Figure 2. illustrates that the radial stress increases from the border to the center of the piece, reaching a maximum compression value of approximately 36 MPa. In the tangential direction, there is a tensile stress of 5 MPa at the borders, while at the center, the stress reaches a maximum compression of 25 MPa.

4. Conclusions

This article presented a study on the analysis of stresses in a wooden piece, considering the influence of shrinkage on these stresses under the concepts of cylindrical anisotropy. To conduct the analysis, it was necessary to determine a parameter, k , which depends on the results of the elastic properties of the wood. These properties were assessed through compression tests on specimens of the *Pinus taeda* species.

It is worth noting that understanding stresses in relation to shrinkage and dimensional variations in wood pieces can help prevent ruptures or fissures, ensuring the proper use of wood in structural designs.

The importance of analyzing the influence of shrinkage, considering wood's susceptibility to humidity variations and its associations to ruptures and crack, motivates the investigation situations where the dimensional variation, shrinkage, or swelling of wood is important.

It was possible to observe that during shrinkage, there are stresses in the tangential direction that can lead to tensile ruptures that cause fissures in the piece, which is detrimental for wood structures.

In many cases, these stresses can exceed the compressive or the tensile mean strength of the *Pinus taeda* (typically ranging from 30 MPa to 60 MPa) or even more critical, when associated with the tension perpendicular to grain (mean values around 2.8 MPa) [7]. This conclusion is also valuable for understanding of engineered wood products, such as cross laminated timber made of this wood species, which is prevalent in Brazil [8].

Acknowledgement

The author would like to thank the São Paulo Research Foundation, FAPESP (Process n.97/02710-0) and Brazilian National Council for Scientific and Technological Development, CNPq (Processes n. 307202/2019-4 and n.305363/2022-0) for their financial support for this research.

References

- [1] Lekhnitskii, S.G. (1981) Theory of Elasticity of an Anisotropic Body. Moscou: Mir, 430 p.
- [2] Hsu, N.N.; Tang, R.C (1974) Internal Stresses in Wood Logs due to Anisotropic Shrinkage. Wood Science. 7 (1):43-51.
- [3] Mascia, N.T. (2015) Análise de tensões e deslocamentos em peças cilíndricas de madeira devido à retração. Matéria. 20: 32-46.
- [4] Brazilian standard (2022) NBR 7190-1 Projeto de estruturas de madeira, Parte 1: Critérios de dimensionamento.
- [5] isentos de defeitos para madeiras de florestas nativas. Associação Brasileira de Normas (ABNT), Rio de Janeiro, Brasil.
- [6] Bodig J.; Jayne B. A. (1982) Mechanics of wood and wood composites. Krieger Publishing Company, Florida, USA.
- [7] Trianoski, R.; Matos, J. M. de; Iwakiri, S.; Prata, J. G. (2013) Avaliação da Estabilidade Dimensional de Espécies de *Pinus* Tropicais. Floram. 20 (3): 398-406.
- [8] Mustefaga, E.C., Hillig, E., Tavares, E.L., Sozim, P.C.L., Rusch, F. (2019) Caracterização físico-mecânica da madeira juvenil de *Pinus*. Sci. For., Piracicaba. 47 (123): 472-481.
- [9] Vilela, R. T.; Mascia, N. T. (2021) Avaliação de propriedades mecânicas da madeira de *Pinus taeda* provenientes de placas de Cross Laminated Timber. Ambiente Construído. 21: 89-110.

1155

SIMPLIFICACIÓN EN LA MODELIZACIÓN DE UNIONES EN MADERA

Roberto Quinteros Mayne¹; Ignacio De Arteaga Jorda¹; José Manuel Cabrero Ballarín¹; Borja Iñaki Iraola Sáenz¹

¹ UNAV

Palabras clave / Palavras-chave:

Uniones en madera, Modelo constitutivo, ABAQUS

Resumen / Resumo:

Dentro del proyecto “*Hacia un análisis fiable y eficiente de las uniones de madera: ensayos de material e interacción, y modelado numérico*” financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación del Gobierno de España, se presenta una nueva forma de modelar y abordar las uniones en madera, empleando un nuevo modelo constitutivo basado en el acople de los criterios de Tsai-Hill y Hoffman, utilizados habitualmente por separado en función del estado en el que se encuentra la madera, confinada o no confinada. El acople de los criterios, permite trabajar la madera con un único modelo constitutivo que, en el caso de las uniones, es capaz de detectar el grado de confinamiento del material y responder acorde a sus condiciones de contorno.

1. Introducción

La expansión de la construcción con madera tiene el potencial de reducir las emisiones y capturar carbono de manera significativa, lo que equivale a eliminar las emisiones generadas por la construcción. Esto se puede comparar con la contribución actual de las energías renovables [1]. Sin embargo, es importante destacar que nuestro conocimiento científico sobre las estructuras de madera aún es limitado, a pesar de que los edificios de madera en altura están ganando popularidad.

En la actualidad, los enfoques de diseño se basan principalmente en la experiencia y la tradición [2], lo que no garantiza eficiencia ni confiabilidad. Por ejemplo, muchos elementos en las estructuras de madera están sobre-dimensionados en un 40-60% debido a los requisitos de unión [3,4]. Además, aproximadamente el 25% de los colapsos recientes de estructuras de madera estuvieron relacionados con problemas en las uniones [5,6].

La descripción precisa del comportamiento estructural de las uniones de madera sigue siendo un tema abierto y plantea numerosos desafíos sin resolver. Es necesario realizar más investigaciones y desarrollar métodos más eficientes y confiables para el diseño de estructuras de madera, especialmente en lo que respecta a las uniones.

2. Marco teórico

En este sentido, dentro del proyecto “Hacia un análisis fiable y eficiente de las uniones de madera: ensayos de material e interacción, y modelado numérico” se presenta una nueva forma de modelar y abordar las uniones en madera, empleando un nuevo modelo constitutivo basado en el acople de los criterios de Tsai-Hill [7] y Hoffman [8], utilizados habitualmente por separado en función del estado en el que se encuentra la madera, confinada o no confinada [9,10]. El acople de los criterios [11], permite trabajar la madera con un único modelo constitutivo que, en el caso de las uniones, es capaz de detectar el grado de confinamiento del material y responder acorde a sus condiciones de contorno.

Mediante la utilización de este nuevo modelo constitutivo a través de una UMAT de ABAQUS [11], el modelado de la madera se ajusta a la realidad de su comportamiento en las zonas de contacto donde suele aparecer una densificación fruto de la concentración de tensiones que derivan de las restricciones al movimiento propias de los contactos, tal y como muestra la figura 1 y que habitualmente son modeladas mediante artificios como el Stiffnes Contact [12] que elevan el coste computacional, y complejizan el modelado, y requieren la definición de un parámetro adicional difícil de calibrar y no representativo del comportamiento real.

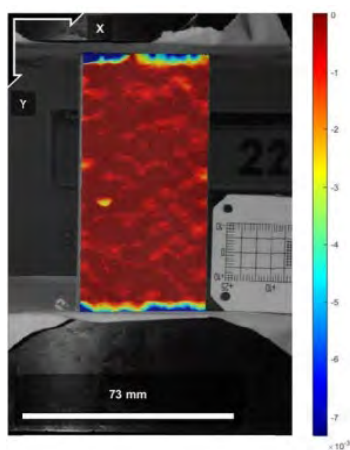


Figura 1 Resultados de correlación de imágenes para la deformación de la muestra de compresión centrada [12]

3. Resultados y conclusiones

Se presenta la validación del modelo de material en un problema sencillo, en el que el contacto desempeña un papel fundamental: la respuesta de una pieza a compresión simple. En ella, como se ve en la Figura 1, se forman bandas de en la zona de contacto con la prensa que modifican su comportamiento. Este ensayo permite visualizar de modo sencillo la mejora conseguida en el modelado de este comportamiento fundamental para el correcto modelado de uniones.

Se modela el contacto con las placas con la opción de “Hard” Contact como comportamiento en la dirección normal del apoyo, permitiendo la separación después del contacto, y utilizando el coeficiente de rozamiento correspondiente [13] en la dirección tangencial, mediante el uso de penalizadores como formulación de fricción en el contacto.

La validación del contacto se ha llevado a cabo haciendo uso de los datos de correlación de imagen digital obtenidos mediante GOM Correlative en la campaña de ensayos experimentales recogidos por B. Iraola et al. [12]. Observando (Figura 2) cómo con el uso del modelo constitutivo propuesto aparecen las bandas de densificación en la zona de contacto que describe [13] y que hasta la fecha tenían que ser resueltas mediante la utilización del “Stiffnes Contact”, o con la introducción de un material con rigidez reducida para reproducir el comportamiento real [14].

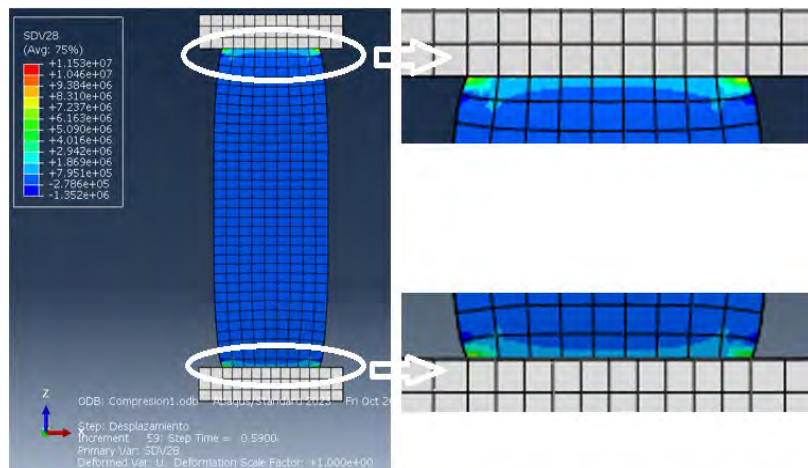


Figura 2 Bandas de densificación en modelo teórico simulado en ABAQUS.

En la Figura 3, se observa la evolución de la curva tensión-deformación para un punto cercano al contacto, y la evolución tensión-deformación para el punto central de la probeta.

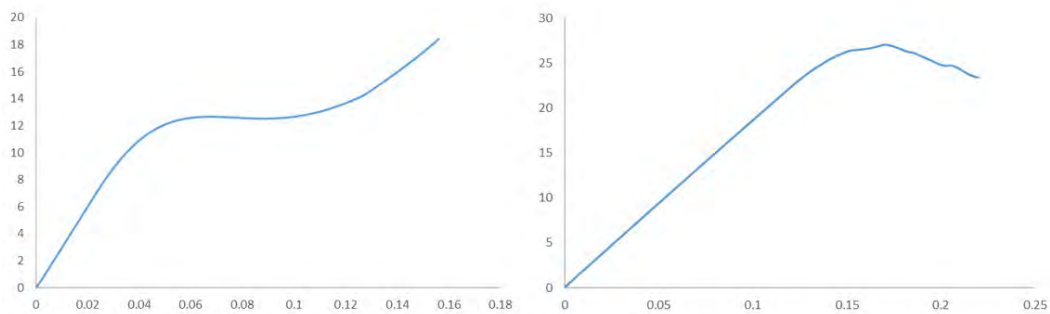


Figura 3 Evolución cualitativa de la curva tensión-deformación: a) Punto Contacto b) Punto Central probeta.

De la gráfica se desprende cómo efectivamente el modelo constitutivo utilizado se comporta acorde a las condiciones de contorno, permitiendo así simplificar el modelado del contacto en las uniones, y evitar el empleo de factores de ajuste o mecanismos de modelado adicionales para replicar la realidad.

Agradecimientos

Se agradece el apoyo financiero brindado por el Ministerio de Ciencia e Innovación de España y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional bajo el contrato PID2020-118569GB-C21 MINECO/FEDER UE.

Referencias

- [1] Hart, J.; Pomponi, F. (2020) More timber in construction: Unanswered questions and future challenges, Sustainability (Switzerland). 12. <https://doi.org/10.3390/SU12083473>.
- [2] R. Jockwer, G. Fink, J. Köhler, Review of the reliability of timber structures in the 2020s, in: International Network on Timber Engineering (INTER), 2020: p. Paper 53- 01-01
- [3] H.J. Blaß, C. Sandhaas, Timber Engineering Principles For Design, KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, 2017. <https://doi.org/10.5445/KSP/1000069616>.
- [4] M.U. Pedersen, Dowel Type Timber Connections, 2002.
- [5] E. Frühwald Hansson, Analysis of structural failures in timber structures: Typical causes for failure and failure modes, Engineering Structures. 33(2011) 2978–2982. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.02.045>.
- [6] E. Frühwald, E. Serrano, T. Toratti, A. Emilsson, S. Thelandersson, Design of safe timber structures – How can we learn from structural failures in concrete , steel and timber? Design of safe timber structures – Report TVBK-3053, 2007
- [7] Hill, R. (1948). A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences, 193(1033), 281-297
- [8] Hoffman, O. (1967). The brittle strength of orthotropic materials. Journal of Composite materials, 1(2), 200-206.
- [9] Oudjene, M., & Khelifa, M. (2009). Elasto-plastic constitutive law for wood behaviour under compressive loadings. Construction and Building Materials, 23(11), 3359-3366.
- [10] Eslami, H., Jayasinghe, L. B., & Waldmann, D. (2021). Nonlinear three-dimensional anisotropic material model for failure analysis of timber. Engineering Failure Analysis, 130, 105764.
- [11] Quinteros-Mayne, R.; de Artega Jorda, I.; Cabrero, J.C. Constitutive model for the analysis of the behavior and mechanics of wood damage, in: eccomas2022. URL https://www.scipedia.com/public/Quinteros-Mayne_et_al_2022a
- [12] Iraola, B.; Cabrero, J.M.; Gil, B. Pressure-overclosure law for the simulation of contact in spruce joints, World Conference on Timber Engineering, At Vienna, 2016.
- [13] T. Reynolds, R. Harris, W.-S. Chang. An analytical model for embedment stiffness of a dowel in timber under cyclic load Eur J Wood Wood Prod, 71 (5) (2013), pp. 609-622. <https://doi.org/10.1007/s00107-013-0716-1>
- [14] B. Iraola, J.M. Cabrero, M. Basterrechea-Arévalo, J. Gracia, A geometrically defined stiffness contact for finite element models of wood joints. Engineering Structures, Volume 235, 2021, 112062, ISSN 0141-0296, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112062>.

1158

SPOR X – 10-STOREY TIMBER OFFICE BUILDING, DRAMMEN, NORWAY

Kathleen Overton¹

¹ Degree of Freedom

Palabras clave / Palavras-chave:

BIM, BREAM_NOR, Connections, Cross-laminated timber, Fabrication, Fire

Resumen / Resumo:

SporX is a ten-storey office building in Drammen, Norway. Timber, the main structural material, was chosen at the start of the project as being a readily available local material. The use of timber supported the ambition for maximum sustainability and to achieve a BREAM-NOR Outstanding certification. Another advantage was to minimise the building loads at a riverside location with poor ground conditions. Based on an optimal architectural layout, SporX makes use of timber elements, both glued laminated and cross-laminated, for all load-bearing structure above ground floor. Two large central cross-laminated timber cores, combined with two façade shear walls, act as bracing elements for the 600m² floor plate giving a robust timber structural solution designed for R90 fire resistance. The element removal method is used to resist progressive collapse. Timber connections are made using fully threaded, cylindrically headed, wood screws and proprietary concealed connectors. BIM was used by all disciplines for design coordination and to produce a digital twin controlled throughout the construction process. Timber structural elements were fabricated from a LOD400 BIM model developed by Degree of Freedom. Fabrication with strict tolerances allowed for a rapid construction process. Larger element sizes were chosen as having design advantages both for robustness and for connections design.

1. Introduction

Degree of Freedom were responsible for the structural design of SporX, an innovative, ten-storey, timber-framed office building. The building, in Drammen, Norway, is adjacent to both the river, as shown in Figure 1, and the main train station, and was conceived by the architects, Dark, to become the most sustainable office building in Norway. The use of structural timber as a low-carbon construction material was therefore a fundamental part of the project from the start. This paper describes the advantages of using timber compared to more standard solutions in concrete or steel, for all the main load bearing elements above ground level and the particular design challenges associated with timber buildings.



Figure 1. SporX - location.

Key aspects and challenges related to the design, modelling, fabrication, and construction process are explained. There is a focus on design aspects where special attention was needed including fire design, connection details, horizontal sway, vibrations and progressive collapse.

2. Design principles

2.1. Architectural concept

The architectural intent was for a sustainable office building and as the building's location has excellent links to public transport only the provision of bicycle parking was needed. Features such as this, combined with the use of timber as the main structural material were key to achieving the BREEAM-NOR Outstanding certification. Harvested responsibly, and in this case locally, timber is arguably one of the best tools both architects and engineers have for reducing greenhouse gas emissions and storing carbon in buildings. Timber, as a construction material also has inherent benefits for the health and well-being of the building users, for the environment and for the construction process. Advantages include reducing CO₂ emissions and construction time whilst maintaining a competitive overall cost.

Architecturally an aesthetically pleasing interior design can be achieved taking advantage of the exposed structure as seen in Figure 2.



Figure 2. Interior showing exposed timber surfaces.

2.2. Structural concept

Below the main building is a single storey reinforced concrete basement founded on steel HP piles to bedrock at a depth of approximately 100m. The use of timber was shown to give a 50% cost saving for the foundation design due to the reduced overall building loads. The architectural requirement for two large cores servicing a relatively small floor plan allowed the original concrete core walls as planned at concept design phase to be substituted by cross-laminated timber (CLT) shear walls. Additional CLT shear walls were introduced on the two side façades to increase the stiffness in the weaker direction. Glulam timber “columns” reinforce both the corners of the cores and the ends of the shear walls. The structural grid is 4.85m with vertical loads transferred via CLT floor slabs to a system of double glulam beams and columns as can be seen during construction in Figure 3. The CLT floor slabs act as diaphragms for the transfer of horizontal actions to the shear walls. At ground level all loads, both horizontal and vertical are transferred to the concrete substructure. This load transfer is one of the key details in timber building design.



Figure 3. SporX under construction showing the exposed structural frame.

3. Structural design

The building is designed in accordance with the relevant Eurocodes to the Norwegian National Annexes [1, 2].

For consideration of progressive collapse, the building is classified as consequence class 2b (upper risk group) [3] for an office building less than 15 storeys. The structure allows for the notional removal of columns and beams. Double-storey height columns, triple-storey height CLT walls, continuous façade beams and triple-span CLT floor slabs enhance the structural redundancy and result in a robust overall design. This also minimises the number of connections.

A finite element model in SAP2000 of the complete timber structure was used for the verification of both the mass timber elements and for the connections. This model enabled aspects related to the structural design to be considered including:

- Timber as an orthotropic material.
- Orthotropic panel build-up for CLT.

- Connections slip modulus, k_{serv} .
- Nonlinearity.
- Imperfections.
- Fire design situation.

Timber structures are commonly governed by the Serviceability Limit State, both for vertical and horizontal deflections and vibrations. The design of the 180mm thick CLT floor slabs, spanning 4.85m, was governed by deflection and vibration criteria. The inclusion of the slip modulus for all timber connections was critical for evaluating the overall sway of the structure under horizontal loads.

Well defined and predicable fire behaviour is an intrinsic property of mass timber elements. All the principal structural elements are designed to guarantee a load bearing resistance for 90 minutes in the fire design situation, R90. The structural timber elements are partially or completely exposed to fire.

SporX contains many different connection types, both timber-timber and timber-concrete. A combination of both bespoke connections and proprietary connectors were used, as shown in Figure 4.



Figure 4. Timber to concrete connection – CLT panel and glulam column

4. Building information modelling

The project used the most up to date BIM methods during both design and construction. A digital twin was also created and during construction a weekly scan was used to control non-conformances by comparison with the digital twin. A LOD400 timber fabrication model was produced on behalf of the Contractor.

5. Conclusions

The design of SporX uses a traditional building material, timber, as the load bearing structure for a ten-storey office building. It takes advantage of BIM modelling for the timber elements that can then be prefabricated with strict tolerances for a rapid construction process. The timber frame was erected over a period of 15 weeks. The result is an innovative building that makes the best use of a traditional building material with the most up to date construction aids with the use of BIM and precision fabrication.

Acknowledgement

The realisation of this project is thanks to a dedicated design team including the architects, DARK Arkitekter. The completion of the project has been in collaboration with the main contractor, Betonmast and the timber fabricator, Splitkon. Additional photos by Zinc/Thomas Mellbye.

References

- [1] NS-EN 1995-1-1:2004+A1:2008+NA:2010 Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings.
- [2] NS-EN 1995-1-2:2004+NA:2010 Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-2: General - Structural fire design.
- [3] NS-EN 1991-1-7:2006+NA:2008 Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-7: General actions - Accidental actions.

1159

A PROPOSED STANDARDIZATION FRAMEWORK FOR RECOVERED TIMBER STRENGTH GRADING

Daniel F. Llana¹; Daniel Ridley-Ellis²; Goran Turk³; Guillermo Íñiguez-González¹

¹ Universidad Politécnica de Madrid

² Edinburgh Napier University

³ University of Ljubljana

Palabras clave / Palavras-chave:

Circular Economy, Non-destructive testing, Reclaimed, Reuse, Salvaged, Secondary timber

Resumen / Resumo:

An increasing quantity of wood is recovered from demolitions, presenting opportunities for enhanced value through reusing or recycling in structural uses. Prior to utilizing timber for structural applications, it is essential to subject it to a grading process. The recovered timber often falls short of meeting the standard requirements for new timber grading define in the standards EN 14081, especially timber source identification. Even if it manages to meet these standards, the rejection rate is likely to be quite high. A new standardize framework different than the current new timber framework is needed for recovered timber grading. The present work explains the issues taking into account for that standard proposal, like combine machine grading and visual parameters, avoid defining new strength classes for recovered timber using instead a resistance profile of 3 or 4 properties code and visual override aspects not detected for machine and mainly from carpentry joints origin. Furthermore, some features not related with timber mechanical properties as nails, dimensions, etc. but affecting reusability possibilities are discussed.

1. Introduction

The demolition industry produces a significant volume of material waste, including wood that possesses potential for reuse in structural applications, and European Union policies actively promote circularity through the reuse of materials from demolition and long-term carbon storage in wood construction [1]. Recovered timber is so variable (sizes, ages, irregular cross-sections, deterioration, prior grading, market value etc.) (Fig. 1). To be able to safely reutilize recovered timber for structural purposes, it is necessary to strength grade it beforehand.

In Europe there are two methods for timber strength grading: visual grading and machine grading [2]. In Europe, both methods are regulated by the Harmonized Standard EN 14081 series [3-5] which establishes the framework for visual strength grading standards and machine grading settings. The approach of EN 14081 requires that species and source (grown area) should be controlled in both cases. In the case of new timber, species and source information is easily available. However, in the case of recovered timber, it is expensive to

identify species and it is uncommon to have records about timber source. EN 14081 is also limited to rectangular cross-section, with only the exception of wane (up to 1/3 of the edge or face dimension). This is not really affecting mechanical properties and is often difficult to achieve it in recovered timber. Furthermore, visual and machine control grading require large testing campaigns, with representative sampling covering all aspects of the species, growth area and variation of the resource. In the case of visual grading, the number of specimens is usually higher than 250 and in the case of machine grading it must be at least 450. This approach for recovered wood would need also to take into account the additional factor of time, and the amount of testing required would surely be disproportionate to the size and value of the resource, if not completely impossible. EN 14081 also requires that the effects of any prior grading are taken into account, but for recovered wood, previous grading is common (e.g. Fig. 1d) and the essential details are usually unknowable, and information about the originally assigned grade is not sufficient to ensure that the remaining timber still fulfils the requirements of that.

The goal of strength grading is to assign strength classes, which are sets of values of the timber's physical and mechanical properties that can be used for design calculations, usually according to EN 338 [6]. The current strength classes system was developed to fit mainstream modern softwood and hardwood resources. Relation between stiffness, strength and density is different for new and recovered timber. In the case of recovered timber, is known that stiffness remains likely unchanged by load history, but strength can be lower than in new timber [7].

Taking into account previously aspects mentioned, recovered timber should be treated differently than new timber and not mixed with it for strength grading. It would not be possible or appropriate, to fulfil the requirements of EN 14081, and even in cases where it can be could be done, the resource would not be graded efficiently; rejecting a high proportion of still useful timber [8]. Therefore, there is a need to establish a novel standardization framework for recovered timber, taking into account differences in the resource and utilization, complementary to EN 14081 so that the timber can be mixed in end use.

The objective of the present work is to propose criteria for development of a standardization framework for recovered timber grading.



Figure 1. Recovered timber: a) Salzmann pine from 1769, Spain; b) European oak more than 150 years old, Spain; c) Norway spruce from 1949, Slovenia; d) Norway spruce from 1982, Ireland. Source: GICM-UPM.

2. Recovered timber grading proposal

Based on previous research, and knowing recovered timber characteristics, a fixed set of strength classes for recovered timber will not be proposed. Recovered timber properties should instead be described by the combination of three grade determining values (resistance profile): strength, stiffness and density, and indicators for basis (bending or tension) and secondary properties profile (at least softwood or hardwood, but possibly with more types).

The proposed framework for recovered timber grading cannot currently assign mechanical properties values (strength classes or resistance profile) due to lack of data, and limitations on what can be safely assumed from the accumulated knowledge of new timber. The methodology proposed here should be applied on test sets of recovered timber from species and sources to determine the resistance profile in each specific case.

The main idea is to combine machine grading methods with some visual parameters, to develop estimation models for mechanical properties. Dynamic modulus of elasticity can be obtained from several machines on the market. An easy, cheap, quick and reliable non-destructive testing (NDT) technique is longitudinal vibration, but others can be used. The knot parameters and the slope of grain are among the most prevalent visual factors significantly influencing estimation models. A large amount of recovered timber specimens will be rarely available for developing estimation models. It should develop from fewer specimens that in the case of new timber with appropriate accounting for uncertainty [9]. However, if there is safety concern, the possibility to adjust the partial factor for material properties can be analysed.

In the same way that using machine grading in new timber, some features that are not detected by the machine should be controlled through a visual override. In the case of recovered timber, holes, notches and mortises from traditional carpentry joints are commonly features creating at least a cross-section reduction.

3. Reusability aspects

Other aspects, not affecting physical and mechanical properties, but limiting timber reusability, should be taken into account:

- Dimensional: the irregular cross-section and especially short length are restricting the possibilities of reuse.
- Commonly, specimen ends are rotten and should be removed with the consequent length reduction.
- High warp values can affect building possibilities and workability.
- Metals inside timber, usually rusty nails and screws, are difficult to detect and remove and affect workability.
- Hazardous substance treatments are difficult to identify and safely remove, but are an increasing concern. For example, in UK there is a new protocol to analyse wood waste looking for twenty potential hazardous substances [10].

4. Conclusions

Recovered timber cannot be graded by following current standards as if it was new timber. It also does not make sense to adapt standards to grade new and recovered timber together on a common basis, and this is not necessary for making the timber compatible for end use. A new standardization framework for recovered timber is needed in order to increase reuse and recycling rates in demolition activities, reducing and valorising residues.

A set of strength classes for recovered timber cannot usefully be defined, if optimization of recovered products is the goal. Recovered timber properties could instead be described by encoding the combination of the three grade determining properties, basis (bending or tension) and secondary properties profile. Fundamentally this is not different to the existing system for new timber, but one or more new secondary properties profiles may need to be developed.

Recovered timber grading should be carried out by a combination of NDT and visual parameters. To achieve this, estimation models should be developed including NDT variables and some visual parameters, when significant.

Fewer specimens than in new timber should be used to develop properties' estimation models. If there is a safety concern about it, the possibility to adjust the partial factor for recovered timber products in structural calculations could be explored, but this can also be achieved with more conservative characteristic strengths.

Reusability aspects non affecting mechanical properties should be also taking into account.

Acknowledgement

The RECOVERS project has received funding from the European Union's Horizon 2020 Research and Innovation Programme under the Marie Skłodowska-Curie grant agreement No. 101025786. The TiReX project (ForestValue2 Joint Call 2023) has received funding from European Union's Horizon Europe under grant agreement No. 101094340. The TiReX project has received funding in Spain from MICIU-Spain [PCI2024-153432]. The InFutUReWood project was supported under the umbrella of ERA-NET Cofund ForestValue and has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No. 773324. The InFutUReWood project has received funding in Spain from MICIU-Spain [PCI2019-103544]. The InFutUReWood Project was funded in UK by the Forestry Commissioners. The InFutUReWood Project was funded in Slovenia by the Ministry of Education, Science and Sport of Slovenia.

References

- [1] European Commission 2020. A new Circular Economy Action Plan. COM/2020/98 final, EUR-Lex - 52020DC0098.
- [2] Ridley-Ellis, D.; Stapel, P.; Baño, V. (2016) Strength grading of sawn timber in Europe: an explanation for engineers and researchers. Eur. J. Wood Prod. 74:291-306. <https://doi.org/10.1007/s00107-016-1034-1>

- [3] European Standard (2011) EN 14081-1:2005+A1:2011. Timber Structures - Strength Graded Structural Timber with Rectangular Cross Section - Part 1: General Requirements. European Committee of Standardization (CEN), Brussels, Belgium. (EN 14081-1:2016+A1:2019 is not the harmonized version)
- [4] European Standard (2022) EN 14081-2:2018+A1:2022. Timber structures - Strength graded structural timber with rectangular cross section - Part 2: Machine grading; additional requirements for type testing. CEN, Brussels, Belgium.
- [5] European Standard (2022) EN 14081-3:2022. Timber structures - Strength graded structural timber with rectangular cross section - Part 3: Machine grading; additional requirements for factory production control. CEN, Brussels, Belgium.
- [6] European standard (2016) EN 338:2016. Structural timber - Strength classes. CEN, Brussels, Belgium.
- [7] Cavalli, A.; Cibecchini, D.; Togni, M.; Sousa, H.S. (2016) A review on the mechanical properties of aged wood and salvaged timber, *Constr. Build. Mater.* 114:681–687. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.001>.
- [8] Llana, D.F.; Íñiguez-González, G.; Plos, M.; Turk, G. (2023) Grading of recovered Norway spruce (*Picea abies*) timber for structural purposes. *Constr. Build. Mater.* 398:132440. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132440>
- [9] Weidenhiller, A.; Ridley-Ellis, D.; Neumüller, A. (2023) Non-parametric lower confidence bounds for the fifth percentile – EN 14358 in comparison to a fully non-parametric approach. In *Proceedings of the World Conference on Timber Engineering (WCTE)*. June 19-22. Oslo, Norway. Pp. 735-739. <https://doi.org/10.52202/069179-0101>
- [10] Wood Recyclers' Association - WRA (2023) Waste Wood Classification - Frequently Asked Questions on Demolition Waste Wood once RPS250 is removed from 1st September 2023. <https://woodrecyclers.org/wp-content/uploads/FAQs-on-Demolition-Waste-Wood-for-RPS250-Removal.pdf> (accessed 28.11.2023).

1160

STRUCTURAL BAMBOO CULMS IN THE CURRENT EUROPEAN REGULATORY CONTEXT

Jaime E. Espinosa¹

¹ Universidad Politécnica de Madrid

Palabras clave / Palavras-chave:

Bamboo, European standards, ISO structural bamboo standards, Structural design

Resumen / Resumo:

Due to its carbon sequestration performance, bamboo is a crucial partner for human being development. This paper analyses the literature related to characterization, performance and standardization of structural bamboo culms, as well as the literature related to structural building codes, including those national codes which already reflect structural bamboo culms, in order to address the important question of whether the current European regulatory context allows structural bamboo culms to be used. Although it is evident the need of design guides in relation to fire, international standards and national building codes regarding structural bamboo culms provide the sufficient information to safely use bamboo culms as structural elements in Europe, given that the Structural Eurocodes and other codes that coexist with them (such as the Spanish CTE) are performance-based. Building fire safety is incorporated in building codes through a combination of passive and active features, such as fire-rated building elements or appropriate means of egress, and like fire detection and extinction systems. Because of this, despite the research still needed to get to know better bamboo culms as structural material, it is proven that structural bamboo culms are allowed to be used within the European regulatory context, even as permanent building structure.

1. Introduction

Bamboo is a crucial partner for human being development. Even more in these times of global warming, due to its carbon sequestration performance, when it is becoming increasingly urgent to make of bamboo the substitute for other materials which environmental impact cannot be afforded at the current rate much longer, such as plastic or cement, particularly considering the impact of the building industry in terms of carbon. The president of the European Commission, Ursula Von der Leyen, explicitly mentioned bamboo as a key material in the European Green Deal [1].

In experimental applications, mostly temporary structures, as well as in permanent structures, bamboo culms used as structural elements have demonstrated over the last decades that the real potential of this material is yet to be achieved. As a natural material which has not been researched as extensively as other industrial materials, there is an immense amount of research ahead in order to get to know more accurately bamboo culms as structural material. The present paper addresses the important question of whether or not structural bamboo culms are allowed to be used in the current European regulatory context.

2. Methodology

The methodology followed in the research presented in this paper is descriptive, exposing characteristics of the phenomenon being studied, and deductive, from a general and logical reasoning, based on laws and principles, to a concrete fact. Therefore, it is a logical method used to draw conclusions from a set of principles.

It consists on the critical analysis of the available literature related to characterization, performance and standardization of structural bamboo culms on the one hand, and its comparative analysis in relation to building codes regarding structural design, as well as national codes already reflecting structural bamboo culms, on the other.

3. Results

3.1. Structural bamboo culms: standards and codes

Research has been conducted on the existence of codes and standards regarding structural bamboo culms [2-4] making little or confusing distinction, if at all, between engineered bamboo products and structural bamboo culms. It is particularly relevant to emphasize the difference between the two products, engineered bamboo and bamboo culms, because of the extremely different environmental impact they have: engineered bamboo has higher carbon emissions than cement or engineered lumber [5] whereas structural bamboo culms may have a positive impact for the environment in terms of carbon sequestration and energy embodiment when harvested before becoming over-mature [6].

In addition to this, the transformation process from a living plant to a building product is much more accessible from a socio-economic perspective when the products are structural bamboo culms than when they are structural engineered bamboo, because the former needs mostly workforce and the latter needs heavy machinery and adhesive products.

3.1.1. Shift of paradigm with ISO 22156:2021, ISO 22157:2019 and ISO 19624:2018

In 2004, the first edition of ISO standards on bamboo from a structural perspective was published. It consisted on two volumes, ISO 22156:2004 – *Bamboo – Structural design* and ISO 22157:2004 – *Bamboo – Determination of physical and mechanical properties*. Despite the fact that it was the first international attempt to approach bamboo culms as structural products and to develop a structural design standard for them while providing guidelines to characterize particular bamboo species, it was still not possible to perform a proper structural design for any building based on those first published ISO standards.

However, in 2013 the revision procedure starts, resulting in a suite of materials and design standards for full-culm bamboo: ISO 19624:2018 – *Bamboo structures – Grading of bamboo culms* [7], ISO 22157:2019 – *Bamboo structures – Determination of physical and mechanical properties of bamboo* [8], and ISO 22156:2021 – *Bamboo structures – Bamboo culms – Structural design* [9]. The adoption of widespread methods, familiar to engineers, overcome the previously existing obstacles to adopt structural bamboo culms for construction.

Two approaches are permitted by ISO 22156:2021: “Allowable load-bearing capacity design” (ACD) and “allowable stress design” (ASD). ACD approach needs the application of ISO 19624:2018 to determine moment capacity for each grade previously assigned to members capacity, whilst ASD is based on material properties previously tested as defined in ISO 22157:2020. The possibility of developing column axial load tables and beam flexural load tables based on the practical use of ISO 19624:2018 and ISO 22156:2021 have been already demonstrated [10].

3.1.2. NSR-10: the Colombian precedent

In 2010 was approved the Colombian code for seismic-resistant structures, NSR-10 [11]. It includes a specific chapter on bamboo structures built with the most common species in Colombia, *Guadua agustifolia Kunth*, or *Guadua*.

NSR-10 utilizes ASD based on previous characterization on *Guadua* using NTC 5525 [12], the Colombian national code equivalent to the ISO 22157:2020 standard. As a matter of fact, NTC 5525 is an adopted modified version of ISO 22157:2004. Therefore, NSR-10 is considered a precedent of applying ASD approach, allowed by ISO 22156:2021, in combination with ISO 22157:2020, taking *Guadua* as the subject species. Moreover, NSR-10 is the reference taken by Ecuador [13] and Peru [14] to adopt their own national structural bamboo code.

3.2. European regulatory context

Structural Eurocodes, which are used in most European countries, are performance-based codes. Even though Eurocodes are widely adopted within European countries, there are some countries where the Eurocodes are the only regulatory texts (i.e., France, Germany, United Kingdom, Netherlands or Denmark), whereas in other countries the Eurocodes coexist with other regulatory texts, i.e., Italy or Portugal. Finally, there are a few countries, like Spain or Switzerland, where national codes prevail over the Eurocodes. The Technical Building Code (or “*Código Técnico de la Edificación*” in Spanish) CTE, applicable in Spain, is also a performance-based code.

In Spain there is no need for a certain material or constructive system to be explicitly included in the code in order to be implemented in a building project, as long as a competent technician justifies that its performance fulfils the requirements in the code and provides the specifications to meet them. There are attached documents to the core of the code tackling mainstream practices, called Basic Document (“*Documento Básico*”, DB). In the structural realm, it includes documents regarding masonry, steel and timber. Concrete is not included among the DB-SE because there is a complementary norm which treats it: the CE or Structural. Thus, up to date there are four structural materials explicitly considered in the CTE regulatory context: Steel, masonry, timber and concrete.

3.2.1. Italy, forefront in the use structural bamboo culms in Europe

In European soil, besides the celebrated ZERI Pavilion in the Expo Hannover 2000 [15], there is another significant built sample of structural bamboo culms, this one still standing over twenty years after completion, is the Vergiate Pavilion, north of Milan [16]. Built between September 2002 and June 2003 covering an area of 32 by 16 meters.

According to Donini et al. [17], it is feasible to design a building using structural bamboo culms in compliance with the Italian standard context [18] as long as it is supported by the international standard on structural bamboo culms [9] because it regulates characteristic and design values of bamboo, as well as correction factors, at the same time that it indicates how to verify performance of bamboo culms and their connections. Nevertheless, it is evident the need of design guides in relation to fire.

3.2.2. The critical issue of performance in case of fire

A critical aspect in the structural design of a building is to rate its structural performance in case of fire. Mena et al. [19] state a charring rate of 0.24 mm/min when use as finishing element and 0.20 mm/min when use as structural element for Guadua, but after only two tests. As Correal [20] says, building fire safety is incorporated in building codes through a combination of passive features, such as prescriptive measures of fire-rated building elements or appropriate means of egress, and active features, like fire detection and extinction systems.

Despite the lack of research to assess performance of exposed bamboo culms in the event of fire, as Kaminski et al. [21] observed, a gypsum-based plasterboard with a minimum thickness of 24 mm provides a 60 minutes fire resistance rate or FRR. The document in the CTE related to fire resistance of walls, ceilings and doors that delimitates fire sectors [22] allows a 60 minutes FRR for above ground residential, educational and administrative buildings, up to 15 m tall.

4. Discussion

The existing international standards and national building codes regarding structural bamboo culms provide the sufficient information to safely use bamboo culms as structural elements in Europe, given that the Structural Eurocodes and other codes that coexist with them, such as the Spanish CTE, are performance-based codes. As a natural resource which has not been as extensively researched as industrial materials have, there is an immense amount of work ahead in order to get to know better bamboo culms as structural material. However, it is proven that structural bamboo culms are allowed to be used within the current European regulatory context, even as permanent building structure.

Acknowledgement

The researcher acknowledges his thesis director, Professor María Josefa “Pepa” Cassinello, for her trust and guidance, as well as Professor Francisco Arriaga, Gonzalo Medina and Javier López-Quiles for their continuous support.

References

- [1] https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/AC_20_1916.
- [2] Gatóo, A.; Sharma, B.; Bock, M.; Mulligan, H.; Ramage, M. (2014) Sustainable structures: Bamboo standards and building codes. In proceedings of the Institute of Civil Engineers: Engineering Sustainability. Volume 167 Issue ES5. Pp. 189-196.

- [3] Adier, M. F. V.; Sevilla, M. E. P.; Valerio, D. N. R.; Ongpeng, J. M. C. (2023) Bamboo as Sustainable Building Materials: A Systematic Review of Properties, Treatment Methods, and Standards.
- [4] Amede, E. A.; Hailemariam, E. K.; Hailemariam, L. M.; Nuramo, D. A. (2021) A Review of Codes and Standards for Bamboo Structural Design. *Advances in Material Science and Engineering*. Pp. 1-9.
- [5] Xiaoxiao Xu, Peiyu Xu, Jianjun Zhu, Haitao Li, Zhenhua Xiong. Bamboo construction materials: Carbon storage and potential to reduce associated CO₂ emissions, *Science of The Total Environment*, Volume 814, 2022, 152697, ISSN 0048-9697. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152697>.
- [6] Liese, W. (1998) The Anatomy of Bamboo Culms. INBAR Technical Report.
- [7] International standard (2018) ISO 19624:2018. Bamboo structures – grading of bamboo culms. International Organization of Standards (ISO), Geneva, Switzerland.
- [8] International standard (2019) ISO 22157:2019. Bamboo structures – determination of physical and mechanical properties of bamboo culms. International Organization of Standards (ISO), Geneva, Switzerland.
- [9] International standard (2021) ISO 22156:2021. Bamboo structures – bamboo culms – structural design. International Organization of Standards (ISO), Geneva, Switzerland.
- [10] Harries, K. A.; Trujillo, D.; Kaminski, S.; Lopez, L. F. (2022) Development of load tables for design of full-culm bamboo. *European Journal of Wood and Wood Products* 80. Pp. 621-634.
- [11] ICONTEC (2010) NSR-10: Reglamento Colombiano de Construcción Sismorresistente. Capítulo G-12: Estructuras de Guadua. ICONTEC, Bogotá, Colombia.
- [12] ICONTEC (2007) NTC 5525: Métodos de Ensayo para Determinar las Propiedades Físicas y Mecánicas de la Guadua angustifolia Kunth. ICONTEC, Bogotá, Colombia.
- [13] INEN (2011) Capítulo 17 – Utilización de la Guadua Angustifolia Kunth en la Construcción. Norma Ecuatoriana de la Construcción. INEN, Quito, Ecuador.
- [14] ICG (Instituto de la Construcción y Gerencia) (2012) Reglamento Nacional de Edificaciones, Section III. 2 Code E100 – Diseño y construcción con bambú. ICG, Lima, Peru.
- [15] Dethier J. The ZERI pavilion. In: von Vegesack A, Kries M, editors. *Grow your own house*. Balingen, Germany: Vitra Design Museum; 2000. p. 14–52.
- [16] Vantomme, P.; Braulin, N.; Chioetto, V.; Liese, W. (2003) Public constructions made with bamboo: lessons learnt from the ‘Vergiate bamboo pavilion’ in Northern Italy. *Journal of Bamboo & Rattan*, Vol. 2, No. 4. Pp. 369-380.
- [17] Donini, G.; Greco, S.; Molari, L.; Zanetti, A. (2022) Structural design of an Italian bamboo house in an Italian regulatory context: Revisiting a small building built in Costa Rica with tropical bamboo. *Case Studies on Construction Materials* 16 e00891. Pp. 1-10.
- [18] NTC 2018, Norme tecniche per le costruzioni, Italian standard.
- [19] Mena, J.; Vera, S.; Correal, J. F.; Lopez, M. (2011) Assessment of fire reaction and fire resistance of Guadua angustifolia Kunth bamboo. *Construction and Building Materials* 27. Pp. 60-65.

- [20] Francisco F. Correal, 19 - Bamboo design and construction, Editor(s): Kent A. Harries, Bhavna Sharma, In Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, Nonconventional and Vernacular Construction Materials (Second Edition), Woodhead Publishing, 2020, Pages 521-559, ISBN 9780081027042. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102704-2.00019-6>.
- [21] Kaminski, Sebastian & Lawrence, Andrew & Trujillo, David. (2016). Design Guide for Engineered Bahareque Housing. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.19916.82569>.
- [22] CTE (2019) Documento Básico – Seguridad en caso de incendio. Ministerio de Fomento, Madrid, Spain.

1161

STUDY OF FOREST MANAGEMENT CYCLES FOR CONSTRUCTION MATERIAL IN PAKISTAN THROUGH AN UNDERSTANDING OF JAPAN'S MATERIAL FLOW ANALYSIS FROM FORESTS

Sonaila Qazi¹; José Amorim Faria²

¹ Faculty of Engineering of the University of Porto

² Construct/Gequalte, Faculty of Engineering of the University of Porto

Palabras clave / Palavras-chave:

Supply and demand; Timber; Building material; Forestry; Material sourcing; Sustainability

Resumen / Resumo:

With the construction industry's heavy reliance on timber as a more sustainable source of building material, it is imperative that the accompanying analytical data is also present. This article finds its inspiration in an article published in OSLO WCTE2023 Congress by two Japanese researchers of Kagoshima University (1). According to those authors, in Japan, timber constitutes 58.7% of the total building materials found in the country, the life cycle of which has been widely transparent (1). This process is divided into four major segments i.e. forestry, manufacturing, building and disposal. By combining this data with the greenhouse gas emissions produced in every stage of the cycle, the researchers paved the way for a better understanding of the sustainability aspect of timber. The paper then discusses the division of that same material into domestic production or landfill results. This type of data is important to study and analyze in different contexts to understand the full environmental impact of timber. And finally, a segment on carbon content flow gives us details on where and how the total carbon content in the process functions (1).

In this review paper, Japan is presented as the baseline to compare the supply and demand chain of Pakistan's timber industry. Since Pakistan lacks a clear annual report of their material sourcing cycle in the forestry industry, this review weaves together an analysis that goes beyond statistics, giving us information from the annual climate change reports (2), furniture manufacturing (7) and matchstick manufacturing data (9). This gives us insight into the production of usable construction material and its consequent forest management.

In 2022, the United Nations Framework Conventions on Climate Change regarded Pakistan's Forest Reference Emissions Level (FREL) as transparent and code compliant, paving the way for further studies done on that idea (2).

This paper thus attempts to compile the material flow and management data with Pakistan's unique landscape as a step towards a comprehensive life cycle database for the consequent building materials.

1. Introduction

The recognition of the significance of wood and forest products, characterized by environmental attributes like renewability and carbon storage capacity, is widespread in the context of contemporary sustainable development. Specifically, the role of carbon storage in forests and wood products is acknowledged as a crucial factor in addressing climate change (1).

Building on this perspective, the following review is anchored in an article focusing on material flow analysis and the carbon footprint of forest resources in Japan.

The methodology employed follows the framework of the Japanese study, involving an inventory analysis of the forest resource situation in Pakistan.

This analysis considers a wealth of available information, prioritizing data fidelity. The result is the construction of a comprehensive flowchart depicting the flow of forest resources, emphasizing quantities, greenhouse gas emissions, and carbon content flow.

2. Material flow analysis of forest resources in japan

In their comprehensive study, Wang and Takano (2023) meticulously examined the material flow and carbon footprint associated with forest resources in Japan, with a specific focus on building materials. The study involved the intricate development of holistic flowcharts derived from an extensive inventory. After this thorough analysis, the authors engaged in a detailed discussion, addressing challenges and highlighting potential opportunities from both resource and environmental perspectives.

Another driving factor was the scarcity of studies in Japan on how forests impact the environment. The study aimed to fill this gap and provide a comprehensive overview of Japan's forests, exploring how they are managed, used in manufacturing, integrated into construction, and involved in waste management processes.

To structure their study, the authors first defined the system boundaries based on the modularity principle of a building life cycle - EN 15978:2011. This involved four distinct phases: Product Stage (A), Use Stage (B), End-of-life stage (C), and Benefits and loads beyond the system boundaries (D).

The research development included a crucial and detailed inventory based on statistical data published by relevant authorities, such as the Japanese Ministry of Environment and other significant entities. This inventory was categorized into four sectors of study interest: Forestry, Manufacturing, Building, and Disposal, each interconnected respectively.

For each sector, the authors developed detailed and illustrative Material Flow Analysis (MFA), GHG emission flow, and Carbon Content flow of forest resources. The presentation included meticulous information for Forestry, Manufacturing, Building, and Disposal.

The results revealed key challenges in Japan's forest resources, including a large amount of unmanaged forest wood waste, a low replanting ratio, and a lack of monitoring on supply-demand relationships. The study predicts a decrease in the sustainability of forests by 2025 due to greater domestic production.

Regarding GHG emissions, the major contributors were identified as imported products, waste management, and timber processing.

3. Overview of timber flow in khyber pakhtunkhwa, pakistan

Pakistan's Forestry Sector Review 2019 (5) categorized forest products as timber and fuelwood, trees on farmland, non-timber forest products and medicinal plants. Out of these, timber and fuelwood were the major harvesting products.

According to the review, there is a lack of a standardized documentation plan for all provinces of Pakistan, because the critical statistical data on supply and demand remains outdated as the projection analysis of the forest supply was done by Forest Sector Project Pakistan in 1992, with little to no updates ever since, (5).

In 2017, it was reported that the forest cover from the Khyber Pakhtunkhwa province in the North-West of Pakistan has the capacity to sequester up to 6001 million tons of CO₂, emitting 6.4 million tons from timber extraction specifically. In case the 'Billion Trees Afforestation Project' is successful, the same area will have the potential to sequester more than 200 million tons of CO₂.

Because of illegal harvesting practices, it is challenging to give an accurate estimate of the annual yield of timber. The actual yield from state-controlled forests in 2013 was 0.3468 million m³. After including import yields, the total regulated supply amounts to 0.735 million m³. It is important to note that 5.38 million m³ of timber is also supplied by farmlands. Considering the population growth of the region, per capita consumption of timber has been calculated to be .032 m³/person. By contrast, the demand for timber in the country is 6.06 million m³, (5).

This disparity in the flow chain is evident in the cost of the material resource as well as the availability. In a report focusing on the GDP share of Pakistan's wood products, almost 95 percent of timber demands are met from farmlands (6).

The review suggests a reduction in demand as well as an increase in supply of wood harvesting to tackle this issue, while also highlighting the political and legal barrages to achieving those goals resulting in illegal activities and theft, which is majorly driven by the demand for timber and fuelwood.

The conclusions at the governmental levels are divided into extraneous, institutional, implementation and technical issues as well as valuation of resources, scarcity of funds and issues of climate change. The review also points to the logistical issues of the lack of data and misaligned priorities for municipalities (5).

4. Overview of pakistan's timber flow, an academic review

The two major wood products in Pakistan are timber and firewood. According to the land cover atlas of Pakistan, in 2012, the forest area is majorly categorized into the Khyber Pakhtunkhwa province's 1.51 million ha. out of a total of 4.5 million ha. The three sources of wood supply are state forests, private farmlands and imports out of which farmlands produce 50 percent of timber and 90 percent of firewood used.

The study focuses on key parameters of forest area, wood stock, and population growth, presenting five frames: population, wood yield, forest area, sources of wood supply, and wood consumption. Validation of the two major variable frames, wood consumption and population growth, is achieved through trend and period comparisons. A relationship diagram emphasizes the dependency of timber

consumption on wood extraction, contingent on forest area and wood stock reduction. This connectivity remains consistent over the years, despite annual changes. The categorization of wood consumption into firewood and construction industries reveals a supply breakdown from state forests, farmlands, imports, and some illegal harvesting, with farmlands dominating.

Projections indicate an increase in forest area from 3.46 million ha in 1990 to 5.98 million ha in 2040. However, the validity model signals a concerning decline in wood stock from 368 million m³ in 1990 to 232 million m³ in 2040 due to extensive wood extraction. Farmland-based wood supply is expected to rise from 22.5 million m³ to 64.1 million m³, creating a noticeable demand-supply gap. Availability from state forests is projected to decrease from 3.2 million m³ to 1.5 million m³, reflecting a significant drop between 1994 and 1998.

Wood consumption trends for the commercial and industrial sector project an increase from 5.2 million m³ in 1990 to 12.8 million m³ in 2040. Considering the population's influence, particularly in household firewood consumption, the projected gap between sustainable wood supply and consumption is estimated at 53.8 million m³ in 2040.

The paper recommends increasing forest area and farmland growth to address the demand and supply gap, ultimately emphasizing the impact of population growth. Three sources of wood supply; state-owned forests, farmlands, and imports are considered, with declining imports increasing pressure on farmlands and state-owned sources. The dominance of firewood at 81.3 percent in total wood consumption, with timber at 18.7 percent, underscores the significance of understanding consumption patterns. Furthermore, the study aids in estimating illegal wood harvesting in the country through the demand-supply gap analysis. (8)

5. Academic review – Pakistan

By reviewing the source and resource flow of timber, we can aim to understand the impact of such vital construction materials on various sectors of sustainability including harvesting, carbon sequestration and material waste.

Considering the literature review, (6), (7) and (8), the authors propose certain issues that need to be highlighted in the attempt to create an authentically sustainable material flow. One of the biggest factors in the disparity of the process is the demand and supply gap. Apart from the suggestions given by the governmental or academic articles, which is to increase supply and lower demand, the authors suggest a focus on reusable timber as a viable supply of construction material.

Additionally, through restoration and adaptability processes, historical and existing structures can be exempt from the demand of newly created timber for their renovation or adaptable reuse. This practice may allow us to integrate practices of modern construction systems and solutions with the reuse of reclaimed timber and restoration of existing construction systems.

6. Conclusions

Considering the studies done for this article, the groundwork can be laid out for further research on the timber material supply and demand details, and material flow in the Northern region of Pakistan.

This may create certain policies to achieve an annual audit of the resources for a better understanding of its impact throughout the life cycle of the product, with a view on increasing the impacts on sustainability on the studied region of Pakistan.

Acknowledgement

We thank the master degree in "Sustainable Construction and the Management of the Built Environment" - MBUILD from the programme Erasmus Mundus, co-funding by European Union that provided the opportunity of scholarships to enrolled in this high degree education.

References

- [1] Holgium W.; Takano A.; (2023) Material Flow Analysis and Carbon Footprint of Forest Resources in Japan: A Case Study on Building Materials. WCTE2023 Proceedings, Oslo 19th-23rd June 2023. Available at: <https://doi.org/10.52202/069179-0112>
- [2] Ministry of Climate Change, Government of Pakistan (2022). Forest Reference Emissions Levels. Available at: https://redd.unfccc.int/media/1._unfccc_frel_pakistan__final_with_proofread_-_final.pdf.
- [3] Komiyama Y.; Ito, S.; Takayama S.; Ota M. (2023). Circular Timber Construction Report. Available at: https://www.obayashi.co.jp/woodvision/pdf/circular-timber-construction_report_eng_ver.pdf
- [4] Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2019) Forestry Sector Review: Pakistan. Available at: <https://doi.org/10.4060/ca4869en>.
- [5] Ullah, N.; Bano, S. A.; Habiba, U.; Sabir, M.; Akhtar, A.; Ramzan, S.; Shoukat, A.; Israr, M.; Shah, S.; Nizami, S. M.; Hussain, M. (2021). Environmental Impacts, Water Footprint and Cumulative Energy demand of match industry in Pakistan. Available at: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0251928>
- [6] Ali, F. et al. (2024). Environmental Sustainability Assessment of Wood Consumption and Wood Shortage in Pakistan. Brazilian Journal of Biology, 84. Available at: doi:10.1590/1519-6984.253107.
- [7] Nazir, N., Olabisi, L.S. and Ahmad, S. (2018) Forest Wood Consumption and Wood Shortage in Pakistan: Estimation and Projection through System Dynamics, The Pakistan Development Review, 57(1), pp. 73–98.
- [8] Ullah, N. et al. (2021). Environmental impacts, water footprint and cumulative energy demand of match industry in Pakistan', PLOS ONE, 16(5). Available: doi:10.1371/journal.pone.0251928.

1162

SUBTERRANEAN TERMITES CONTROL MANAGEMENT IN URBAN AREAS IN SPAIN. EXAMPLE OF MANAGEMENT IN THE OLD TOWN OF VIGO, SPAIN

David Lorenzo¹; Alfonso Lozano Martínez-Luengas²; Manuel Touza³, Josu Benito-Ayúcar⁴

¹ DL - FP Timber Consulting;

² University of Oviedo

³ CIS Madeira

⁴ TECNALIA

Palabras clave / Palavras-chave:

Termites, Wood, Attacks, Buildings, Urban areas, Standard

Resumen / Resumo:

Termites are wood destroying insects always present in the nature with an important wood decomposition function. In Europe are located in the Mediterranean area. In Spain termites are an important problem in urban areas. It is estimated about 80% of old historic towns in Spain are affected by subterranean termite attacks and it is the most important damage in wood structures and wood elements. The activity of termites can cause serious damages in structural elements (beams, slabs, roofs, etc.), carpentries (frame doors, doors, frame windows, windows, etc) and other wood elements (altarpieces, furniture, stairs, handrails, etc.) even with risk of collapse in some cases. In the buildings of urban areas (mainly old towns), subterranean termites have the best conditions (temperature and humidity) to attack structures and other wood elements in the buildings. It is necessary to find solutions about the problem of subterranean termites in urban areas in Spain, promoting laws and standards with the collaboration among: authorities, universities, research institutions, technicians and experts in termites. As a result of this situation, a new Spanish standard UNE 56418:2016 “*Protocol of action in urban areas affected by the attack of subterranean termites*” has been developed and published. This paper shows a real case of subterranean termites control management in urban areas in Spain, showing the example of application of this standard in the management of the old town of Vigo, where there are several problems and attacks of subterranean termites in the buildings. As a result of this situation, local authorities have decided to apply the standard and the result after five years of control management has been very satisfactory.

1. Introduction

Termites are wood destroying insects always present in the nature with an important wood decomposition function, affecting also wood and wood-based products indoors and outdoors. Around the world there are more than 2,000 termite species (figure 1), located mainly in tropical and subtropical climates. In

Europe, there are termites (subterranean and dry wood termites) in the Mediterranean area (figure 2), thanks to the warm weather. In these southern areas of Europe, termites are a very important problem due the damages that produce in buildings with structures, carpentries and elements in wood and wood-based materials. Furthermore, in the last decades there is an advance of termites to the north areas of Europe due the climate change. Across Spain is very common to find termites, but in the last years there is a proliferation of attacks of subterranean termites and also dry wood termites, in the buildings and in the urban areas (mainly in the old towns) thanks to the human activity (water pipes, heating, etc.) as well as the abandoned of the people of the old towns with the consequence of no maintenance of the old buildings and finally with a changing climate in Spain with warmer temperatures in winter time instead of cold weather. So, in the buildings of urban areas, mainly old towns, subterranean termites have the best conditions (temperature and humidity) to attack structures and other wood elements inside the buildings. As a result of this situation, a new Spanish standard UNE 56418:2016 “Protocol of action in urban areas affected by the attack of subterranean termites” has been created by the core group “Termite Experts” belonging to Subcommittee 4 S4: “Wood Protection” of the Spanish Standardization Technical Committee AEN/CTN56 “Wood and Cork”. This new standard has been published by AENOR as standard UNE in 2016 and from this time is applied in urban areas affected by subterranean termites.

2. Standard UNE 56418: 2016 “Protocol of action in urban areas affected by subterranean termite attacks”.

This standard is protocol or action plan, which indicate the systematized steps when there are subterranean termite attacks in urban areas, affecting buildings (old and new buildings with structural, carpentries and other wooden elements) and surroundings. The action plan of the protocol is divided in 4 phases (table 1):

Protocol	Phases		Description	Agents	Duration
Action Plan	Activation		Activation of the action plan	Authorities	Immediately
	Diagnostic	Pathological	Study of the termites pest in the urban area	Specialized companies in wood pathology studies	< 1 year
		Structural	Structural studies of affected buildings	Expert technicians in wood structures	
	Treatment		Treatments against subterranean termites	Specialized termite pest control companies	≤ 5 years
	Maintenance and vigilance		Monitoring	Specialized termites pest control companies	

Table 1. Protocol of the standard UNE 56418:2016.

3. Example of management in the old town of Vigo, Spain

In the old town of Vigo (Spain), since forever there are several and important problems, attacks, etc., with subterranean termites in the buildings. Old town of Vigo is composed mainly for old buildings, most of them abandoned and several buildings are in very bad conservation conditions (no maintenance, humidity problems, etc.). These buildings keep the old wooden structures and carpentries (pitch pine, chestnut, oak, eucalyptus, maritime pine, etc.). Some buildings have been restored using wood and wood-based products (spruce and Scot pine mainly) in structures and carpentries. In the area there are also small gardens and yards with frequent presence of wood.

4. Results

Regarding the application of the standard UNE 56418:2016 “Protocol of action in urban areas affected by the attack of subterranean termites”, in the case of the old town of Vigo affected by termites, from the first moment with the activation of the plan and diagnostic phase up to the end of the treatment, the result is very satisfactory with the application of protocol. The action plan of protocol must was activated, all information about termites was compiled and the old town was delimited (figure 2). In the old town, a total of 110 buildings as well gardens, yards, green areas and streets were studied. The result of this diagnostic is showed in the following table (table 2):

Buildings studied	Buildings with termites		Buildings without termites			
	Buildings (N°)	Buildings (%)	High risk (n°)	High risk (%)	Low risk (N°)	Low risk (%)
110	31	28%	23	21%	56	51%

Table 2: Results of the buildings studied in the old town of Vigo.

5. Discussion

Most of old historic towns and urban areas with wood elements in Spain are affected by subterranean termite attacks, being the most important damage in wood structures and carpentries, in old buildings (Cathedrals, palaces, churches, buildings, etc.) and even in new constructions too. In the buildings of urban areas (mainly old cities), subterranean termites have the best conditions (temperature and humidity) to attack structures and other wood elements in the buildings. The attacks of termites can cause serious damages in structural elements (beams, slabs, roofs, etc.), carpentries (frame doors, doors, frame windows, windows, etc) and other wood elements (altarpieces, furniture, stairs, handrails, etc.), with a risk of collapse of the buildings.

References

- [1] EN 350 (2016): “Durability of wood and wood-based products - Testing and classification of the durability to biological agents of wood and wood-based materials”.
- [2] EN 335 (2013): “Durability of wood and wood based products. Use classes: definitions, application to solid wood and wood-based products”.
- [3] EN 460 (1995): “Durability of wood and wood-based products- Guide to the durability requirements for wood”.
- [4] CTE (2009). Spanish Building Technical Code.
- [5] UNE 56418 (2016): “Protocol of action in urban areas affected by subterranean termite attacks”.
- [6] Suttie, E. European Project PerformWOOD. Performance standards for wood in construction-delivering customer service life needs. FP7-NMP-2012-CSA-6.
- [7] Suttie, E. European Project ClickDESIGN. Delivering fingertip knowledge to enable service life performance specification of wood. FP7.

1163

SUSTAINABLE TRANSFORMATION IN CONSTRUCTION: PROPOSAL OF SPECIFIC GOOD PRACTICES BASED ON GENZERO INITIATIVE IN THE UK

Md Imtiaz Ahmad¹; Jaime Augusto Jesus Cunha¹; Mathiyas Thatal¹; José Amorim Faria¹

¹ FEUP

Palabras clave / Palavras-chave:

Cross-laminated timber, LCA, Massive wood, Net-Zero, Prefabrication, Sustainability, Schools, UK

Resumen / Resumo:

The use of Massive Wood in construction has the potential to significantly reduce greenhouse gas emissions and contribute to the ambitious net-zero targets of several countries. In the last decade, the United Kingdom has developed some very interesting initiatives for sustainability applied to secondary schools. The “GenZero” prototype and “New Modern Schools” (NMS) define new principles for contemporary design with low carbon emission and energy efficiency during the building’s lifetime. This research presents case studies of schools in the UK built with the Mass Timber Concept, demonstrating energy efficiency and adherence to sustainability goals. Comparative analysis with traditional construction methods emphasizes the advantages of integrating Cross Laminated Timber (CLT) early in the design process. The study concludes by advocating for widespread adoption of CLT construction, urging increased support from governments and industry stakeholders to create a sustainable and resilient built environment. This paper aims to present the mentioned UK studies as a good basis for research to propose examples of specific good practices in the direction of increasing sustainability in the building construction industry using massive Wood.

1. Introduction

For millennia, timber has been a staple in construction. The dominance of extracted materials like iron and aggregates, driven by rapid industrialization, overshadowed timber in architectural and engineering designs. Recent advancements in fixing and manufacturing technologies, however, have ushered in a new era for large mass timber products, starting with laminated timber beams and expanding to other types, notably cross-laminated timber (CLT).

These engineered timber products (ETP) present an opportunity to construct high-performance, cost-effective buildings with minimal environmental impact, aligning with principles of sustainability and circular resource use. Mass timber, challenging the prevailing steel and concrete design, could potentially revolutionize construction methods by embracing inherent renewability while meeting performance expectations. Exploring broader adoption may unveil systemic benefits extending beyond individual buildings. [1]

In response to the imperative of reducing greenhouse gas emissions in construction, a pilot project in the UK focused on school buildings proposes a novel construction methodology using timber elements. This innovative approach aims to significantly decrease the carbon footprint associated with construction activities. This paper delves into case studies of prefabricated engineered timber schools in the United Kingdom, providing insights into their strengths and constraints. Additionally, the paper conducts analyses to quantify the energy savings achieved during both the construction phase and the operational lifespan of these timber-based structures.

Those lines of research open the path to resuming good practices in design for sustainability, using timber, which is presented in this paper.

2. Uk initiatives for sustainable building

The United Kingdom Government committed to archive net-zero emissions by 2050. To define this concept, one of the developed missions is called “GenZero”, which aligns with the Royal Institute of British Architects, 2030 Climate Challenge, and the London Energy Transformation Initiative. Those initiatives aim to facilitate the rapid construction and efficiency of the school’s development, reducing construction-related disruption and waste. The concept ‘GenZero,’ involves the development of a standardized design incorporating a research-driven approach, with insights gathered from post-occupancy. The design focuses on sustainability, comfort, and well-being, anticipating climate change impacts and incorporating features such as passive cross ventilation and large windows for natural light.

A modular construction approach allows for flexibility, using a standardized kit of components, designed digitally, ensuring efficient and cost-effective construction. The primary construction material is wood, selected for its structural qualities, aesthetic appeal, and positive environmental impact. Three basic school profiles were defined, and customizable, based on a standardized grid layout. These profiles cater to various educational needs, from core curriculum to STEM/vocational programs. The modular design allows for 72 different standard school types, with most of each building made from prefabricated panels.

To accomplish a sustainable attitude, the project aims to use net-negative carbon emissions, the design emphasizes energy efficiency, incorporating the following features: heat pumps, natural ventilation, and onsite energy generation through photovoltaic cells.

3. Case 01: mass timber for schools

In the past years a study was developed regarding the Mass Timber applied in schools, presenting the well-being benefits, how to design, the costs, and the manufacturing applied to it. Constructing with wood can improve the health, well-being, creativity, and performance of students and teachers by creating biophilic spaces that reduce stress and connect with nature. It also enhances indoor air quality, humidity control, acoustics, and virus protection of school buildings. It was proved by a study produced of a biophilic classroom that showed that students felt significantly more positive, relaxed, calm, focused, and involved in their learning, and had a 3.3 times higher gain in average test scores, [3], see Figure 1.

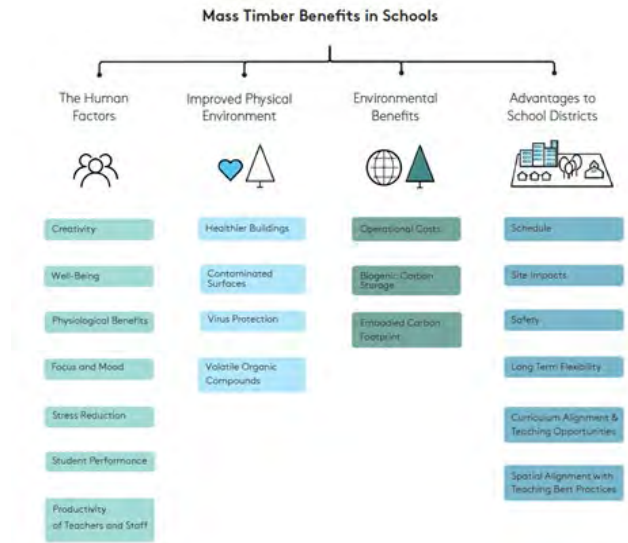


Figure 01: Representation of mass timber benefits in schools [3]

Some advantages of constructing in mass timber are the reduction of construction time, site impacts, and costs, lowering the embodied carbon footprint, biogenic carbon storage, and operational energy use of school buildings, contributing to climate change mitigation and adaptation. Different types of mass timber products: cross-laminated timber (CLT), dowel-laminated timber (DLT), glue-laminated timber (Glulam), and mass plywood panel (MPP), and their applications in schools, are described by a kit-of-parts approach that uses a framework derived from an optimized balance of efficient timber fiber volumes and classroom program and allows for customization and adaptability to suit various learning pedagogies, see Figure 2, [3].

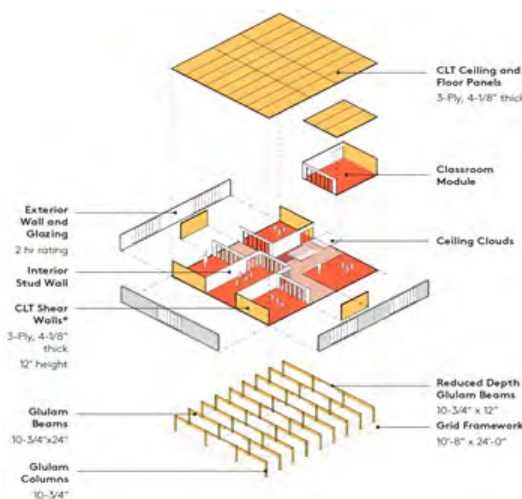


Figure 02. Reducing the volume of wood fiber by using 3-ply CLT panels for floors and ceilings is a key factor in the success of the kit-of-parts. [3]

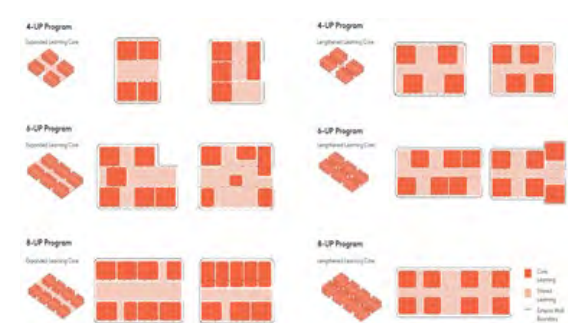


Figure 03. Framework and kit-of-parts of Schools - schematic view

The total building costs and embodied carbon impacts of mass timber versus steel and concrete structures were compared, showing that mass timber is cost-competitive and has a significant reduction in carbon emissions. As an example, a study carried out of 100 mass timber buildings in the UK showed an 80% reduction in truck deliveries for the building structure and a 50 to 70 percent reduction in site staff for structural framing.

The framework and kit-of-parts maximize adaptability to serve a wide range of teaching pedagogies and learning area requirements. It is designed to expand, and contract based on the desired amount of shared learning space and the number of classrooms. Possible adaptability variations are shown here, [3], see Figure 3.

4. Case 02: primary school by cambridge

In 2019, the UK Government pledged to utilize off-site construction and timber-based approaches for new school buildings, targeting efficient and minimally disruptive procurement as well as scalability challenges. The initiative intended to showcase timber's carbon sequestration capabilities in line with net-zero emissions objectives, simultaneously driving a transformation in construction through digital design and manufacturing. [4]. Engineered timber structures utilize prefabrication and off-site manufacturing. Elements are produced in a manufacturing facility, processed with CAD/CAM software for precise connections, and assembled on-site to form the primary structure. Fabrication facilities ensure consistency and minimal errors in construction. [5]

In context to the challenge in timber construction, conventional joints like nails, glue, and brackets exhibit weaknesses, particularly in multi-story structures, affecting both structural strength and environmental sustainability. Researchers suggest an innovative approach: by rubbing timber pieces together, natural polymers are activated, creating a robust bond within 2-3 seconds without the need for extra ingredients, see Figure 6. Collaborating with the Robotics Facility is intended to automate and enhance the process for widespread use, effectively tackling structural and environmental hurdles in timber construction. [4]

Scientists made a significant advancement by developing a process that integrates 3D modeling and robotic cutting, leading to flexible wood. Drawing inspiration from kerfing and origami techniques, the goal was to construct structures that could be transported as flat wood sheets, thereby cutting transport expenses, and allowing on-site shaping for durable and reusable designs. The intricately machine-cut timber structures highlight the impressive flexibility attainable using a single sheet of engineered timber. These designs, lacking any fasteners, depend entirely on precision-cut patterns, reminiscent of origami techniques.

5. Conclusion

The integration of Massive Wood in school construction, as demonstrated by projects such as “GenZero” and “New Modern Schools” in the United Kingdom, presents a sustainable and environmentally conscious solution to reduce greenhouse gas emissions and achieve net-zero targets. Research shows that schools built with mass timber not only adhere to sustainability goals, but also positively impact the health, well-being, and academic performance of students and teachers. Additionally, mass timber

construction proves to be cost-competitive and significantly reduces carbon emissions compared to traditional methods. Governments and industry stakeholders are urged to provide increased support for initiatives promoting sustainable and resilient built environments, as the integration of Massive Wood represents a paradigm shift towards a more environmentally friendly and socially beneficial approach to construction.

References

- [1] A. Campbell, “Mass timber in the circular economy: Paradigm in practice?” *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Engineering Sustainability*, vol. 172, no. 3, pp. 141–152, 2018, doi: 10.1680/jensu.17.00069.
- [2] Department of Education, “Genzero - The Prototype,” <https://www.genzero.co.uk/the-prototype>.
- [3] Craig Curtis *et al.*, “Mass Timber Schools: Building for Wellness,” 2022.
- [4] University of Cambridge, “Precision Engineered Timber - Digital design and delivery of healthier schools,” <https://www.cdbb.cam.ac.uk/research/digital-built-environment/precision-engineered-timber-digital-design-and-delivery-healthier>.
- [5] A. Koronaki, A. Bukauskas, A. Jalia, D. U. Shah, and M. H. Ramage, “Prefabricated engineered timber schools in the United Kingdom: Challenges and opportunities,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 13, no. 22, 2021, doi: 10.3390/su132212864.
- [6] M. H. Ramage *et al.*, “The wood from the trees: The use of timber in construction,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 68, pp. 333–359, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.09.107.
- [7] PLP Architecture, “Unfolding features in the London Design Biennale 2021,” <https://plparchitecture.com/unfolding-features-in-the-london-design-biennale-2021/>.

1164

TABLEROS A BASE DE CHAPAS DE MADERA DE PINO RADIATA REFORZADOS CON FIBRAS DE INGENIERÍA Y ADHESIVOS

Mario Núñez-Decap¹; Marcela Vidal-Vega¹; Boris Moya-Rojas¹; Camila Opazo-Carlsson¹; Gerson Rojas-Teman¹

¹ Universidad del Bío-Bío

Palabras clave / Palavras-chave:

Fibra de basalto, Fibra de carbono, Polivinil acetato, Resina epóxica, Tablero contrachapado, Tablero microlaminado

Resumen / Resumo:

El cambio climático es uno de los principales factores que influyen en la investigación de materiales amigables con el medio ambiente. Por ello, se ha investigado el uso de fibras de ingeniería como técnica de refuerzo de la madera para mejorar sus propiedades mecánicas. Este resumen presenta los resultados obtenidos a partir de una investigación sobre el uso de fibras de ingeniería de basalto y de carbono como refuerzo de tableros contrachapados y microlaminados, utilizando los adhesivos polivinil acetato y resina epóxica a escala de laboratorio. Se realizaron ensayos de hinchamiento por inmersión en agua durante 48 horas, flexión estática y dureza Janka, cuyos resultados se compararon con tableros patrones no reforzados, resultando una disminución en hinchamiento del 18% para los tableros contrachapados reforzados con fibra de basalto y 19% para los tableros microlaminados reforzados con fibra de carbono y polivinil acetato, en términos de rigidez y resistencia a la flexión se vio un aumento del 45% y 49% en tableros contrachapados reforzados con fibra de carbono y resina epóxica en dirección perpendicular de la fibra, respectivamente y del 31% y 38% en tableros microlaminados reforzados con fibra de carbono y resina epóxica en dirección cara de la probeta. Además, un aumento del 35% y 41% en la resistencia a la dureza Janka, se vio en los tableros contrachapados reforzados con fibra de carbono y polivinil acetato y en los tableros microlaminados reforzados con fibra de carbono y resina epóxica, respectivamente.

1. Introducción

La presente investigación intenta resolver un problema que está relacionado con el bajo rendimiento físico-mecánico de las chapas de madera de Pino Radiata en comparación con los principales materiales de construcción que se utilizan en la actualidad, como el acero y el hormigón.

Dado lo anterior, la principal oportunidad a abordar en esta investigación es mejorar el rendimiento físico-mecánico de tableros contrachapados y microlaminados para aplicaciones estructurales mediante la incorporación de fibras de ingeniería de alto rendimiento como refuerzo. Aunque el adhesivo PVAc no tiene aplicaciones estructurales, se pretende compararlo con la resina epóxica, para saber si el PVAc podría ser una alternativa no tóxica para el refuerzo de tableros contrachapados.

2. Materiales y metodología

2.1. Materiales

Las chapas de madera de la especie *Pinus radiata* D. DON, las fibras de ingeniería de basalto (FB) y de carbono (FC) y los adhesivos polivinil acetato (PVAc D4) y resina epóxica bi-componente (RE), fueron provistos por el Laboratorio de Productos de Ingeniería a base de Madera y Adhesivos (PRODIMA-LAB), de la Universidad del Bío-Bío.

2.2. Metodología

2.2.1. Fabricación de tableros contrachapados y microlaminados reforzados

Los tableros contrachapados (PLY) y microlaminados (LVL), se fabricaron a partir de 5 y 7 chapas de madera con adhesivo fenol formaldehído y con 1 y 2 láminas de fibra de ingeniería, respectivamente. En tableros LVL, la primera fibra se ubicó sobre la superficie del tablero flexo-traccionada y la segunda entre la penúltima y última chapas del tablero (Figura 1-a), mientras que en tableros PLY, se ubicó una lámina de fibra en la superficie flexo-traccionada. Por cada tipo de tablero, se fabricaron 4-5 muestras reforzadas; FB-PVAc, FB-RE, FC-PVAc, FC-RE y una muestra patrón no reforzada (P).

2.2.2. Propiedades físicas

Para medir las propiedades físicas de los tableros fabricados, se midieron las siguientes propiedades según normativas europeas: densidad (UNE-EN 323), contenido de humedad (UNE-EN 322) e hinchamiento (UNE-EN 317), además se midió el perfil de densidad de las probetas según cada muestra.

2.2.3. Propiedades mecánicas

Para medir las propiedades mecánicas de los tableros fabricados, se midieron las siguientes propiedades según normativas europeas: flexión estática de tres puntos para PLY (UNE-EN 310), flexión estática de cuatro puntos para LVL (UNE-EN 408) (Figura 1-b) y dureza Janka (ASTM D1037) (Figura 1-c).

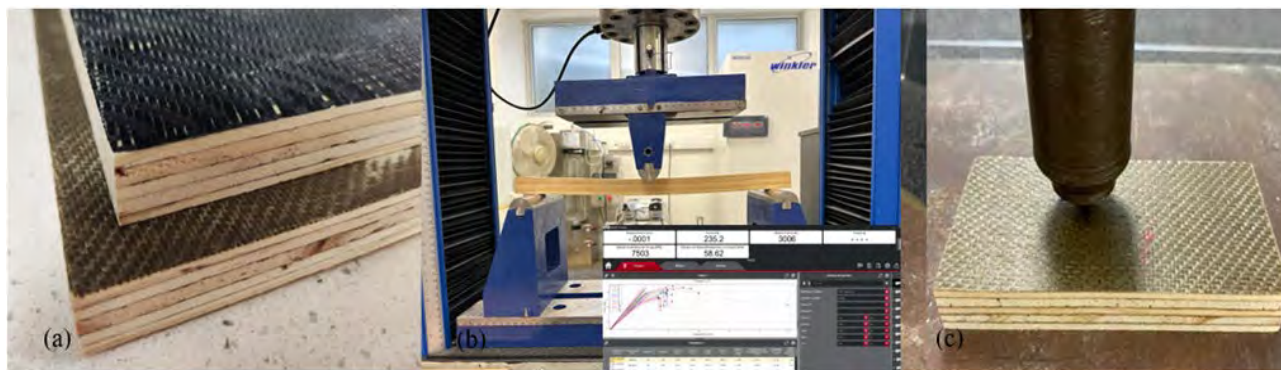


Figura 1. (a) Tableros microlaminados reforzados con fibras de ingeniería; (b) Ensayo de flexión estática en tablero contrachapado; (c) Ensayo de dureza Janka sobre tablero contrachapado reforzado con fibra de basalto.

3. Análisis de resultados

3.1. Propiedades físicas

Las densidades de las muestras de tableros contrachapados se encontraron dentro del rango de 436 – 554 kg/m³, mientras que las densidades de las muestras de tableros microlaminados se encontraron dentro del rango de 530 – 585 kg/m³. Los contenidos de humedad de las muestras de ambos tipos de tableros se encontraron dentro del rango de 8-12%, lo que se considera dentro del rango normal. Los resultados de hinchamiento a 24 horas (Tabla 1), en tableros contrachapados fueron entre 5.02–5.48%, mientras que en tableros microlaminados fueron entre 0–1.26%. En tableros contrachapados, no se observaron diferencias estadísticamente significativas entre la muestra patrón y las muestras de tableros reforzados, mientras que en los tableros microlaminados, se observó una mejora en la estabilidad dimensional en todas las muestras reforzadas en comparación a la muestra patrón.

3.2. Propiedades mecánicas

Los resultados de las propiedades mecánicas de flexión estática y dureza Janka en muestras de tableros contrachapados y microlaminados reforzados y no reforzados, se encuentran en la Tabla 1.

Sobre las propiedades de flexión en tableros contrachapados, los resultados de módulo de elasticidad (MOE) y de módulo de rotura (MOR) se encuentran en un rango de 3372 – 4898 MPa y de 34.65 – 52.95 MPa, respectivamente, para la dirección paralela y en un rango de 2675 – 4066 MPa y de 25.08 – 50.89 MPa, respectivamente, para la dirección perpendicular. Los resultados de Dureza Janka en tableros contrachapados, se encuentran en un rango de 1866 – 3354 N. Sobre las propiedades de flexión en tableros microlaminados, los resultados de MOE y de MOR se encuentran en un rango de 6248 – 8190 MPa, respectivamente, para la dirección cara y en un rango de 8386 – 11476 MPa, respectivamente, para la dirección canto. Los resultados de dureza Janka en tableros microlaminados, se encuentran en un rango de 2886 – 4186 N. En cuanto a la rigidez en tableros contrachapados, se observó aumento de 29%, 46% y 52% en las muestras FB-RE, FC-PVAc y FC-RE (perpendicular). Mientras que en los tableros microlaminados, se observó un aumento de 30%, 36%, 16% y 14% en las muestras FC-RE (cara), FB-RE (canto), FC-PVAc (canto) y FC-RE (canto), respectivamente. En cuanto a la resistencia a la flexión en tableros contrachapados, se observó un aumento de 49% y 53% en las muestras FC-PVAc y FC-RE (paralelo) y un aumento de entre 58% y 103% en todas las muestras reforzadas en el sentido perpendicular. Mientras que en los tableros microlaminados, se observó un aumento de 38%, 29% y 9% en las muestras FC-RE (cara), FB-ER (canto) y FC-RE (canto), respectivamente. Los resultados obtenidos se ven validados por los autores Núñez-Decap et al [1], Núñez-Decap et al [2], Auriga et al [3], Wang et al [4], y Rescalvo [5].

En cuanto a la máxima fuerza que resistieron los tableros contrachapados a la dureza Janka, se observó un aumento de entre 38% y 80% en todas las muestras reforzadas. Mientras que en los tableros microlaminados, se observó un aumento de 41% y 31% en las muestras FC-ER y FC-PVAc, respectivamente.

Los valores obtenidos de la carga máxima del ensayo de dureza Janka tienen concordancia con lo mencionado en la investigación de Núñez-Decap et al [2], en donde todas las muestras reforzadas ensayadas, soportaron una carga máxima más alta que la muestra patrón no reforzada.

Tabla 1. Propiedades físico-mecánicas de los tableros contrachapados y microlaminados.

Tablero	Muestra	Dirección fibra	Hinchamiento 24 horas (mm)		MOE (MPa)		MOR (MPa)		Dureza Janka (N)	
			Prom.	D.S.	Prom.	D.S.	Prom.	D.S.	Prom.	D.S.
Tablero contrachapado	P-PLY	Paralela	5.08 ^c	1.01	3372 ^{ab}	422	34.65 ^a	4.68	1866 ^a	181
		Perpendicular			2675 ^a	190	25.08 ^a	1.48		
	FB-PVAc-PLY	Paralela	5.48 ^c	1.04	4192 ^{ab}	724	44.65 ^{ab}	5.63	2968 ^{bcd}	406
		Perpendicular			3188 ^{ab}	529	43.81 ^b	3.75		
	FB-ER-PLY	Paralela	5.03 ^c	0.98	3680 ^a	351	47.40 ^{ab}	2.97	2621 ^{bc}	317
		Perpendicular			3453 ^{bc}	531	39.52 ^b	5.95		
	FC-PVAc-PLY	Paralela	5.02 ^c	1.57	4739 ^b	948	51.47 ^b	10.15	3354 ^d	380
		Perpendicular			3900 ^{bc}	322	50.89 ^c	2.24		
	FC-ER-PLY	Paralela	5.15 ^c	0.89	4998 ^{ab}	381	52.95 ^b	4.49	2567 ^b	219
		Perpendicular			4066 ^c	305	42.89 ^b	7.68		
Tablero microlaminado	P-LVL	Cara	1.26 ^b	0.93	6274 ^c	2001	62.69 ^c	14.31	2960 ^{bcd}	522
		Canto			8442 ^d	1353	59.14 ^{de}	8.56		
	FB-PVAc-LVL	Cara	0.00 ^a	1.03	6857 ^c	626	63.09 ^c	5.63	2886 ^{bcd}	537
		Canto			8386 ^c	1065	58.71 ^d	8.29		
	FB-ER-LVL	Cara	0.66 ^{ab}	0.41	6248 ^c	2033	64.20 ^c	13.47	3091 ^{cd}	466
		Canto			11476 ^f	984	76.08 ^g	4.87		
	FC-PVAc-LVL	Cara	0.60 ^{ab}	0.64	7303 ^{cd}	967	69.89 ^c	7.43	3892 ^c	747
		Canto			9754 ^e	979	64.38 ^{ef}	8.59		
	FC-ER-LVL	Cara	0.74 ^{ab}	0.45	8190 ^d	2740	86.27 ^d	18.31	4186 ^e	664
		Canto			9626 ^e	672	64.72 ^f	9.40		

Los promedios de las columnas están marcados con diferentes letras (a, b, c, d, e, f y g) para indicar la diferencia estadística determinada por la prueba LSD con un nivel de confianza del 95%.

4. Conclusiones

En general, se concluye que las muestras reforzadas con fibra de ingeniería alcanzan resultados mejores o iguales en las propiedades físico-mecánicas evaluadas en comparación a sus respectivas muestras patrones no reforzadas.

En tableros contrachapados, hubo un aumento de hasta un 52% (FC-RE) en el MOE en comparación a la muestra patrón, en la dirección perpendicular. Las muestras FC-PVAc y FC-RE presentaron un aumento de hasta un 53% en el MOR de la muestra patrón en dirección paralela, mientras que, en la dirección perpendicular, todas las muestras reforzadas presentaron un aumento en el MOR de hasta un 103% (FC-PVAc) respecto de la muestra patrón. En cuanto al ensayo de dureza Janka, todas las muestras de tableros contrachapados reforzadas presentaron un aumento de hasta 80% respecto de la muestra patrón. En tableros microlaminados, la muestra FC-RE presentó un aumento de 30% y 38%, en MOE y MOR, respectivamente, en la dirección cara. Mientras que en la dirección canto, la muestra FB-RE presentó un aumento de 36% y 29% en el MOE y en el MOR, respectivamente. Sobre el ensayo de dureza Janka, las muestras de tableros microlaminados reforzadas con fibra de carbono presentaron una resistencia a la dureza de hasta 41% mayor respecto de la muestra patrón.

Agradecimientos

Nos gustaría agradecer la colaboración, equipamiento e infraestructura provista por el Laboratorio de Productos de Ingeniería a base de Madera y Adhesivos (PRODIMA-LAB), del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad del Bío-Bío. Además, agradecemos al proyecto ANID BASAL FB210015.

Referencias

- [1] M. Núñez-Decap, B. Sandoval-Valderrama, C. Opazo-Carlsson, B. Moya-Rojas, M. Vidal-Vega, and A. Opazo-Vega, "Use of Carbon and Basalt Fibers with Adhesives to Improve Physical and Mechanical Properties of Laminated Veneer Lumber," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 18, p. 10032, 2023.
- [2] M. Núñez-Decap, Y. Barra-Rodríguez, C. Opazo-Carlsson, B. Moya-Rojas, M. Vidal-Vega, and A. Opazo-Vega, "Use of Carbon and Basalt Fibers with Adhesives to Improve Physical and Mechanical Properties of Plywood," *Applied Sciences-Basel*, vol. 12, no. 10, May 2022, Art no. 5114, doi: 10.3390/app12105114.
- [3] R. Auriga *et al.*, "Performance properties of plywood composites reinforced with carbon fibers," *Composite Structures*, vol. 248, p. 112533, 2020/09/15/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112533>.
- [4] J. Wang, X. Guo, W. Zhong, H. Wang, and P. Cao, "Evaluation of Mechanical Properties of Reinforced Poplar Laminated Veneer Lumber," *BioResources; Vol 10, No 4 (2015)*, 2015.
- [5] F. J. Rescalvo, R. Duriot, G. Pot, and A. Gallego, "Mechanical behaviour of poplar laminated veneer lumber with fiber reinforced polymer under shear and compression stresses," *Wood Material Science & Engineering*, pp. 1-9, 2022, doi: 10.1080/17480272.2022.2086819.

1165

TALLER DE INVESTIGACIÓN Y PROYECTOS ARQUITECTÓNICOS: DISTRITOS DE INNOVACIÓN EN MADERA PARA CHILE

Juan José Ugarte¹; Juan Acevedo¹; Andrés Sierra¹

¹ Centro Nacional de Excelencia para la Industria de la Madera (CENAMAD), Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile

Palabras clave / Palavras-chave:

Enseñanza de tecnologías de la madera, Teoría de la educación, Educación arquitectónica

Resumen / Resumo:

El Taller de Investigación y Proyecto “Distritos de Innovación en Madera”, desarrollado en el Magíster en Arquitectura Sustentable y Energía de la Pontificia Universidad Católica de Chile (MASE UC), propone para las tesis-proyecto de sus estudiantes un campo de experimentación que va y viene entre la formación de un profesional especializado en madera y un intelectual capaz de mirar la dimensión cultural de su obra, entregando valiosas herramientas para la vida profesional, vinculando teoría y práctica.

Desde la premisa de la existencia de una escala adecuada para la nueva construcción con maderas -el distrito- y los dos principales impulsores de la construcción con este recurso renovable -sustentabilidad y productividad- los estudiantes diseñan, en la primera parte, planes maestros para ciudades o suburbios de tamaño intermedio, bien comunicados, dirigidos a una nueva generación de profesionales que son conscientes de una necesaria buena relación con el medio ambiente y que aspiran a una mejor calidad de vida gracias al teletrabajo y la oferta laboral actual que lo hace posible. En la segunda parte, más extensa, diseñan un edificio de madera en mediana altura y uso mixto que -con criterios de estructuras, sostenibilidad y gestión de la construcción- será capaz de acoger esta nueva demanda.

1. Introducción

El Magíster en Arquitectura Sustentable y Energía de la Pontificia Universidad Católica de Chile (MASE UC), es un programa de posgrado de carácter mixto -profesional y académico- que permite a sus egresados trabajar en un entorno profesional con competencias para dar respuestas valiosas a los temas de sostenibilidad y energía relacionados con el mundo de la arquitectura. Al mismo tiempo, el programa enfatiza una ética de responsabilidad y cuidado de nuestros recursos naturales asociada al desarrollo sustentable, parte de la misión de la Universidad.

El Taller, propone trabajar en torno al diseño en madera, asumiendo el desafío del gran potencial forestal de Chile, y el excelente desempeño ecológico de la construcción en este material que actualmente contrasta con el alrededor del 20% de las viviendas chilenas que utilizan estructuras de madera [1], y la prácticamente nula participación en edificios de cuatro o más pisos [2]. El curso, inicia sus actividades visitando bosques, plantaciones, fábricas de materiales y edificios de madera, para comprender las cualidades de este material como un recurso renovable que va “de cuna a cuna” [3]. También, en ese proceso, comprenden aspectos como su huella de carbono, características de su elaboración, transporte, montaje, operación y reciclaje.



Figura 1. Clase en que estudiantes presentan criterios arquitectónicos y estructurales Fuente: Elaboración propia.

2. Metodología

El Taller de Investigación y Proyectos propone una metodología que parte de la comprensión del diseño de arquitectura y estructura resistente, para posteriormente trabajar en tres escalas y elegir entre tres alternativas sobre las que ponen a prueba sus interrogantes e hipótesis: un tema de investigación específico; un programa arquitectónico; y una tipología constructiva-estructural.

Figura 2. Estudiantes diseñan un m3 en madera, describiendo propiedades constructivas y mecánicas. Fuente: Elaboración propia.

El diseño de los diferentes barrios, edificios y detalles constructivos se logra luego de un proceso de iteración -al menos tres veces- sobre parámetros que los propios estudiantes plantean al presentar su respectivo “proyecto de tesis”.

Tabla 1. Programa arquitectónico predominante y tópico de investigación sugerido, a ser escogido por los nueve tesisistas del taller

Programa predominante Tópico de investigación	Estructura y sistemas constructivos	Sustentabilidad y eficiencia energética	Gestión de la construcción
Vivienda	1	2	3
Espacios de trabajo	4	5	6
Edificios educacionales	7	8	9

3. Distritos

El taller se ocupa un tema crucial en materia ambiental para Chile, como es el objetivo de alcanzar la neutralidad de carbono como máximo hasta 2050, meta que es revisada cada diez años [4]. Este mandato, representa una gran oportunidad para la construcción con este material en nuestro país, porque la biomasa forestal está compuesta por: 50% carbono; 41% oxígeno; 6% hidrógeno; 1% nitrógeno; 2% ceniza y el carbono por tonelada de materia seca se acerca a los 500 kg.

Además, Chile tiene una demanda de 600.000 viviendas nuevas para familias vulnerables y del orden de 1.200.000 que deben mejorar su nivel de habitabilidad. Una casa de 50 m² utiliza una media de 5m³ de madera. De este modo, hoy “crecen” en el bosque de Chile ocho casas por minuto, es decir, las estructuras del déficit habitacional acumulado del país se cubrirían en alrededor de 60 días de crecimiento forestal.

Los estudiantes estudian diferentes casos de distritos en madera con el fin de extraer observaciones y antecedentes que pudieran adoptarse para “ciudades de tamaño intermedio” en Chile. También, estudian distritos de innovación o casos de similar interés que se están convirtiendo en una nueva clase de activos.

Tabla 2. Casos de estudio de distritos en madera y de innovación, respectivamente.

Caso de Estudio Distrito en Madera	País	Caso de Estudio Distrito de Innovación	País
Örnsro Timber Town	Suecia	Milano Innovation District	Italia
Quayside Toronto	Canadá	The Community Land Trust Brussels	Bélgica
Vaxjo Wood City	Suecia	The self-sufficient city	China

Además, extraen información de los respectivos terrenos donde se desenvuelven las diferentes ediciones del taller, como han sido Laja-San Rosendo, Talca y Curicó, todas ciudades intermedias, vinculadas al sector forestal y en donde los tesistas tienen la posibilidad de interactuar con las autoridades regionales y representantes de las empresas madereras de la zona, gracias a convenios de colaboración firmados entre ellos y los docentes del taller.



Figura 3. Diseño a escala de distrito. Fuente: Julio Illanes.

4. Conclusiones

Tras el taller, los exalumnos de Arquitectura logran dominar el uso de la madera en tres escalas -distrito, edificio y detalle, y proponen una nueva arquitectura que asume los retos desde el punto de vista ecológico.

A través del uso de softwares especializados en la materia, así como el laboratorio de modelos y prototipos de la Facultad de Arquitectura de la Pontificia Universidad Católica de Chile, terminan el proceso dominando tanto los enfoques arquitectónicos como también algunos de ingeniería estructural para el diseño de nuevos edificios en este material, convirtiéndose en un aporte para una nueva demanda de profesionales con herramientas en esta materia.

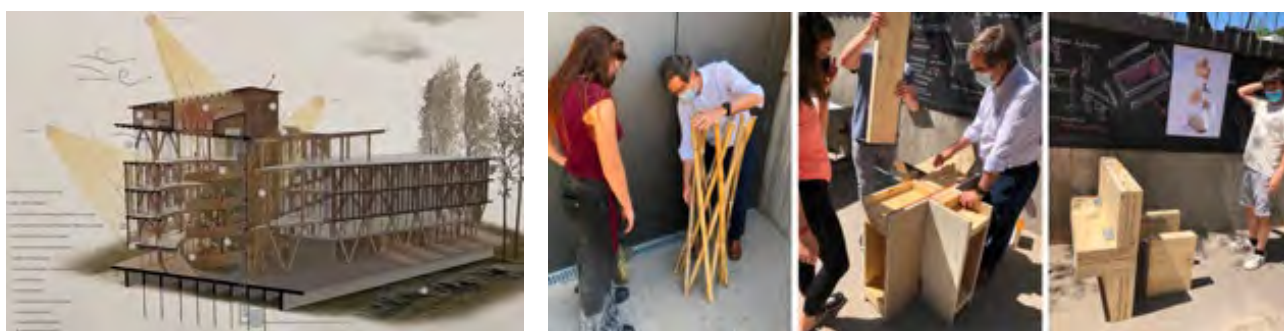


Figura 4. Diseños a escala de Edificio y Detalle. Fuente: Constanza Delfau, Alessandra Botello, Sol Villannustre y Ronald Ambler.

Referencias

- [1] Instituto Nacional de Estadísticas (2017): Resultados definitivos Censo, Santiago de Chile.
- [2] Álvarez, Claudia & Rivera, Felipe & Santa-María, Hernán & Hube, Matías (2015): Desarrollo de un modelo de exposición de estructuras residenciales para Chile. En la Décima Conferencia del Pacífico sobre Ingeniería Sísmica, en Sydney, Australia, 2015.
- [3] Braungart, M., McDonough, W. Cradle to Cradle (2003): Rehaciendo la forma en que hacemos las cosas. Rodale Press, Nueva York, 2003.
- [4] Senado. Ley de cambio climático (2021): Cambio climático: carbono neutralidad al 2050 y piden agilizar los reglamentos. Rescatado de: Cambio climático: carbono neutralidad al 2050 y piden agilizar los reglamentos. Rescatado de: <https://www.senado.cl/cambio-climatico-comprometen-la-carbono-neutralidad-al-2050-y-piden>.

1166

TANNIN-BASED ADHESIVES FOR PARTICLEBOARD PRODUCTION: IMPROVING PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES

Raquel Fernandes¹; Nuno Ferreira¹; Sandro Lopes¹; Jorge Santos¹; Cristina Coelho²; Irene Fereira³; Carlos Vieira³; Jorge Manuel Martins²; Luisa Hora De Carvalho²

¹ ARCP - Rede de Competência em Polímeros

² Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu, IPV.

³ Freshwood

Palabras clave / Palavras-chave:

Particleboard, Tannins, Mechanical performance, Hardener

Resumen / Resumo:

The particleboard (PB) industry is one of the major contributors for wood-based economy, but also a great consumer of synthetic resins with a tremendous environmental impact. Tannin-based adhesives may be a valuable alternative to replace or diminish the use of these hazardous components. In the present work, Poplar bark was used as raw material to develop a tannin-based resin used in the production of PB. Different compounds (citric acid, glucose and sucrose) were studied as hardeners in order to improve physical-mechanical properties of the composite materials. It was found that citric acid has a positive impact on the bonding capacity of the adhesives and, consequently, on the internal bond and bending strength of the panels. Moreover, pressing temperature was also a determining parameter in the performance of the materials. In terms of moisture resistance, citric acid revealed a positive contribution to keep the integrity of the panels. The developed resins allowed to obtain PB with interesting mechanical performance when compared to the requirements of PB type P1.

1. Introduction

Particleboards (PBs) industry is one of the most important fields of wood-based industries, with a great prevalence on the worldwide production of wood-derived materials and products [1]. The intensive production of PBs usually requires a large consumption of resins, mostly synthetic, which a tremendous environmental impact [1]. Therefore, the search for bio-based and greener alternatives to replace and/or reduce the use of synthetic adhesives plays a major role for the environmental sustainability of this sector.

The production of bio-adhesives from lignocellulosic biomass as raw material have been a hot topic both for academic and industrial researchers. Up to now, a wide range of forestry and agriculture by-products were successfully applied in the development of natural resins based on tannins [2-8]. Although the adhesive performance of these alternatives is quite promising, the addition of some compounds has proved to improve their bonding performance and physical-mechanical resistance [6,8].

In the present work, a tannin-based resin was prepared using Poplar bark extract and glucose, sucrose and citric acid as hardeners. The bonding capacity of adhesives was accessed through Automated Bonding Evaluation system (ABES). The resins were applied in the production of PBs at different pressing temperatures (160, 180, 200 and 220 °C), using Poplar particles as raw material. Boards were physically and mechanical characterized, according to European standards: density (EN 323), moisture content (EN 322), internal bond strength (EN 319), bending strength (EN 310) and thickness swelling (EN 317). Additionally, was also tested the effect of additive on the wettability, through the measurement of contact angle on the surface of the composite materials.

2. Methodologies

2.1. Poplar bark extraction

The poplar bark extraction to obtain extracts with high polyphenolic content was carried out in a batch reactor, using Poplar bark particles (2 mm to 500 µm) and an aqueous solution of NaOH (1 wt% regarding the dry mass of particles) as extraction agent. The mixture was continuously stirred (250 rpm) and heated at 80°C for 1 h. Upon this time, the solid fraction was removed through filtration and the liquid tannin extract was concentrated in a rotary evaporator until reach 30% of solid content.

2.2. Bio-adhesives formulation and characterization

To obtain the bio-adhesive, a certain amount of citric acid, glucose and sucrose was added to tannin extract, in a ratio of 1:2 (mass of additive: mass of tannins). The mixture was homogenized at 60°C for 5 minutes. The bio-adhesives were denoted T0, TCA, TG and TS according to the additive chosen (0 – no additive, CA - citric acid, G - glucose and S - sucrose). The bonding capacity of adhesives was evaluated through Automated Bonding Evaluation system (ABES) at 140°C and a pressing time of 120 s. For all tests, 10 mg of bio-adhesive was used as well as 117 mm × 20 mm wood veneer samples (*Fagus sylvatica* L.), with 0.7 mm of thickness.

2.3. Particleboard manufacturing and physical-mechanical evaluation

A first set of particleboards with 250 × 250 mm² (8 mm of thickness) were produced by mixing poplar particles (2 mm to 500 µm) with a certain amount bio-adhesive (10 wt%) to reach a target density of 700 kg m⁻³. The mixture was hot pressed at 160°C during 10 min at a constant pressure of 80 bar. The effect of pressing temperature was also tested (180, 200 and 220 °C).

The panels were denoted PX, where X refers to the bio-adhesive used (T0, TCA, TG and TS) and PX_Y, where Y refers to the pressing temperature (180, 200 and 220). The physical-mechanical properties of obtained composite panels were evaluated according to European standards in terms of density (EN 323), moisture content (EN 322), internal bond strength (IB; EN 319), bending strength (BS; EN 310) and thickness swelling (EN 317). The classification of the PBs was performed according to EN 312. Additionally, the evaluation of wettability was performed by measuring the contact angle (with water and diiodomethane) on the surface of the composite panels by using a Kruss Mobile Surface Analyzer.

3. Results and discussion

3.1. Bio-adhesive characterization

The bonding capacity of all bio-adhesives was tested through ABES. In **Figure 1** are presented the obtained results.

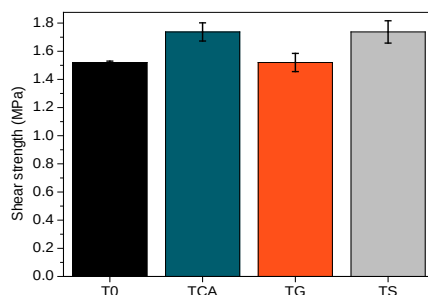


Figure 1. Shear strength of the bio-adhesives at 140°C and 120 s of pressing time.

As observed, tannin adhesive (T0) exhibited a shear strength below c.a. 1.50 MPa (**Figure 1**). The addition of citric acid (TCA) and sucrose (TS) resulted in 20% of improvement in bonding capacity (c.a. 1.80 MPa, **Figure 1**). In the case of glucose (TG), no change was noticed in the performance of the bio-adhesive (c.a. 1.50 MPa, **Figure 1**). This change may be promoted by cross-linking interactions between tannins and hardeners, allowing to increase the strength of wood-resin bonding.

3.2. Particleboard performance and wettability

The evaluation of the physical-mechanical properties of composite panels were performed according to the methods previously mentioned and the results are presented in **Table 1**.

Table 1. Density, moisture content, internal bond strength (IB), bending strength and thickness swelling (after 1 h) of all composite panels.

Material	Density (kg m ⁻³)	Moisture content (%)	Internal bond strength, IB (MPa)	Bending strength (MPa)	Thickness swelling after 1 h (%)
PT0	715 ± 29	4.3 ± 0.4	0.07 ± 0.01	8.9 ± 1.3	i.d.
PTCA	703 ± 26	4.1 ± 0.2	0.10 ± 0.02	9.7 ± 0.6	i.d.
PTG	700 ± 30	4.3 ± 0.2	0.07 ± 0.01	9.2 ± 0.9	i.d.
PTS	718 ± 30	4.3 ± 0.2	0.06 ± 0.00	9.3 ± 0.2	i.d.
PTCA_180	716 ± 29	5.2 ± 0.2	0.17 ± 0.02	9.6 ± 0.2	70 ± 3
PTCA_200	709 ± 38	4.8 ± 0.1	0.20 ± 0.01	9.9 ± 1.3	38 ± 4
PTCA_220	699 ± 33	4.7 ± 0.2	0.28 ± 0.01	11.3 ± 1.1	27 ± 7
PB Type P1 (6 to 13 mm)*	n.r.	n.r.	0.28	> 10,5	n.r.

*According to EN 312:2010; n.r. – no requirements; n.d. – impossible determination

As observed, all the panels reached similar density (700 kg m^{-3} , **Table 1**) and moisture content (4 - 5%, **Table 1**). In terms of mechanical resistance, PTO exhibit an IB of c.a. 0.07 MPa (**Table 1**). This value was improved in more than 40% by using citric acid as additive (PTCA, **Table 1**). Contrariwise, glucose and sucrose revealed a negative impact on this parameter (PTG and PTS, respectively; **Table 1**). This fact may be related with the chemical interaction between citric acid and tannins, which may promote the polyphenolic components of the poplar bark extract. Additionally, PTCA was produced by varying the pressing temperature and it was found that higher temperature increases the mechanical resistance panel (**Table 1**). In fact, increasing pressing temperature from 160°C to 180°C allows to increase IB in 60% (**Table 1**). Moreover, thickness swelling measured after 1 h denotes an improvement regarding to moisture resistance by increasing pressing temperature (**Table 1**).

The developed materials meet the requirements of PB type P1, according to EN 312:2010 (**Table 1**). In terms of wettability of the surface of composite panels, also important changes were noted due to the increasing in pressing temperature (**Table 2**). According to **Table 2**, increasing pressing temperature promotes notorious variation in the contact angle with water and diiodomethane, which may indicate important changes in the hydrophilic character of the material's surface, possibly due to the loss of hydroxyl groups caused by high temperature.

Table 2. Results of wettability evaluation: contact angle and surface free energy of composite materials.

Material	Contact angle ($^\circ$)		Surface free energy (mN m^{-1})
	Water	Diiodomethane	
PTCA	76.84 ± 2.65	67.86 ± 0.53	33.37 ± 1.58
PTCA_180	80.42 ± 1.54	49.80 ± 1.91	40.93 ± 1.43
PTCA_200	80.00 ± 1.68	45.49 ± 1.51	40.82 ± 1.08
PTCA_220	80.73 ± 2.10	44.90 ± 1.34	40.82 ± 1.64

4. Conclusions

The application of tannin-based solutions as adhesive in the PB industry opens up new opportunities for the use of wood-based products. The use of additives and tune the pressing temperature can be crucial to achieve the desired properties for composite materials.

Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge the funding by: LA/P/0045/2020 (ALiCE) and UIDP/00511/2020 (LEPABE) funded by national funds through FCT/MCTES (PIDDAC); Project Embalagem do Futuro®, Agenda Verde for Business Innovation, investment project n°59, financed by PRR, NextGenerationEU.

References

- [1] Food and Agriculture Organisation of the United Nations. Forestry Production and Trade. Available online: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/FO> (accessed on 15 October 2023)
- [2] Arias, A.; González-García, S.; Feijoo, G.; Moreira, M.T. (2021) Tannin-based bio-adhesives for the wood panel industry as sustainable alternatives to petrochemical resins. *J. Ind. Ecol.* 26:627–642. doi.org/10.1111/jiec.13210
- [3] Tahir, P. M.; Halip, J. A.; Lee, S.H. (2019) Tannin-Based Bioresin as Adhesives. In *Lignocellulose for Future Bioeconomy*, Elsevier Inc., Amsterdam. Pp. 109-133. doi.org/10.1016/B978-0-12-816354-2.00007-4
- [4] Dahwale, P. V.; Vineeth, S.K.; Gadhave, R.V.; J, J. F. M.; Supekar, M. V.; Thakur, V. K.; Raghavan, P. (2022) Tannin as a renewable raw material for adhesive applications: a review. *Mater. Adv.* 3:3365-3388. doi.org/10.1039/D1MA00841B
- [5] Santos, J.; Pereira, J.; Escobar-Avello, D.; Ferreira, I.; Vieira, C.; Magalhães, F.D.; Martins, J.M.; Carvalho, L.H. (2022) Grape Canes (*Vitis vinifera* L.) Applications on Packaging and Particleboard Industry: New Bioadhesive Based on Grape Extracts and Citric Acid. *Polymers*. 14: 1137. doi.org/10.3390/polym14061137
- [6] Santos, J.; Escobar-Avello, D.; Fuentealba, C.; Cabrera-Barjas, G.; González-Álvarez, J.; Martins, J.M.; Carvalho, L.H. (2023) Pilot-Scale *Pinus radiata* and *Eucalyptus globulus* Bark Mixture Extraction. *Forests*. 14 (5): 895. doi.org/10.3390/f14050895
- [7] Zhao, Z.; Umemura, K.; Kanayama, K. (2016) Effects of the Addition of Citric Acid on Tannin-Sucrose Adhesive and Physical Properties of the Particleboard. *Bioresources*. 11(1):1319-1333. doi.org/10.15376/biores.11.1.1319-1333
- [8] Xiao, G.; Liang, J.; Li, D.; Tu, Y.; Zhang, B.; Gong, F.; Gu, W.; Tang, M.; Ding, X.; Wu, Z.; Lei, H. (2022) Fully Bio-Based Adhesive from Tannin and Sucrose for Plywood Manufacturing with High Performances. *Materials (Basel)*. 15 (24):8725. doi.org/10.3390/ma15248725

1167

TCC AS A SUSTAINABLE AND REUSABLE COMPOSITE FLOOR: STATE OF THE ART AND PRELIMINARY STUDIES

Carlos Albino¹; Romeu Vicente¹; Victor Ferreira¹

¹ RISCO

Palabras clave / Palavras-chave:

Concrete, Connection, Cross-laminated timber, Engineered wood product, Sustainable uncoupling, Timber structure

Resumen / Resumo:

Engineered wood products and their application in construction and rehabilitation has grown worldwide. Relating to original resources, they perform better since critical defects are eliminated in the manufacturing process. Nevertheless, the single use of timber in panel elements, namely CLT, is insufficient to overcome large spans in horizontal applications such as floors. CLT-concrete composites appear as a solution, in which the excellent characteristics of timber in tension and concrete in compression can be coupled/combined. Additionally, as the amount of concrete is reduced and a timber element capable of long-term carbon storage is added, this timber-concrete composite solution brings sustainable benefits. Here, the use of the CLT-concrete composite floors as an alternative to concrete-only or wood-only floor solutions is discussed. A literature review on uncoupling solutions is presented and new solutions are put forward and discussed. The target is to find sustainable and reusable composite floor solutions that are easy to mountable and dismountable by uncoupling building components. This work presents a conceptual easy demountable dry-dry modular floor.

1. Introduction

Engineered Wood Products (EWPs) are based on the technological advances of several processes related to sawn wood. The fabrication of new products based on timber assembly mostly uses adhesives for structural applications. Cross-Laminated Timber (CLT) is an innovative timber product that was developed in Europe in the 1970s [1] and first introduced to the market in Austria and Germany in the 1990s [2]. Since then, the use of CLT in Europe has increased significantly [3,4] enabling the construction of solid timber buildings as an alternative to masonry, concrete, and steel structures. Figure 1 (a) shows the volume [m^3/year] of manufactured CLT in Europe [5–8].

Timber-Concrete Composite (TCC) floor system is a construction technique where a concrete slab is mechanically connected to its supporting timber joists (mass timber beam) or CLT (mass timber panel) using either notches cut from the timber or mechanical fasteners [9,10]. CLT improves the constructability, since CLT works as a support for the slab concreting. Thermal and acoustic insulation and fire safety

are also improved in comparison to CLT-only floor solution. In composite floor, structural stiffness is influenced by the connection between concrete and timber, and the better adhesion at the interface, the greater its stiffness [11,12]. Connectors on a CLT-concrete floor system are concentrated near the supports, where the internal shear force is higher, and gradually spaced across the span, as the shear force reduces to zero in the middle, for a simply supported beam subjected to a uniformly distributed load. A connection system with high composite performance allows a significant reduction in slab thickness and longer span length, when compared to a non-composite system. Ceccotti (2002) sorted by stiffness the most common connections to join timber to concrete: nails, screws and dowels are the most flexible, while notches cut in timber and continuous connectors glued in the timber are stiffest [11]. Figure 1 (b) provides a comparison of the shear force-slip relationship for different connection systems [13].

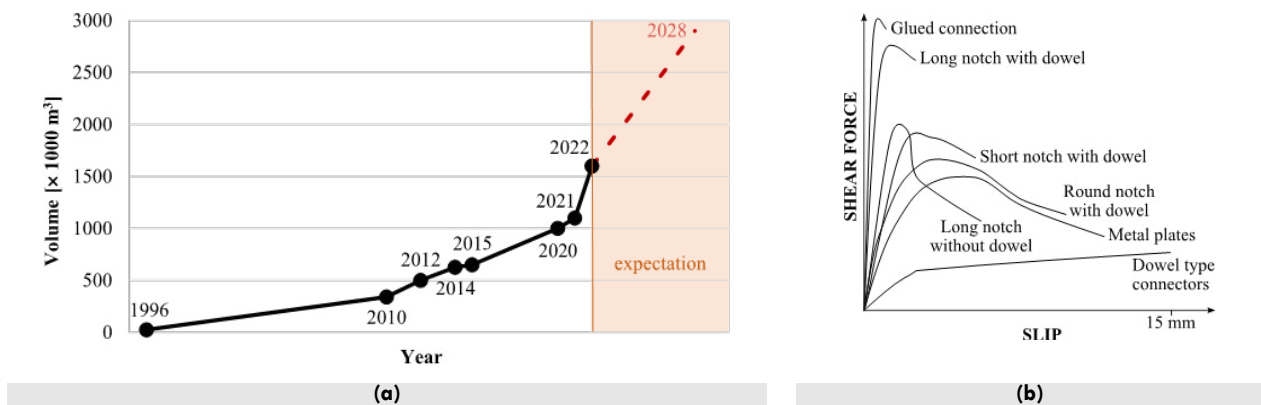


Figure 1. (a) Volume [m^3/year] of manufactured CLT in Europe; (b) schematic representation of load-slip behaviour of common connection types (adapted from [13]).

2. Literature review on uncoupling TCC floors

Since the beginning of the 2000s, the topic of Design for Deconstruction (DfD) has been addressed to make the buildings' end of life more efficient. Nevertheless, although the DfD has shown environmental, social, and economic benefits, almost no buildings designed and built today are designed for deconstruction [14]. Estévez-Cimadevila *et al.* proposed a completed system which includes all the elements of the structural flooring system. It is a system of prefabricated modular wooden pieces, assembled on site and concrete pouring after installing steel bars for concrete reinforcement [15]. Woschitz *et al.* studied a 7.0 m long, and 2.4 m wide CLT-concrete panel flooring system based on timber notch connections with adhesive to secure the concrete to the timber [16]. Derikvand and Fink developed the concept of a deconstructable connector using self-tapping screws to be used for both prefabrication and cast-in-situ construction of TCC floors. [17,18]. In the latter two research, there is a concern with reuse of the used materials at the end of structure service life. Considering the concept of demountable CLT-concrete composite floors, Hooman Eslami *et al.* (2023) presented a solution with notched and screwed connections [19]. This work presented an easy demountable wet-dry modular floor.

Connections between timber and concrete are the most important parts of the TCC structures. They give the system both stiffness and composite behaviour. Therefore, assigning these structural parts the temporary link function is a sensible issue. Nevertheless, when considering the reuse of singular elements, the connectors are the pieces that allow the uncoupling process. For this reason, removable connectors have become state-of-the-art scientific research in the timber-concrete composites area. This type of connector reshapes the lifecycle of structural elements, making timber-concrete structures more sustainable.

3. Validation of the numerical model and Preliminary studies

A three-dimensional finite element (FE) model, using Abaqus software [20], was developed to simulate the push-out test and investigate the performance of CLT-concrete connections. FE model was validated using laboratory tests. As a reference of laboratory tests, the work of Albino *et al.* (2023) was considered [21].

Figure 2 (a) shows the specimen parts and geometry, used to validate the numerical model. Numerical simulation reproduced all the requirements of the laboratory tests, including the loading procedure given by EN 26891 [22]. Nevertheless, half of the specimen was used, with the appropriate boundary conditions, to minimize the computational cost. A study of finite element mesh convergence was carried out. The area furthest from the notch has a wider mesh and the notch area has a more refined mesh. The smallest dimension of the finite element corresponds to the screw.

For the numerical simulation, a CLT panel was considered whose timber boards are of strength class C24. The timber mechanical properties are given in Table 1 of EN 338 [23] standard. A concrete layer of strength class C35/45 was considered. Steel properties of the screws and threaded bars were provided by the European Technical Assessment ETA-12/0114 [24].

Results as applied load vs joint slip are provided in Figure 2 (b), where the continuous line graph represents the behaviour of the specimen tested in laboratory. The other graphs are numerically computed results where, in the legend, the mesh dimension is defined (away from the notch, notch area and screw, respectively). Both “Mesh 1” and “Mesh 2” graphs are acceptable since they are very close to the graph resulting from the laboratory test. On the other hand, the laboratory tests results always have considerable dispersions in both load-carrying capacity and slip modulus.

Preliminary studies consisted of the computational assessment of bolted connections between CLT and concrete – see Figure 2 (c). Connections with hexagon head screws – see Figure 2 (c.1) – and threaded steel bars – see Figure 2 (c.2) – were the starting point for other sustainable connections that allow the uncoupling between CLT and concrete at the end of structure’s service life.

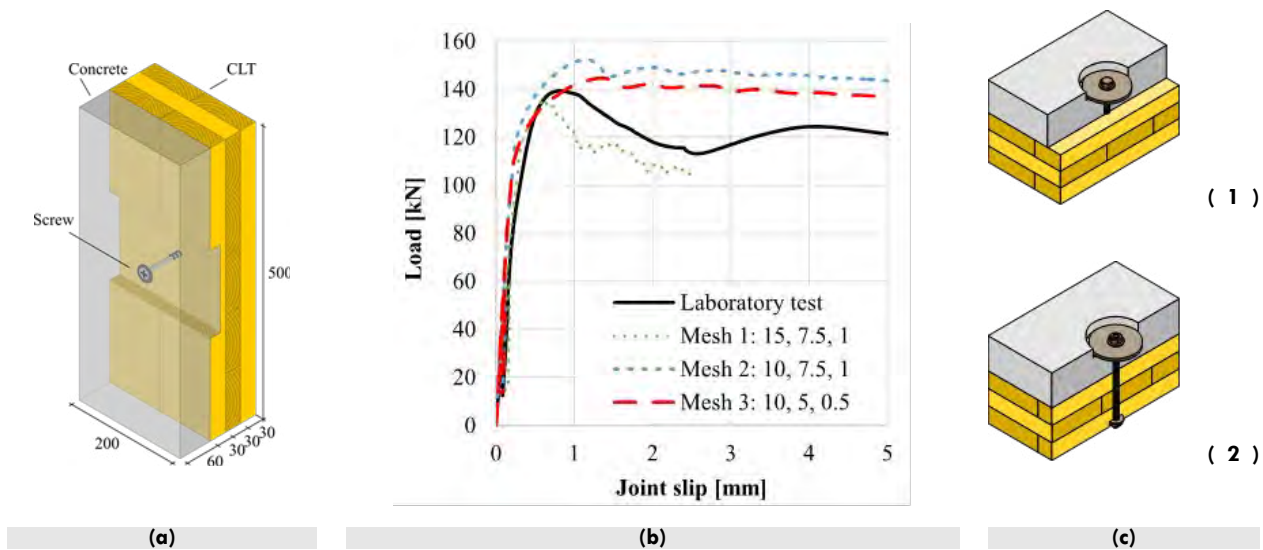


Figure 2. Schematic representation of (a) validation specimen model (dimensions in mm), (b) results of mesh convergence and (c) schematic representation of preliminary models using: (c.1) hexagon head screw and (c.2) threaded steel bar.

The proposed new connections are part of a highly innovative concept, which introduces a new approach to respond to four important issues: 1) make the construction site cleaner, more sustainable and assembly systems lighter; 2) facilitate coupling and uncoupling of the timber-concrete composite floor system; 3) allow the full reuse of elements and, 4) reduce waste during construction and resulting from the demolition of the building. This is achieved through the design of innovative connectors that allow the different elements to be uncoupled without structural damage.

4. Conclusions

This document firstly provides a literature review on uncoupling TCC floors and then presents and discusses the validation of the numerical model for simulating connections between CLT and concrete. New sustainable connections are under development and a good mechanical behaviour is expected. Nevertheless, a campaign of laboratory tests is necessary to validate the numerical model results. An easy and quick uncoupling was conceived, at the end of the structure's service life, allowing the reuse of all elements: timber, concrete and steel.

Acknowledgement

This research was supported by the Research Centre for Risks and Sustainability in Construction (RISCO), University of Aveiro, Portugal (UIDB/04450/2020).

References

- [1] Structural Timber Association, Technical Bulletin 11 - Cross-laminated Timber Construction - An Introduction, Structural Timber Engineering Bulletin. (2015). <https://www.structuraltimber.co.uk/libraries/technical-documents/> (accessed October 10, 2023).
- [2] S. Gagnon, E.M. (Ted) Bilek, L. Podesto, P. Crespell, CLT handbook: cross-laminated timber, FPLInnovations, Pointe-Claire (Quebec), 2013.
- [3] M. Mohammad, S. Gagnon, B.K. Douglas, L. Podesto, Introduction to Cross Laminated Timber, Wood Des Focus. 22 (2012) 3–12.
- [4] A. Gustafsson, R. Crocetti, A. Just, P. Landel, J. Olsson, A. Pousette, M. Silfverhielm, B. Östman, The CLT Handbook: CLT structures – facts and planning, First edition, Skogsindustrierna, Svenskt Trä, 2019.
- [5] R. Brandner, G. Flatscher, A. Ringhofer, G. Schickhofer, A. Thiel, Cross laminated timber (CLT): overview and development, European Journal of Wood and Wood Products. 74 (2016) 331–351. <https://doi.org/10.1007/s00107-015-0999-5>.
- [6] A. Sandoli, C. D'Ambra, C. Ceraldi, B. Calderoni, A. Prota, Sustainable cross-laminated timber structures in a seismic area: Overview and future trends, Applied Sciences (Switzerland). 11 (2021) 1–24. <https://doi.org/10.3390/app11052078>.
- [7] timber-online.net, The biggest CLT producers in Central Europe, (2021). <https://www.timber-online.net/blog/biggest-clt-producers.html> (accessed March 10, 2023).

- [8] imarcgroup.com, European Cross-Laminated Timber Market Report 2023-2028, (2023). <https://www.imarcgroup.com/european-cross-laminated-timber-market> (accessed March 10, 2023).
- [9] D. Yeoh, M. Fragiaco, P. Aldi, M. Mazzilli, U. Kuhlmann, Performance of notched coach screw connection for timber-concrete composite floor system, 1 (2008) 294–301.
- [10] M.A.H. Mirdad, R. Khan, Y.H. Chui, Analytical Procedure for Timber-Concrete Composite (TCC) System with Mechanical Connectors, Buildings. 12 (2022). <https://doi.org/10.3390/buildings12070885>.
- [11] A. Ceccotti, Composite Concrete-Timber Structures, Progress in Structural Engineering and Materials. 4 (2002) 264–275. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/pse.126>.
- [12] S.T.A. Amorim, G. de O. Ribeiro, V. Baño, Estudo do Dimensionamento das Lajes do Material Composto: Madeira Laminada Cruzada e Concreto, in: 2018.
- [13] D. Yeoh, M. Fragiaco, M. Franceschi, K. Boon, State of the Art on Timber-Concrete Composite Structures: Literature Review, Journal of Structural Engineering. 137 (2011) 1085–1095. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000353](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000353).
- [14] J. Kanters, Design for Deconstruction in the Design Process: State of the Art, Buildings. 8 (2018). <https://doi.org/10.3390/buildings8110150>.
- [15] J. Estévez-Cimadevila, E. Martín-Gutiérrez, F. Suárez-Riestra, D. Otero-Chans, J.A. Vázquez-Rodríguez, Timber-concrete composite structural flooring system, Journal of Building Engineering. 49 (2022) 104078. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104078>.
- [16] R. Woschitz, K. Deix, C. Huber, T. Kampitsch, Entwicklung neuartiger Holz-Betonverbunddecken in Fertigteiltbauweise, Bautechnik. 98 (2021) 12–22. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/bate.201800097>.
- [17] M. Derikvand, G. Fink, Deconstructable connector for TCC floors using self-tapping screws, Journal of Building Engineering. 42 (2021) 102495. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102495>.
- [18] M. Derikvand, G. Fink, Bending properties of deconstructable cross-laminated timber-concrete composite floor elements, Wood Mater Sci Eng. 17 (2022) 253–260. <https://doi.org/10.1080/17480272.2022.2077658>.
- [19] H. Eslami, L.B. Jayasinghe, D. Waldmann, Experimental and Numerical Investigation of a Novel Demountable Timber–Concrete Composite Floor, Buildings. 13 (2023). <https://doi.org/10.3390/buildings13071763>.
- [20] Dassault Systemes, ABAQUS <http://www.3ds.com/products-services/simulia/products/abaqus>, Accessed June. 16 (2017).
- [21] C. Albino, C. Martins, C. Ferreira, R. Augusto, A. Dias, Mechanical Behaviour of Notch Connection for Maritime Pine CLT-Concrete Composite, in: World Conference on Timber Engineering 2023 (WCTE 2023), World Conference on Timber Engineering 2023 (WCTE 2023), Oslo, 2023: pp. 3121–3126. <https://doi.org/https://doi.org/10.52202/069179-0406>.
- [22] EN 26891:1991, Timber structures - Joints made with mechanical fasteners - General principles for the determination of strength and deformation characteristics, Technical, CEN - European Committee for Standardization, Brussels, 1991.
- [23] BS EN 338:2003, EN 338 - Structural Timber - Strength Classes, BSI - British Standards, 2003.
- [24] SPAX International GmbH & Co. KG, European Technical Approval ETA-12/0114, (2012). www.spax.com.

1168

TECNOLOGÍAS DISPONIBLES PARA DENSIFICAR MADERAS URUGUAYAS

Claudia Marcela Ibañez Ojeda¹; Gastón Bruzzone González²; Silvia Böthig Gargiulo³; Laura Moya⁴

¹ Universidad de la República

² Facultad de Agronomía, Universidad de la República

³ Latitud, Fundación LATU

⁴ Facultad de Arquitectura, Universidad ORT

Palabras clave / Palavras-chave:

Estabilidad dimensional, Eucalyptus grandis, Densidad, Pinus taeda, Madera tarugada, MOE, MOR

Resumen / Resumo:

La construcción es el sector que consume más energía y recursos naturales en el mundo y contribuye más a las emisiones de gases de efecto invernadero. Una forma de mitigar el daño ambiental que produce es impulsar el reemplazo de los materiales industriales de construcción tradicionales (acero, cemento, derivados del petróleo) por madera y productos de ingeniería en base a madera. Entre estos destacan los productos estructurales, libres de adhesivos y de clavijas de acero como la madera laminada tarugada (DLT) y la madera laminada cruzada tarugada (DCLT), contruidos con láminas de maderas y clavijas de madera. Estas clavijas pueden ser fabricadas a partir de maderas comerciales uruguayas, pero sus propiedades mecánicas y estabilidad dimensional son de medias a bajas, por lo que se necesita mejorar dichas propiedades. El proceso de densificación de la madera aprovecha la correlación positiva entre la densidad de la madera y diferentes propiedades mecánicas para incrementar la densidad a través de modificaciones físicas, mecánicas y/o químicas a la madera. En este trabajo, se analizan los diferentes procesos empleados para densificar la madera, con énfasis en aquellos cuyas tecnologías sean viables de aplicar en Uruguay, con vista a ser un proceso escalable en un futuro próximo.

1. Introducción

La construcción posee un rol fundamental en el desarrollo social y económico de cualquier país. Sin embargo, es el sector que consume más energía y recursos naturales en el mundo y contribuye más a las emisiones de gases de efecto invernadero [1]. El ciclo de vida de las edificaciones, muestra las potenciales pérdidas económicas y el gran impacto en el medio ambiente que producen; desde la energía consumida en la extracción de materias primas, la producción de materiales de construcción, su transporte, así como el uso de los edificios, sus modificaciones y finalmente la demolición. Por ello, una forma de mitigar este daño, es impulsar acciones tales como reemplazar los materiales industriales de construcción (acero, cemento, aquellos derivados del petróleo) por

madera y productos de ingeniería en base a madera [2]. En este sentido, estos últimos productos, también denominados “mass timber” por emplear masivamente madera, van ocupando un lugar cada vez más relevante en la arquitectura residencial, dirigida al desarrollo de edificios en altura. Entre ellos, destacan la madera laminada encolada (GLT: *Glued laminated timber*), y la madera laminada cruzada (CLT: *Cross laminated timber*), fabricados industrialmente a partir de tablas o láminas de madera que se unen empleando adhesivos estructurales. En general, estos adhesivos son derivados de petroquímicos. Reducir o evitar el uso de estos adhesivos, es dar un paso más hacia la sustentabilidad en la construcción, empleando productos estructurales, “mass timber” libres de adhesivos y de clavijas de acero como son la madera laminada tarugada (DLT: *Dowel laminated timber*) y la madera laminada cruzada tarugada (DCLT: *Dowel cross laminated timber*); productos contruidos con láminas de maderas y clavijas de madera [3]. Sin embargo, la mayoría de las especies madereras utilizadas industrialmente en Uruguay, poseen propiedades mecánicas de medias a bajas, tratándose de especies de rápido crecimiento y baja rotación, en tanto que las especies más resistentes, son escasas o de elevado costo. El proceso denominado densificación de la madera, es uno de los más adecuados para la fabricación de las clavijas, ya que aprovecha la correlación positiva entre la densidad de la madera y diferentes propiedades mecánicas, buscando incrementar la densidad a través de modificaciones físicas, mecánicas y/o químicas a la madera. La densificación es un proceso por el cual las células de la madera se comprimen mecánicamente, se deforman y disminuyen los espacios huecos, tratando de que la pared celular no se fracture [4]. Se mide a través del porcentaje de reducción del espesor de la pieza comprimida. La naturaleza visco-elástica de la madera juega un rol fundamental en este proceso, ya que para densificar la madera es conveniente emplear temperaturas, por encima de la temperatura de transición vítrea (T_g), que es la temperatura a la cual las propiedades físicas de un polímero cambian, pasando de un estado similar al cristal (rígido) a un estado termoplástico, y viceversa [5], lo que permite cambiar la forma de la madera mediante la aplicación de una carga. La concentración relativa de sus tres polímeros estructurales: celulosa (con fragmentos semicristalinos), hemicelulosa y lignina (ambas amorfas y termoplásticas); y su disposición en la pared celular, al igual que los cambios en el contenido de humedad y la temperatura influyen en la T_g de la madera [6, 7]. Ésta es afectada a su vez por la T_g de cada polímero estructural, que varían con el contenido de humedad (CH), con excepción de la celulosa. Por lo tanto, se emplearán temperaturas de densificación entre 80 °C y 250 °C . Una vez que la madera pasa la T_g , sus propiedades de resistencia cambian, alterando el MOE.

Cabral et al. [6], señalan en una reciente revisión del tema, que uno de los primeros procesos de densificación fue patentado en el año 1900 en USA, a partir del cual los estudios se centraron en las técnicas de densificación en tanto que los estudios más recientes, se ocupan de la estabilización luego de la densificación de la madera. Esto se debe a que la madera tiende a recuperar su forma original al quitar la presión aplicada, recuperación elástica de la madera que es acompañada por la liberación de los estreses generados durante el proceso de compresión [9].

La madera densificada, además de la densidad, incrementa el Módulo de Ruptura (MOR), y el Módulo de Elasticidad (MOE) para distintas propiedades, la rigidez, la dureza y la estabilidad dimensional. En este trabajo, se analizan los diferentes procesos empleados para densificar la madera, con énfasis en aquellos cuyas tecnologías sean viables de aplicar en Uruguay.

1.1.Técnicas de densificación de madera

La densificación se puede realizar mediante procesos mecánicos como la compresión, o con tecnología de microondas, o por procesos químicos; muchas veces se combinan los procesos mecánicos y químicos [7,10, 11, 12]. La densificación se puede realizar, tangencial, radial o longitudinalmente; el más común es el proceso radial.

Dentro de los procesos mecánicos, se distingue la densificación *bulk* y la de superficie, que involucra los primeros milímetros de la madera. En la producción de clavijas es de interés la densificación *bulk*, que se obtiene con una prensa hidráulica.

Al mismo tiempo Luan y colaboradores [12] en su revisión, distinguen los procesos que añaden vapor antes o durante la compresión, de los que no lo añaden. Cuando se añade vapor, aumenta el contenido de humedad de la madera por lo cual disminuye su T_g , pudiendo emplear temperaturas menores, ya que actúa sobre la lignina y la hemicelulosa, sin degradarla. Esto aumenta la compresibilidad de la madera y reduce el nivel de tensión almacenada por compresión a través de la promoción del flujo viscoso de los polímeros de la madera [6]. Al mismo tiempo el vapor reduce el *spring-back* (recuperación del espesor de la madera densificada inmediatamente después de la liberación de la compresión carga) y las deformaciones de la madera densificada, explicado en parte porque el vapor y el calor ayudan a liberar las tensiones creadas durante el proceso, o por una recristalización de la celulosa. El vapor se puede aplicar en una etapa previa a la compresión (ejemplo es el proceso de compresión térmica viscoelástica, VTC, proceso patentado, que exige equipamientos especial) o ambas, previa y durante la compresión (procesos termo -hidro mecánicos, THM).

Los procesos que no añaden vapor (procesos termo-mecánicos, TM), en general se realizan en prensas hidráulicas, y la madera es previamente acondicionada y colocada entre las placas de la prensa precalentada, para luego ser comprimida a la temperatura y presión del proceso. No realizan control sobre el contenido de humedad de la madera ni de la humedad relativa del ambiente, y por lo cual el tratamiento previo de la madera es crucial [6, 12]. Para reducir las fracturas y deformaciones, se han llevado adelante diferentes estrategias como enfriar la madera por debajo de la T_g antes de liberar la carga de compresión para reducir la recuperación del espesor [6], o comprimir en etapas [13].

El empleo de tecnología de microondas, es un proceso rápido que presenta alta eficiencia energética, muy efectivo, pero poco estudiado [12].

La densificación química, emplea productos químicos que pueden impregnar la madera, con el objetivo de modificarla químicamente, o pueden rellenar la porosidad de la estructura de la pared celular, por impregnación o simplemente como pretratamiento para reducir el contenido de hemicelulosa y lignina. En este último caso, la madera puede ser colocada en una solución de $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SO}_3$ y calentada por varias horas, luego es lavada o inmersa en agua hirviendo y secada para ser comprimida en el equipo de compresión correspondiente [14, 15]. Sin embargo, los productos químicos suelen verse negativamente debido a su composición y costo, ya que esto impide que la madera se reutilice en el final de su vida útil, reduciendo potencialmente el beneficio obtenido con el desarrollo de productos de madera densificada libre de adhesivos y metales.

1.2. Posibles técnicas a emplear en Uruguay

La calidad del producto final, la madera densificada, depende de la elección del material de partida, de los parámetros del proceso y de los pasos posteriores, post proceso [16]. Como material de partida se cuenta con las especies madereras comerciales utilizadas en Uruguay: *Pinus taeda* y el *Eucalyptus grandis*, ambas especies de rápido crecimiento que presentan propiedades mecánicas medias a bajas. Son numerosos los ejemplos en la literatura de procesos de densificación de especies madereras análogas, que en general logran incrementar las propiedades mecánicas. Un aspecto a tener en cuenta en el estudio a realizar, es la dirección de densificación, ya que para un determinado patrón de corte y diámetro de la troza, se puede pasar de radial a tangencial en una misma pieza de madera lo que es determinado por la orientación de los anillos de crecimiento. Esto afecta la recuperación de la forma de la madera previa al y el *spring-back*, que hacen necesarios los tratamientos post proceso [16].

El proceso elegido para comenzar los ensayos es en dos etapas, un pre calentamiento de la madera en agua hirviendo y luego la densificación termo - mecánica en una prensa hidráulica abierta, trabajando a distintas temperaturas y tiempos de prensado [17]. Esta última es un factor muy importante, ya que se va a formar un gradiente de temperatura entre el interior de la madera y la superficie de las placas de la prensa calientes, que puede generar gradientes de humedad que afectan el proceso, por influir sobre las capas de la pared celular de la madera, afectadas por la Tg de lignina y de la hemicelulosa. Se debe encontrar para cada especie, una adecuada temperatura de prensado que asegure la densificación celular sin dañar la pared, ni que se genere estrés que al ser liberado cambie la forma de la madera comprimida [8]. Al mismo tiempo el resultado de la compresión es función de los factores anatómicos, la densidad inicial de la madera, el porcentaje de leño tardío y temprano, el volumen y la dirección de la carga.

Los tratamientos post proceso, buscan reducir los cambios en la madera al retirar la carga, o cuando es puesta en ambientes muy húmedos. Esto se logra a elevadas temperaturas, como por ejemplo aire a 212°C o una inmersión en aceite caliente. Se debe cuidar que la temperatura no degrade las hemicelulosas, por lo que se recomienda el uso de vapor encima de 150°C [6].

Si el proceso en dos etapas no condujera a que las clavijas obtenidas cumplieran las propiedades mecánicas esperadas, se ensayará el pre tratamiento con la solución de NaOH/Na₂SO₃.

2. Conclusiones

La revisión bibliográfica realizada muestra que es viable densificar las maderas comerciales uruguayas, para construir clavijas a emplear en el desarrollo de la madera laminada tarugada y la madera laminada cruzada tarugada.

Referencias

- [1] Tupenaite, L.; Kanapeckiene, L.; Naimaviciene, J.; Kaklauskas, A.; Gecys, T. (2023) Timber Construction as a Solution to Climate Change: A Systematic Literature Review. Buildings, 13, 976.
- [2] Mi, R., Li, T., Dalgo, D., Chen, C., Kuang, Y., He, S., Hu, L., 2020a. A clear, strong, and thermally insulated transparent wood for energy efficient windows. Adv. Funct. Mater. 30 (1), 1907511.

- [3] Bruzzone, G. (2022) Evaluación experimental de placas de madera laminada tarugada para la construcción de entresijos y techos de viviendas en Uruguay. Tesis Magíster en Ciencias Agrarias opción Ciencias Vegetales. Facultad de Agronomía. Universidad de la República Uruguay.
- [4] Sargent, R., Mikuljan, M., Kutnar, A. (2023) Densification of New Zealand-grown Eucalyptus species: effect of grain orientation and densification process on wood properties. *Wood and Fiber Science*, 55(2), 143-156
- [5] <https://doi.org/10.22382/wfs-2023-13>
- [6] Ravve, A. (2012) Principles of Polymer Chemistry. Springer New York, NY. 801 pp.
- [7] Cabral, J.P.; Kafle, B.; Subhani, M.; Reiner, J.; Ashraf, M. (2022). Densification of timber: a review on the process, material properties, and application. *J Wood Sci* 68, 20. <https://doi.org/10.1186/s10086-022-02028-3>
- [8] Back, E.; Lennart, S. (1982) Glass transitions of wood components hold implications for molding and pulping processes. *TAPPI Journal* 65(7):107110.
- [9] Li, R., Huang, R., Chang, J. (2019). Effect of hot pressing temperature on the density profile of compressed solid wood. *BioRes.* 14(1), 1482-1493. <https://doi.org/10.15376/biores.14.1.1482-1493>.
- [10] Pelit, H., Budakçi, M., and Sönmez, A. (2016). Effects of heat post-treatment on dimensional stability and water absorption behaviours of mechanically densified Uludağ fir and black poplar woods. *BioRes.* 11(2), 3215-3229. <https://doi.org/10.15376/biores.11.2.3215-3229>
- [11] Anshari, B.; Kitamori, A.; Jung, K.; Komatsu, K.; Guan, Z. (2021) Mechanical Properties of Compressed Wood with Various Compression Ratios. *Wood Research Journal* 7(1):1-5.
- [12] Namari, S.; Drosky, L.; Pudlitz, B.; Haller, P.; Sotayo, A.; Bradley, D.; Mehra, S.; O’Ceallaigh, C.; Harte, A.M.; El-Houjeyri, I.; Oudjene, M.; Guan, Z. (2021) Mechanical properties of compressed wood, *Construction and Building Materials*, Volume 301, 124269.
- [13] Luan, Y.; Fang, C.; Ma, F.; Fei, B. (2022) Wood mechanical densification: a review on processing. *Materials and manufacturing processes*. 37, 4, 359–371.
- [14] Li, L. L.; Wang, X. M.; Wu, F. Y. (2016) Chemical Analysis of densification, Drying, and Heat Treatment of Scots Pine (*Pinus Sylvestris* L.) Through a Hot-Pressing Process. *BioResources*. 11, 3856–3874. <https://doi.org/10.15376/biores.11.2.3856-3874>
- [15] Shi, J., Peng, J., Huang, Q., Cai, L., & Shi, S. Q. (2020). Fabrication of densified wood via synergy of chemical pretreatment, hot-pressing and post mechanical fixation. *J Wood Sci*, 66(1), 1-9. <https://doi.org/10.1186/s10086-020-1853-x>
- [16] Maturana, J.C., Guindos, P., Lagos, J. (2023). Two-step hot isostatic pressing densification achieved non-porous fully-densified wood with enhanced physical and mechanical properties. *Sci Rep* 13, 14324 <https://doi.org/10.1038/s41598-023-41342-8>
- [17] Scharf, A., Lemoine, A., Benedikt, N., Sandberg, D. (2023) The effect of the growth ring orientation on spring-back and set-recovery in surface-densified wood. *Holzforsch*, 77, 6, 394-406. <https://doi.org/10.1515/hf-2023-0004>
- [18] Pertuzzatti, A., Missio, A. L., Cademartori, P. H. G., Santini, E. J., Haselein, C. R., Berger, C., Gatto, D. A., and Tondi, G. (2018). Effect of process parameters in the thermomechanical densification of *Pinus elliotii* and *Eucalyptus grandis* fast-growing wood, *BioRes.* 13(1), 1576-1590. <https://doi.org/10.15376/biores.13.1.1576-1590>.

1169

THE EFFECTS OF MICROWAVE TECHNOLOGY ON SELECTED TECHNOLOGICAL PROPERTIES OF *EUCALYPTUS GLOBULUS* LABIL.

Fernando Mascarenha^{1s}; Alfredo Dias¹; André Christoforo²; Rogério Simões³

¹University of Coimbra, ISISE, ARISE, Department of Civil Engineering / Innovation and Competence Forest Centre (SerQ)

²Federal University of São Carlos (UFSCar), Department of Civil Engineering (DECiv)

³University Beira Interior (UBI), Department of Chemistry, Unit of Fiber Materials and Environmental Technologies (FibEnTech)

Palabras clave / Palavras-chave:

Eucalyptus, Impregnability, Mechanical properties, Microwave drying, Preservative product

Resumen / Resumo:

Despite its relevance and satisfactory mechanical properties, Portuguese eucalyptus (*Eucalyptus globulus* Labil.) faces challenges in impregnation due to its low permeability. Microwave (MW) treatment offers a solution, but its impact on mechanical properties needs further investigation. This work investigates the changes in the impregnability and mechanical properties of small clear wood samples with heartwood MW-treated at 400 W. MW treatment significantly increased the preservative retention. Although mechanical properties were somewhat reduced, they were still competitive with other wood species commonly used in construction. Hence, the findings suggest that MW treatment effectively improved eucalyptus' impregnability and can contribute to expanding its use as a structural wood material.

1. Introduction

Hardwood species have become more prominent in recent years in Europe. In Portugal, eucalyptus (*Eucalyptus globulus* Labil.) is an example of hardwood with special interest due to its elevated mechanical properties, ideal for manufacturing engineering and building elements with incorporated value [1]. However, the challenges in its processing, namely drying and low permeability, are limiting factors that prevent its wider and more emphatic use. For example, eucalyptus heartwood is not resistant to fungi and termites, but it is difficult to treat with preservatives using conventional pressure impregnation methods [2], which is a clear limitation to its widespread use.

Wood industry, construction and research are continuously searching for technologies that provide a better use of wood through solutions that not only improve the technological properties of wood but also improve its added value, thus increasing its use. The microwave (MW) treatment is one emerging technology in the field of wood modification that has gained more notoriety in the past few decades. It has been used for treating wood to attain better wood drying, improve wood permeability, and achieve enhanced retention of preservative products [3]. The MW treatment of wood depends on the wood species, the initial moisture content (MC), the stem part, the MW power, frequency, and exposure

time [3]. When moisture wood is exposed to MW, the water molecules interact with the electromagnetic field. As the MW energy applied increases, the water molecules move more intensively [4]. This movement causes the temperature to rise, generating water vapor. Thus, water and steam under high pressures leave the inner wood and end up breaking its cellular microstructures, such as cell walls and ray membranes [5]. This damage creates new pathways for liquids, thus increasing permeability and impregnability. In addition, the mechanical properties may or may not be reduced.

The literature still lacks information on the effects of MW treatment on the technological properties of Portuguese eucalyptus specimens. Based on the above and the existing research possibilities on the use of MW technology, this work has three complementary and successive objectives by applying MW energy to wood. Firstly, the aim is to assess the impact on the treatability (technological property) of Portuguese eucalyptus specimens containing only heartwood. Next, the aim is to investigate the effects of this MW treatment on selected technological properties, namely density, modulus of rupture (MOR), and modulus of elasticity (MOE) in static bending. Finally, the aim is to point out the benefits of MW treatment associated with the possibility of greater use of eucalyptus wood for structural purposes.

2. Methodology

2.1. Materials

In this research work, wood specimens without defects containing only heartwood (more difficult to impregnate) were used since they are easier and cheaper to work with and simpler to obtain the results. In addition, due to the formation characteristics of eucalyptus, small specimens can provide results very close to those of structural-sized elements [1]. Thirty-two wood specimens with 20 mm (R) x 20 mm (T) x 320 mm (L) were manufactured from commercial strands from eucalyptus wood from the central area of Portugal (Figure 1). Half of the wood samples were subjected to MW treatment (drying) (400W_25min), and the other half was not (Control), i.e., they were dried using a conventional oven.

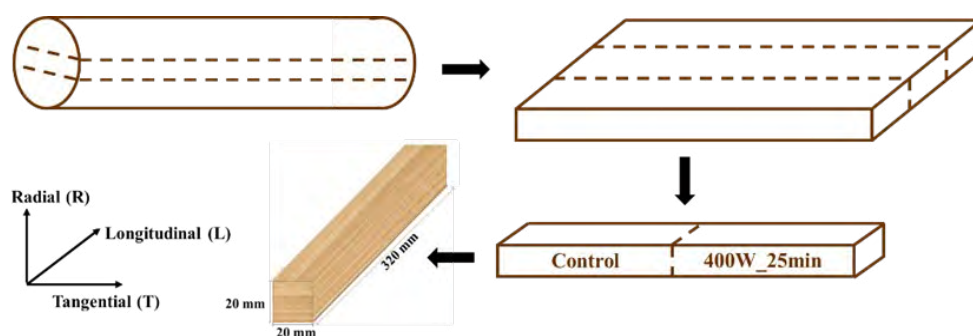


Figure 1. Preparation of the wood samples

2.2. MW treatment

The average initial MC of MW-treated samples was 61 %. They were dried using an MW power of 400 W for 25 min, followed by 30 s outside the oven, and successive cycles of 25 min until the average final MC was 12% (Figure 2).

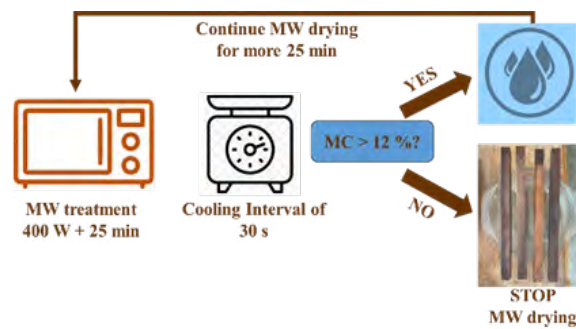


Figure 2. MW treatment process

2.3. Experimental tests

The wood samples were impregnated with the preservative product Tanalith E 8001 (at 5 % solution) using an industrial process, and the amount of product retained was calculated. After that, the MOR and MOE were assessed using ISO 13061-3 and 4 [6,7]. The densities of the control and MW-treated samples were measured using ISO 13061-2 [8].

3. Results and discussions

Figure 3 shows the results of the retention, bending MOR, and MOE of control and MW-treated samples. From ANOVA, the results of the same properties with different letters diverge significantly at $\alpha = 5\%$. The retention of the preservative product by eucalyptus wood samples increased by 227 % after MW treatment. This remarkable increase in impregnability may be associated with the microstructural changes caused by steam when leaving the wood at high pressures [5]. Depending on the final application of wood elements (location and environmental conditions), they must be analyzed for Use Classes (UC) [9]. Then, to be applied in UC 1, 2, and 3, the minimum value is 8.5 kg/m^3 , and the maximum is 18.8 kg/m^3 , and in UC 4, the minimum is 17.2 kg/m^3 and the maximum 31.3 kg/m^3 [10]. Given the results, while the control samples could not be placed in any UC, the MW-treated could be placed in UC 1, 2, and 3. The MW-treated samples could potentially improve the quantity retained by raising the preservative product concentration.

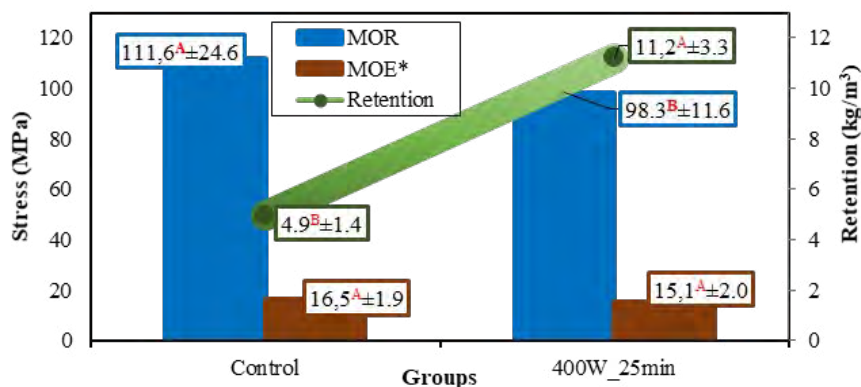


Figure 3. Average retention, bending MOR and MOE*, which are divided by 1000). Stress refers to MOR and MOE.

Regarding the mechanical properties, decreases of 12 and 8 % were found in MOR and MOE, respectively. Even with these small reductions, the MW-treated eucalyptus samples are competitive when their MOR and MOE are compared to other widely used wood species (Table 1), such as Norway spruce, frequently used for manufacturing engineered wood products. Therefore, MW-treated eucalyptus samples can meet the growing demand for wood in construction.

Table 1. Comparison of MOR (MPa) and MOE (GPa) of MW-treated samples and other common wood species

Wood species	MOR	MOE	Wood species	MOR	MOE
400W_25min [This study]	98.3	15.1	Norway spruce (<i>Picea abies</i> (L.) Karst.) [11]	79.0	9.4
Maritime pine (<i>Pinus pinaster</i> Ait.) poles [12]	67.0	12.0	Sitka spruce (<i>Picea sitchensis</i>) [11]	66.0	7.9
Douglas fir (<i>Pseudotsuga menziesii</i>) [11]	99.0	11.2	Jack pine (<i>Pinus banksiana</i>) [13]	70.7	6.2

The densities of the wood specimens were determined before and after the MW treatment, followed by impregnation with the preservative product. A minor decline was identified in the average density of 400W_25min, ranging from 852 ± 30 kg/m³ before MW drying to 836 ± 42 kg/m³ after MW drying and impregnation, a 1.85 % drop.

Finally, based on the results, MW technology has proved to be effective in improving and maintaining the technological properties of Portuguese eucalyptus, making it more competitive compared to other species.

4. Conclusions

The MW-treated samples of Portuguese eucalyptus had significant improvement in preservative retention compared to the control group, allowing them to be placed in UC 1, 2, and 3, unlike the control samples. Finally, the use of MW treatment could effectively increase the impregnability of eucalyptus without generating high decreases in MOR and MOE, which are still competitive with other wood species. Therefore, the benefits of MW show that it has the potential to open new opportunities for Portuguese eucalyptus to be used as sawn or engineered wood structural materials.

Acknowledgement

This work is financed by national funds through Foundation for Science and Technology (FCT), from Portugal, with grant agreement 2021.07636.BD attributed to the first author. It was partly financed by FCT/MCTES through national funds (PIDDAC) under the R&D Unit Institute for Sustainability and Innovation in Structural Engineering (ISISE) (UIDB/04029/2020), and the Associate Laboratory Advanced Production and Intelligent Systems (ARISE) (LA/P/0112/2020). We are also thankful the Department of Civil Engineering of the University of Coimbra, ISISE Coimbra, the Innovation and Competence Forest Centre (SerQ), the Department of Chemistry, Unit of Fiber Materials and Environmental Technologies (FibEnTech-UBI) of Universidade da Beira Interior, the Federal University of São Carlos, and Pinhal Nova Madeiras Tratadas for the entire assistance offered during the development of this study.

References

- [1] Majano-Majano, A.; Lara-Bocanegra, A.J.; Xavier, J.; Guaita, M. (2022) Splitting capacity of Eucalyptus globulus beams loaded perpendicular to the grain by connections, *Mater Struct.* 55:1-17. doi.org/10.1617/s11527-022-01983-z
- [2] European Standard (2016) EN 350. Durability of Wood and Wood-Based Products - Testing and Classification of the Durability to Biological Agents of Wood and Wood-Based Materials. European Committee of Standardization (CEN), Brussels, Belgium.
- [3] Mascarenhas, F.J.R.; Dias, A.M.P.G.; Christoforo, A.L. (2021) State of the Art of Microwave Treatment of Wood: Literature Review. *Forests.* 12:1–31. doi.org/10.3390/f12060745
- [4] Oloyede, A.; Groombridge, P. (2000) The Influence of microwave heating on the mechanical properties of wood. *J Mater Process Technol.* 100:67–73. doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00454-9.
- [5] G. Torgovnikov, P. Vinden, High-intensity microwave wood modification for increasing permeability, *For Prod J.* 59 (2009) 84–92.
- [6] International Standard (2014) ISO 13061-3. Physical and Mechanical Properties of Wood — Test Methods for Small Clear Wood Specimens — Part 3: Determination of Ultimate Strength in Static Bending. International Organization for Standardization (ISO), Switzerland.
- [7] International Standard (2014) ISO 13061-4. Physical and Mechanical Properties of Wood — Test Methods for Small Clear Wood Specimens — Part 4: Determination of Modulus of Elasticity in Static Bending. International Organization for Standardization (ISO), Switzerland.
- [8] International Standard (2014) ISO 13061-2. Physical and Mechanical Properties of Wood — Test Methods for Small Clear Wood Specimens - Part 2: Determination of Density for Physical and Mechanical Tests International Organization for Standardization (ISO), Switzerland.
- [9] European Standard (2013) EN 335. Durability of Wood and Wood-Based Products. Use Classes: Definitions, Application to Solid Wood and Wood-Based Products. European Committee of Standardization (CEN), Brussels, Belgium.
- [10] YOU Solutions Germany GmbH, Resumo das características do produto biocida (SPC BP), 2023.
- [11] Jang, E.S.; Kang, C.W. (2022) An experimental study on changes in sound absorption capability of spruce (*Picea sitchensis*), Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii*), and larch (*Larix kaempferi*) after microwave treatment, *J Wood Sci.* 68:2:1-6. doi.org/10.1186/s10086-021-02010-5.
- [12] Morgado, T.F.M.; Dias, A.M.P.G.; Machado, J.S.; Negrão, J.H. (2012) SIMPOLE - Simulation of Wood Poles Mechanical Behaviour, *Bioresources.* 7:3439–3451.
- [13] Overtani, S.; Koubaa, A.; Azzouz, Bahar, S. R.; Hassini, L.; Belghith, A. (2018) Microwave drying kinetics of jack pine wood: determination of phytosanitary efficacy, energy consumption, and mechanical properties, *Eur. J Wood Wood Prod.* 76: 1101–1111. https://doi.org/10.1007/s00107-018-1316-x.

1171

THE SECOND GENERATION EUROCODE 5

José Manuel Cabrero Ballarín¹; Ulrich Hübner²; Ad Leijten³

¹ Universidad de Navarra

² Association of the Austrian Wood Industries

³ University of Eindhoven

Palabras clave / Palavras-chave:

Standardization, Harmonization, Timber products, Design rules, Practice, Structural Design, Europe

Resumen / Resumo:

More than 20 years after the first generation of Structural Eurocodes Series was published, a new second generation Eurocode 5 is coming to effect. This conference contribution provides a general overview of its content. It briefly describes the intentions behind and main reasons for changes. It mostly explains Part 1-1, which relates to the General Rules and rules for Buildings, and it is therefore, the most widely used of all three parts of Eurocode 5.

1. Introduction

Structural Eurocodes ensure via design rules, that the “essential requirements” for construction works, as defined by the Construction Products Regulation EU/305/2011 [1], are met. They mostly relate to those of mechanical resistance and stability, safety in case of fire, safety in use and sustainability. They integrate those requirements into the harmonized European building market from the raw product to the full building scale, and are key documents which contribute to enhance harmonisation by reducing national deviations (e.g. national determined parameters, alternative design methods).

EN1995, known as Eurocode 5 (EC5) [2], is the standard dedicated to structural timber design, and it is part of a broader number of documents, dealing with the basis of design for structures in Europe, from load assessment and combination, definition of limit states, to detailed design procedures for structural materials. The structural design code for timber buildings is currently composed of three documents: Part 1-1 [2], which contains the general design rules for buildings; Part 1-2 [3], where rules for fire design are given; and Part 2, dedicated to bridge design [4].

Since the introduction of the first generation Eurocodes in 2004 many new products had been introduced into the market, and hence, they were not covered by the existing standard, e.g. Cross Laminated Timber panels. However, the latter is not the only aim, but one of them. Besides this, the new Eurocodes had to adapt to the current a state of the art, also to implement harmonised European products now on the building market, to

break down trade barriers within the European market, and to enhance the ease of use. These aims were dictated in 2012 by the European Commission by issuing mandate M/515 [5], which was taken by CEN [6] (Comité Européen de Normalisation, European Committee for Standardization) as a task to accomplish.

2. The second generation eurocode 5

The new second generation of Eurocodes is the answer to that mandate, and it has been reorganized and extended to meet those requirements. Eurocode 5 maintains (though with updated and highly extended content) the original documents. Moreover, new accompanying parts have been developed to include new but established technologies and provide a deeper insight into certain aspects.

2.1.New structure

The new structure is as follows:

- prEN 1995-1-1: General rules – General rules and rules for buildings [7]
- prEN 1995-1-2: General rules – Structural Fire Design [8]
- prEN 1995-3-: General rules – Rules for Timber-concrete composite structures (new part, based on current CEN/TS 19103) [9]
- prEN 1995-2: Timber bridges [10]
- prEN 1995-3: Execution rules (new document, previously included in a much reduced version as a chapter in part 1-1) [11]

All new Eurocodes follow a new but harmonized structure of chapters provided as a guideline by CEN/TC250. One important emphasis is Ease of Use.

After a formal enquiry period, that will end in January 2024, and an answering period to the provided national comments, the formal vote for final approval is due between April and May 2025. It is expected that the new documents will be made available in August 2025 and all language versions in 2027 after which the old Eurocodes are to be withdrawn by all National Standardization Bodies.

2.2.Main content changes to part 1-1

Significant changes and new content in the formal enquiry draft of prEN 1995-1-1 [7] are summarised below (with reservations, since they may change during the ongoing commenting period):

- **Basis of design.** Environmental effects are extensively refined. A new class for fully saturated wood is defined. New material groups are introduced, and partial factors defined for each of them.
- **Materials.** The rules now will consider this highly developed area in the recent years. The most important of those new developed products are introduced, e.g. cross laminated timber. For the sake of clarity, products are grouped together according to similar structural behaviour. Material shrinking and swelling values are now provided, as well as all the related modification factors. A key aspect is the accompanying Annex M which will determine the material parameters that shall be declared by the producers in their Declaration of Performance (DoP).

- **Durability.** Additional considerations are now given, such as appropriate design details to avoid wood decaying. Resistance to corrosion will now be considered with exposure categories, both for the environment and the wood itself.
- **Structural analysis.** Besides principles for structural modelling, imperfections and also simplified assumptions are given. Two alternative methods for stability problems are included.
- **Ultimate Limit States.** The verification of this Limit State is now based on the failure of cross-sections of members, composite members, connections, or planar elements resisting diaphragm actions. Compression perpendicular to grain now includes verification according to three different permissible deformation limits. Shear strength definition has been harmonised. Additional regulations, such as rules for holes in beams, or reinforcements, are given.
- **Serviceability Limit States.** The verification is based on deformations and vibrations. Performance classes for vibration verification are now defined, including subjective perception. Explicit load combinations are now given, and creep is taken into account.
- **Connections.** All the connection related information, such as the slip modulus, is now contained within this chapter. It is expanded from dowel-type fasteners and shear connectors to now include bonded-in rods, brittle failure verification and carpentry connections. A clear distinction is made in the connection design between axial and lateral resistance. Rules are given for fasteners used as reinforcement. Allowed geometrical deviations in execution have been moved to prEN 1995-3.
- **Mechanically and glued webbed or flanged beams.** Former contents are slightly revised.
- **Planar elements resisting diaphragm action.** Basic principles for load distribution among the ground plan of timber structures are given. Rules to consider the whole structural system and not only the racking resistance of walls are provided.
- **Foundations with timber piles.** Rules are introduced

Besides, additional annexes are given in the document. In particular for issues where further rules or details are required. Annexes provide extended design rules for robustness (Annex A), connections with intermediate layers (Annex K), laminated deck plates (Annex L), punched metal plate fasteners (Annex H), three-dimensional connectors (Annex I), connections with expanded tube fasteners (Annex J), stability and bracing (Annex B), vibrational response of floors (Annex G), connections with interlayers (Annex K), laminated decks (Annex L), and numerical analysis of unidirectional timber elements (Annex O).

The new main document has about 290 pages, plus approximately 180 pages of annexes. Though the document has greatly increased in size, ease of navigation and Ease of Use have been improved by means of the revised structure, as well as the placement of specialized content within the annexes.

3. Conclusion

A new generation of the Eurocode 5 is soon to be voted and eventually made available. This new document provides an enhanced set of rules, based on the current practice. One of the main characteristics is the inclusion of many new products already available (and used) in the market. Eurocode 5, as the main document to provide structural design rules for the use of timber products, is decisive for the harmonisation of the construction sector. The future version gives an extended support for designers.

Acknowledgement

It must not be forgotten this new document is the result of the work of many European experts, involved in many different Working Groups during many years. The authors wish to express their gratitude to those many people who actively have supported the development of the Eurocodes, either by collaborating in one of the Working Groups, Project Teams, or by commenting and evaluating the many developed drafts until these final documents.

The first author would like to acknowledge the financial support provided by the Spanish Ministerio de Ciencia e Innovación and Fondo Europeo de Desarrollo Regional under contract PID2020-118569GB-C21 MINECO/FEDER UE.

References

- [1] European Regulation (2011) European Union: Construction Products Regulation (CPR) – Regulation (EU) No 305/2011 of the European Parliament and of the Council.
- [2] European Standard (2010) EN 1995 1-1: Eurocode 5. Design of timber structures— Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings. Comité Européen de Normalisation (CEN), Brussels, Belgium,.
- [3] European Standard (2010) EN 1995 1-2: Eurocode 5. Design of timber structures— Part 1-1: General rules – Structural fire design. Comité Européen de Normalisation (CEN), Brussels, Belgium.
- [4] European Standard (2010) EN 1995 2: Eurocode 5. Design of timber structures— Part 2: Timber bridges. Comité Européen de Normalisation (CEN), Brussels, Belgium.
- [5] European Commission (2012) M/515 EN – Mandate for amending existing Eurocodes and extending the scope of structural Eurocodes. Enterprise and industry directorate-general, European Commission, Brussels, Belgium.
- [6] Comité Européen de Normalisation (2012) N993 Response to Mandate M/515 – Towards a second generation of EN Eurocodes. CEN/TC 250, Comité Européen de Normalisation (CEN), Brussels, Belgium.
- [7] European Standard (2023) prEN 1995-1-1 for Formal Enquiry - Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General rules - General rules and rules for buildings. CEN/TC 250/SC 5, Comité Européen de Normalisation (CEN), Brussels, Belgium.
- [8] European Standard (2023) prEN 1995-1-2 for Formal Enquiry - Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-2: General rules – Structural fire design. CEN/TC 250/SC 5, Comité Européen de Normalisation (CEN), Brussels, Belgium.
- [9] European Standard (2023) CEN/TS 19013: Eurocode 5: Design of Timber Structures – Structural design of timber-concrete composite structures – Common rules and rules for buildings. CEN/TC 250/SC 5, Comité Européen de Normalisation (CEN), Brussels, Belgium.
- [10] European Standard (2023) prEN 1995-2 for Formal Enquiry – Eurocode 5: Design of timber structures - Part 2: Timber bridges. CEN/TC 250/SC 5, Comité Européen de Normalisation (CEN), Brussels, Belgium.
- [11] European Standard (2023) prEN 1995-3 for Formal Enquiry – Eurocode 5: Design of timber structures - Part 3: Execution rules. CEN/TC 250/SC 5, Comité Européen de Normalisation (CEN), Brussels, Belgium.

1172

TIMBER WALKWAYS DURABILITY EXPOSED TO MARITIME ENVIRONMENTS

Dulce Henriques¹

¹ Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, ISEL

Palabras clave / Palavras-chave:

Timber. Maritime environment. Durability-based design. Preservation. Service life

Resumen / Resumo:

The following text reflects on the behavior of timber in service, in walkways and decks in aggressive environments and the details that induce its durability. Projects in which wood is subject to use classes 3 and 4 must take durability into account, considering several aspects, namely: assessing environmental conditions and impacts, choosing the right materials, implementing constructive drainage and ventilation solutions, applying the right preservation treatment and/or appropriate coatings. The study presents the characterization and testing of three wood protection products for exteriors in a maritime environment. The results of samples exposed for six months are presented and discussed. As a complement, a visual inspection of two case studies of wooden walkways located in coastal environments in Portugal is presented. The two constructions have very different initial design and maintenance conditions. The effects and causes of each type of condition are analysed and organized so that design issues become evident, and lessons can be learned for the future. The effects related to the impact of extreme humidity conditions and compliance or non-compliance with construction rules on the durability of structures are highlighted. Through the literature review, the exposure tests, and the detailed study of the two cases taken as examples, the reader is provided with important information to move forward in discovering the most advantageous timber construction methods in terms of durability, cost savings during service and extending service life.

1. Introduction

Wood has been selected as a material of excellence for creating calm and pleasant environments, allowing for bold forms in modern architecture. As a biodegradable and renewable material, it has established itself as a reliable alternative for structures, compared to inorganic and industrial materials such as steel and reinforced concrete. When exposed to chlorides from maritime environments, it has much greater resistance than steel as a structure or as part of reinforced concrete [1, 2]. The choice of wood as the preferred structural material for buildings and support equipment on beaches and in coastal areas is due to its good performance. However, it is imperative that these constructions follow good quality design, construction, and maintenance criteria [3]. Only in this way will it be possible to guarantee the durability of timber constructions, raising their profile in society and ensuring

that this option lasts over time, consolidating the service life. The scientific and technical community has been working intensely in this regard in recent years, seeking to provide answers on predicting wood deterioration factors in outdoors above ground applications and how to avoid them, promoting their durability. As a result, several studies and guides for durability-based design were promoted, like 'WoodExter', 'WoodBuild', and 'DuraTB' in Europe [3, Isaksson et al. 2014 cited by 4, 5] and WoodSolutions in Australia [6].

When exposed to outdoor environments, the wood is subject to a sequence of surface degradation reactions, induced by different environmental factors [7, 8]. The changes in the surface layer of the wood under these conditions are mainly due to the breakage of lignin and other constituents of the wood by the ultraviolet rays and their subsequent removal by the rain associated with the rapid loss of extractives soluble in water [7]. Prolonged exposure to atmospheric agents leads to discoloration, either by the loss of the natural color of the wood or the accumulation of dirt, as well as the eventual growth of fungi on the surface. On the other hand, repeated variations in temperature and humidity of the ambient air cause successive cycles of wetting and drying of the wood, with consequent expansion and retraction, leading to the opening of cracks. These potentiate, in turn, the exposure of the underlying layers of wood to the atmospheric agents and the progression of the process to its interior [9, 10].

2. Experimental campaigns

Two test programs were developed in Lisbon, with the support of ISEL's Wood Laboratory, with the aim of studying wood situations exposed to aggressive outdoor environments.

The first study was carried out for a master's thesis at the Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL) [10], with the aim of determining the relationship between the performance of wood surface protection products and different service situations. Their ability to resist environmental aggressions was assessed, simulating an application exposed to the elements (use class 3.2 - EN 335-2:2013). This article presents the study of specimens exposed to coastal environmental conditions (salinity).

The second study aimed to characterize wooden bridges and walkways and was developed for a master's thesis at the Instituto Superior Técnico (IST) [11]. This study presents the inspection of cases exposed to the coastal environment. The sites are on the Atlantic coast, near Lisbon (Portugal). Deterioration mechanisms typically due to humidity, salinity, solar radiation, and human impact were depicted. The information gathered is valuable for a better understanding of the impact under these conditions and provides the necessary information for future studies.

3. Testing wood protection products

A sample of 28 softwood specimens from wall wood paneling with 10 x 95 x 150 mm was used. The specimens from species of *pinus*, spp (pine) and *picea*, spp (spruce) presented sapwood and heartwood, several ring arrangements and some of them had knots. To evaluate the performance of different wood coatings and protectors for exterior use, three commercial water-based products were selected for their characteristics: WRN - water resistance ensured by nanotechnology; WAC - weather-resistant acrylic copolymer; ART - acrylic resins with Teflon [10]. A test plate was made up of four batches of samples replicated seven times. Three batches were painted with two coats of each

protection product, and one batch was left untreated, as a control batch, Cntr. (Figure 1 a)). After stabilization in a conditioned room, all irregularities were recorded, and the mass of each specimen was recorded. The test plate was exposed to the environment between April and October 2014 [10]. The exposure of the plate was maximum: oriented to the south, semi-horizontal, with an inclination of 20°, passing through the most severe months of heat and ocean ventilation on the west coast of Portugal (Figure 1 b.) [10].

At the end of this exposure period, the specimens were stabilized in a conditioned room and subjected to physical and chemical tests to assess properties related to both the appearance and performance of the wood and coating: loss of mass; loss of gloss; color change; film adhesion; resistance to natural ageing; water permeability.

Results of natural ageing (compliance of all aspects of physical change) are presented in Figure 1c). For comparison purposes, the results obtained from the other severe exposure environments included in the study (Ind-industrial, Rur-rural and Soil) are included. It can be seen, that of all the environments studied, the marine environment was the one to which the wood was most resistant. The best results were found for the marine environment and the products WAC - weather-resistant acrylic copolymer; ART - acrylic resins with Teflon [10]

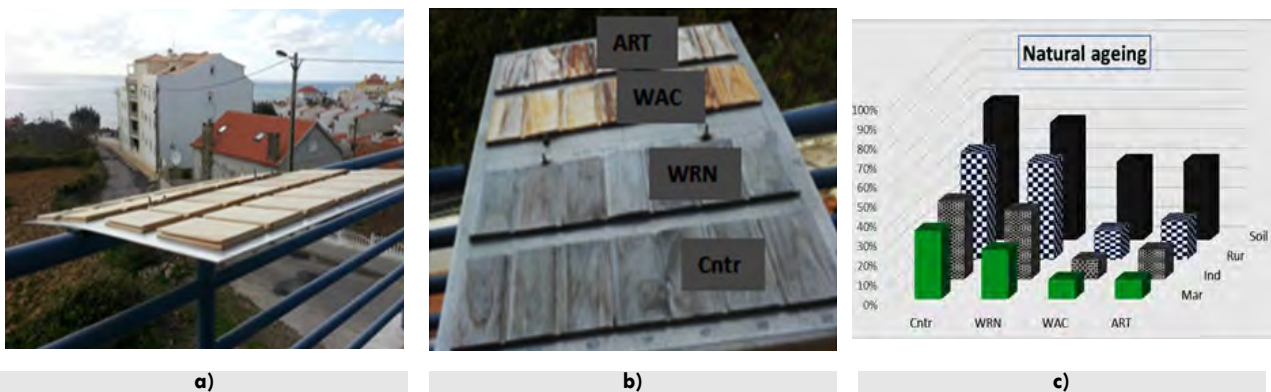


Figure 1. a) Test plate installation site [10]; b) Appearance of the batches after 6 months of exposure [10] c) Results of natural ageing (the maritime exposure is in green) [adapted from 10]

4. Surveying walkways condition

Two wooden walkways located in Atlantic coastal environments west of Lisbon are presented as Case Study 1 and Case Study 1. In this article, only the part of [11] that refers to buildings exposed to maritime environments is presented. The two cases studied have very different initial design and maintenance conditions. Of note, are the effects related to the impact of extreme humidity conditions and compliance or non-compliance with durability-based design rules for timber structures in outdoor environments.

Case Study 1 was only 3 years old when it was inspected, but already showed some signs of degradation. The metal connectors were already predominantly corroded. The horizontal surfaces have no slope for rainwater drainage, and there were already some open cracks along the grain [12]. The supporting pillars are made of round timber and can be referred to as logs. The disadvantages of round timber as a structural element include the greater tendency for deviant cracking and the lack

of solutions for effective joining. In this case, these disadvantages are clearly visible. The advantages include the good relationship between the cross-section and the strength of the outer fibers. Since the density of the fibers and, consequently, the strength and stiffness properties increase with the radius from the center, the most favorable structural wood is found on the outside of the element [13].

The design of the Case Study 2 walkway, include multiple features that allow protection from direct sunlight, an appropriate ventilation and drainage from accumulating water. Handrails and benches had inclined surfaces and protected fixings on the underside of horizontal surfaces that were mostly free from corrosion. The clearances between elements were sufficient and the finishing appeared to be generally intact and protecting the material.



a)



b)



c)

Figure 2. a) and b) Case Study 1: Location and appearance of the walkway [11]; c) Case Study 2: Location [11]

5. Conclusions

This study shows that the durability of walkways is related to the optimization of construction details, the correct choice of materials and protection measures. This requires expertise and adequate research to provide the desired information. By reviewing publications by the most eminent researchers, it is possible to understand the most correct measures to adopt. Through the environmental exhibition campaign carried out with three types of commercial products and four different environments, it became known how pine wood reacts to marine environments. With on-site research, the importance of all previously reported factors became clear. In the end, this issue only validates that when wood is used as a construction material for external use, it can certainly be a durable option if care is taken in design, construction and maintenance.

Acknowledgement

The author is grateful for the Foundation for Science and Technology's support through funding UIDB/04625/2020 from the research unit CERIS. As well as to Instituto Politécnico de Lisboa (IPL) for the financial support to the TEC-TIMBER project (IPL/2019/TEC-TIMBER_ISEL) and to Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL) for making available the wood laboratory's equipment.

References

- [1] Sosa, Maria & López Pérez, Tracey & Reyes-Trujeque, J. & Corvo, Francisco & Camacho, Rafael & Quintana, Patricia & Aguilar, D. (2011). Influence of the Marine Environment on Reinforced Concrete Degradation Depending on Exposure Conditions. *International Journal of Electrochemical Science*. 6. 10.1016/S1452-3981(23)19682-9.
- [2] Treu, A.; Zimmer, K.; Brischke, C.; Larnoy, E.; Gobakken, L.R.; Aloui, F; Cragg, S.; Flaete, P-O.; Humar, M.; Westin M.; Borges, L.; Williams, J. (2019) Timber in marine environments. *BioResources*, v. 14(4), p. 10161-10184,
- [3] Thelandersson, S., Tord, I., Suttie, E., Frühwald, E., Toratti, T., Grüll, G., et al. (2011) Quantitative design guideline for wood in outdoor above ground applications. In proceedings of The 42th Annual Meeting of IRG/WP 11-20465, 2011;
- [4] Meyer-Veltrup, L., Brischke, C., Alfredsen, G., Humar, M., Flæte, P. O., Isaksson, T., Larsson-Brelid, P., Westin, M. and Jermer, J. (2017) The combined effect of wetting ability and durability on outdoor performance of wood – development and verification of a new prediction approach. *Wood Science and Technology*, 51, 615–637.
- [5] Brischke, Christian & Meyer-Veltrup, Linda & Alfredsen, Gry & Humar, Miha & Francis, Lesley & Flæte, Per-Otto & Larsson-Brelid, Pia. (2013). Natural Durability of Timber Exposed Above Ground – a Survey. *Drvna Industrija*. 64. 113-129. 10.5552/drind.2013.1221
- [6] Mackenzie, C. E.; Wang, C. H.; Leicester, R. H.; Foliente, G. C.; Nguyen, M. N. (2013) Timber service life design - Design guide for durability, Revised Version - (Victoria: Forest and Wood Products Limited).
- [7] Liu, R., Pan, X., Yang, Z. (2017) Measurement of three wood materials against weathering during long natural sunlight exposure. *Measurement*, Volume 102, Pages 179–185.
- [8] Bulian, F., Graystone, J. (2009) *Wood Coatings Theory and Practice*. Elsevier B.V. Oxford, UK.
- [9] Cruz, H., Eusébio, I., Rodrigues, M. (1997) *Revestimentos por pintura de madeira para exteriores* (in portuguese). Laboratório Nacional de Engenharia Civil, M10. ISSN 0873-6472
- [10] Leitão, R (2017) *Avaliação da eficácia de produtos inovadores de proteção da madeira para exteriores*. Thesis to obtain the Master of Science Degree in Civil Engineering ISEL/IPL – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa/Instituto Politécnico de Lisboa. Portugal. <https://repositorio.ipl.pt/handle/10400.21/4386>
- [11] Dialynas, E. (2021), *Durability by design of outdoor timber walkways and pedestrian bridges*. Thesis to obtain the Master of Science Degree in Civil Engineering. IST-UL - Instituto Superior Técnico – Universidade de Lisboa.
- [12] Henriques, D., Dialynas, E., Flores-Colen, I. (2024). Surveying Outdoor Timber Walkways and Pedestrian Bridges – Case Studies. In: Lanzinha, J.C.G., Qualharini, E.L. (eds) *Proceedings of CIRMARE 2023. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 444. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-48461-2_41
- [13] Chapman, J. (2004) Developments in utilising round timbers as structural elements. The 38th International Conference of Architectural Science Association ANZAScA. Launceston, Tasmania.

1173

TOWARD THE AUTOMATIC DEFLECTION ANALYSIS IN HISTORIC TIMBER SLABS BY COMBINING 3D POINT CLOUDS AND MACHINE LEARNING APPROACHES

Pablo Sanz-Honrado¹; Ruben Santamaria-Maestro¹; Jose Ramón Aira Zunzunegui¹; Paula Villanueva-Llaurado¹; Luis Javier Sánchez Aparicio¹

¹ Escuela Técnica Superior Arquitectura Madrid; ETSAM-UPM

Palabras clave / Palavras-chave:

Diagnostics, Laser scanner, Artificial Intelligence, Timber floors, Point Cloud

Resumen / Resumo:

In the field of Cultural Heritage, 3D point clouds have emerged as a key data source due to their ability to represent a scene (i.e., a timber floor or a complete building) with great resolution and accuracy (within a few millimetres) in a 3D digital space. While this data is commonly used for generating planimetries, HBIM and computational modelling; there is plenty of information within it that could extend its potential applications, particularly in the field of diagnostics. Under this basis, this paper introduces a novel methodology that attempts to exploit the features contained in 3D point clouds with the aim of evaluating deflection in historic timber slabs. Towards this end the combination of Artificial Intelligence approaches with other 3D point cloud methods were proposed to obtain relative deflection in timber beams with great accuracy and automatization. More specifically, a multi-resolution and multi-stage Random Forest classifier were proposed to detect the beams as well as its faces. These elements are further processed with the aim of extracting the relative deflection by using the connected component and minimum bounding rectangle algorithms. This methodology has been applied to a real study case with deflected timber slabs. Specifically, several floors of the Nuestra Señora convent in Avila were examined. The results obtained are really promising, showing a high level of accuracy in element detection (99% overall accuracy achieved by the Random Forest classifier) as well as a high degree of automatization.

1. Materials and methods

1.1.Study case

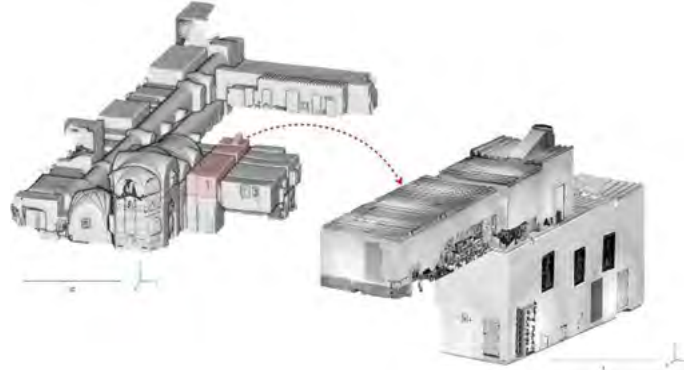


Figure 1. 3D point cloud of the convent Nuestra Señora de Gracia. The red zone highlights the area of interest for this study Adapted from Villanueva-Llauradó et al. 2022 [1,2].

The chosen case study is Nuestra Señora de Gracia convent in Avila, Spain. This historical architectural complex has been preserved since the 16th century and has undergone various modifications up to the 20th century. For further details about the constructive disposition of this building the reader is encouraged to consult Villanueva-Llauradó et al. 2022 (Figure 1) [2]. The data employed in this study was extracted from a previous digitalization campaign in which part of the timber slabs were digitalized through the application of the terrestrial laser scanner Faro Focus 120.

1.2.Metodology for evaluating the deflection of the beams

The primary objective of this research is to develop a methodology capable of exploiting the information contained in the 3D point cloud by combining Artificial Intelligence techniques with other point cloud processing methods. This methodology is summarized in the Figure 2.

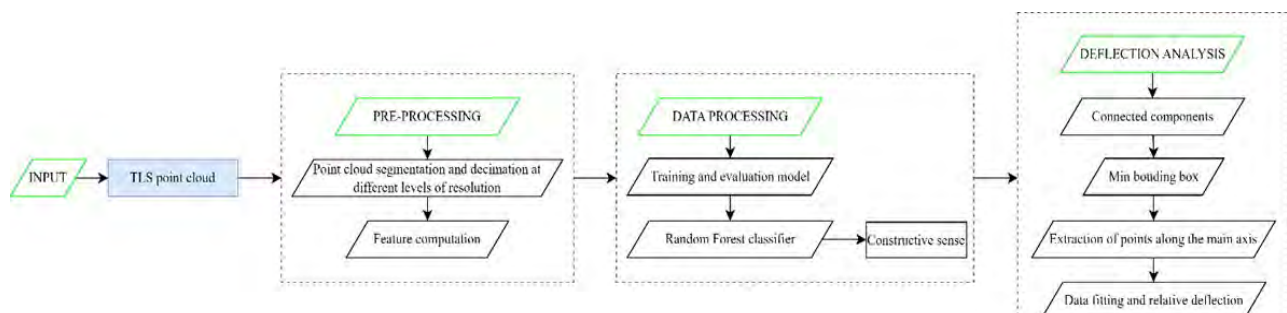


Figure 2. Scheme of the proposed workflow

The input of the methodology is the 3D point cloud acquired through Terrestrial Laser Scanner. This point cloud is a compilation of data from multiple scan stations that were aligned into a unique coordinate system. This input is pre-processed with the purpose of deleting extraneous elements such as people or ornamental motifs that were captured during the digitalization campaign. This phase also encompasses

a sampling step to ensure uniform data density in the input. After that, a data processing stage is proposed. This stage includes features extraction (used at the Artificial Intelligence training) as well as the classification of the data employing a multi-resolution and multi-stage Random Forest strategy [3], using three levels of classification. Finally, the methodology includes a deflection analysis on which it uses the data extracted from the previous stage as well as several point cloud processing algorithms to autonomously extract the deflection of the beams, using connected components and minimum bounding rectangle algorithms.

2. Experimental results

2.1. Machine learning predictions

As mentioned above, Random Forest has been performed on each level of the 3D point cloud, employing the enriched 3D point cloud as input (with the features previous showed). This step was carried out by using an ad-hoc script written in Python. The parameters used to run the Random Forest script were i) number of estimators (100,200), ii) maximum deep (none), iii) maximum number of features to take (square root), iv) bootstrap (false, true); as well as graphs to show results: i) Importance, ii) confusion matrix and iii) matrix classification matrix. The following tables and figures show the outcomes obtained during the application of the machine learning approach at various levels (Figure 3).

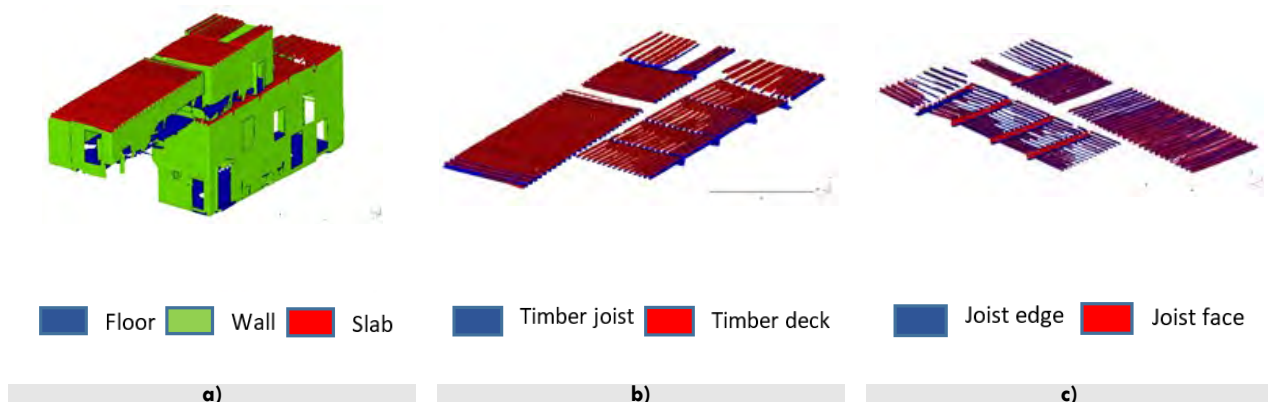


Figure 3. 3D point cloud of the prediction on: a) first level of classification, b) second level of classification and c) third level of classification

2.2. Timber joists deflection

The final stage of the methodology comprised the calculation of the beam's deflection. For this purpose, we employed the "Joist edge" class as input. This stage was computed by using an ad-hoc Python script following the steps defined in Figure 9. First, we split the beams by using the Connected Component algorithm. In this case the unique input value was the voxel resolution set at 1 cm, enabling the proper separation of elements (Figure 19 a). Following this, we computed the minimum bounding rectangle for each beam to determine its main axis and calculate its length. Complementary to this value, the length, we extracted the maximum and minimum deflection within each beam. These values were plotted in a single graph with the aim of facilitating further structural works (Figure 19 b).

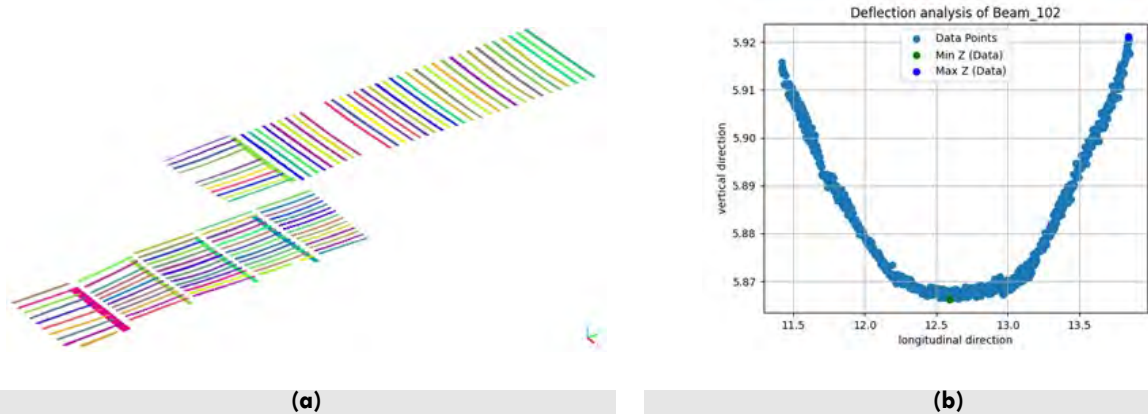


Figure 4. Results after applying the second step: a) element clusterization by using the connected components algorithm.; b) example of the graph obtained in the beam number 112 (units expressed in metres).

To enhance the workflow of the inspector, the results of this deflection analysis were integrated into the original 3D point cloud by adding two new layers. One layer represents the maximum deflection on each beam, while the other layer plots the beams that fulfil the relative deflection ($L/300$) [4] threshold in blue and those that do not meet the requirements in red (Figure 5).

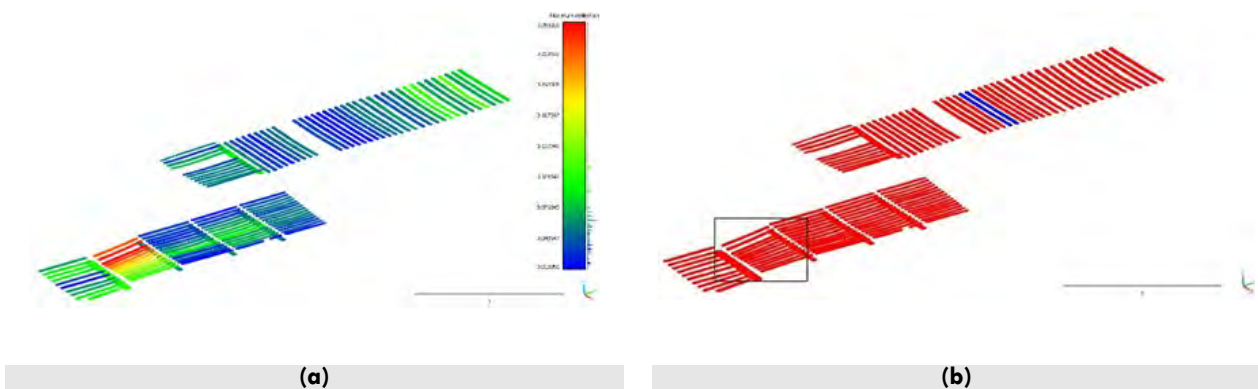


Figure 5. Results of the final 3D point cloud: a) with the maximum deflection layer (difference between the highest and the lowest point); b) with a layer that represents in blue the beams which meet the relative deflection ($L/300$) threshold and in red those that don't fulfil this requirement.

3. Conclusions

In accordance with the previous sections, it can be concluded that the proposed methodology shows a great potential for diagnosing timber slab floors as it seems to be robust and fast. In terms of time efficiency, this methodology can save a substantial amount of time compared to manually measuring deflections, requiring just a few minutes to process the slabs used in this study. Future works will focus on the following fields: i) further validation; ii) extension to other timber structures; iii) development of a tool able to integrate the process shown in this paper.

References

- [1] L.J. Sánchez-Aparicio, P. Villanueva-Llauradó, P. Sanz-Honrado, J.R. Aira-Zunzunegui, J. Pinilla Melo, D. González-Aguilera, D. V. Oliveira, EVALUATION OF A SLAM-BASED POINT CLOUD FOR DEFLECTION ANALYSIS IN HISTORIC TIMBER FLOORS, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. XLVIII-M-2-2023 (2023) 1411–1418. <https://doi.org/10.5194/ISPRS-ARCHIVES-XLVIII-M-2-2023-1411-2023>.
- [2] P. Villanueva Llauradó, M.Á. Maté González, L.J. Sánchez Aparicio, M.Á. Benito Pradillo, D. González Aguilera, L.C. García Palomo, P. Villanueva Llauradó, M.Á. Maté González, L.J. Sánchez Aparicio, M.Á. Benito Pradillo, D. González Aguilera, L.C. García Palomo, A COMPARATIVE STUDY BETWEEN A STATIC AND A MOBILE LASER SCANNER FOR THE DIGITALIZATION OF INNER SPACES IN HISTORICAL CONSTRUCTIONS, REHABEND. (2022) 2492–2498.
- [3] S. Teruggi, E. Grilli, M. Russo, F. Fassi, F. Remondino, A Hierarchical Machine Learning Approach for Multi-Level and Multi-Resolution 3D Point Cloud Classification, Remote Sensing 2020, Vol. 12, Page 2598. 12 (2020) 2598. <https://doi.org/10.3390/RS12162598>.
- [4] Ministerio de Fomento Documento BásicoSE-M Seguridad estructural Madera, (2019).

1174

VERNACULAR DEMOUNTABLE TIMBER SYSTEMS: CASE STUDY OF MEXICO AND THAILAND AS A FOUNDATION FOR NEW DEVELOPMENTS

Wendy Esther Romero Cisneros¹; Rachita Klinmalee¹; David Tadeo Esquer Covarrubias¹; José Amorim Faria¹

¹ FEUP

Palabras clave / Palavras-chave:

Vernacular architecture, Thailand, Mexico, Fully demountable and reusable wood structures, Construction systems and techniques, Prefabrication

Resumen / Resumo:

The utilization of timber solutions is on the rise as a trend in sustainable construction development. Despite its widespread recognition, certain countries, such as Thailand and Mexico, appear to lag in the adoption of timber technologies for new constructions. However, this has not always been the case. This paper aims to analyze and review the historical utilization of typical demountable wood structures as traditional-vernacular housing in two case studies in the central regions of Mexico and Thailand. The primary objective is to assess these traditional methods for their demountability and their capacity for disassembly and reuse. This, in turn, can serve as a foundation for further modern developments, specifically for prefabricated systems. Consequently, this could lead to the creation of an affordable housing model that utilizes local resources, drawing inspiration from past practices.

1. Introduction

As timber emerges as a prominent sustainable construction material, it inherently lends itself to the development innovation, there is a tendency to overlook the wealth of knowledge accumulated in local regions.

A crucial attribute of timber systems lies in their capacity for disassembly and reuse. The expectation is that these systems can evolve over time, facilitated by this inherent characteristic. Moreover, there is a deliberate consideration for extending the life cycle of timber structures and contemplating their end-of-life phase. This forward-thinking approach aims to ensure that the materials utilized can be repurposed for subsequent constructions.

To delve into these aspects, this paper focuses on two distinct types of vernacular architecture chosen from two very different countries, where the authors come from. The first case examines the Troje House system from the Purépecha indigenous community in the central region of Mexico. The second case explores a traditional Thai house, specifically the Ruen Krueng Sab structure, located in central Thailand. Both systems embrace the principle of disassembly, prompting an analysis of how these structures were dismantled in earlier eras.

In essence, this paper aims to conduct a comprehensive review of these traditional vernacular systems, specifically assessing the methods of disassembly as potential techniques or approaches for future development in modern constructions, with a focus on erecting and dismantling components for reuse.

In synthesis, the overarching goal is to learn from the past and extract valuable insights from these historical “sustainable” practices to inform and inspire contemporary advancements in timber construction.

2. Analysis for demountability

The proposition of utilizing reclaimed timber components as a means to prevent the disposal of valuable building elements and mitigate the production of new ones is evident. However, the absence of circular economy principles within existing structures poses challenges in fully extracting and leveraging reusable components. Contemporary systems, such as the load-bearing timber system designed for disassembly and reassembly multiple times over its lifespan, purport to offer a solution[1]. These systems claim to transcend traditional concepts of modality and reversibility, providing designers with minimal kits of parts for localized adjustments and accommodating a broad spectrum of designs. This study critically examines the assertion that these more recent systems represent a departure from traditional practices. It seeks to explore traditional and vernacular methodologies and assess their applicability to future development.

3. Case study 01: michoacan’s troje house system

The vernacular construction in Mexico exhibits a remarkable diversity, complex, as the different local conditions, included climates, and the vast indigenous regions in the country.

Michoacan, a state located in the central region of Mexico, is characterized for having heterogeneity in climates and for its integration into a mountain system called “Sierra Purépecha” which is characterized by having a scarcity of valleys [2].

The most common material used in Mexico was adobe, nevertheless the absence of suitable clays in this region, lead into the use of another natural resources. The distinctive typology of this house system also responds to the cold climate, high rainfall rate, the easy availability of wood and the economic activity of the people which was mainly dedicated to agriculture, with the need of housing relocation depending on the season [3].

This paper analyzes in one hand Mexico, with “La Troje” a Timber Fully Demountable System, and its potential adaptation for its preservation and possible implementation in new projects.

4. Case study 02: central thailand’s traditional adaptive houses

The study investigates the potential of adaptive reuse as a viable strategy to extend the lifespan of traditional Thai houses in the central region of Thailand. The primary objective is to explore the intrinsic adaptability of the traditional Thai house, utilizing the ready-made Ruen Krueng Sab structure as a case study [4].

This structure, reflective of historical Thai society in its traditions, construction methods, and artistic elements, is constructed from local hardwood teak (*tectona grandis*), enabling the disassembly, relocation, and reassembly of building components. Beyond the typical adaptive reuse involving functional conversion and interior modifications, the flexible structure allows for additional alterations, including relocation and a reorganization of the architectural layout.

5. Conclusions

“Architecture that is designed for adaptation recognizes that the future is not finite, that change is inevitable, but that a framework is an important element in allowing that change to happen”[5].

It is demonstrated that there is a potential improvement for Timber Demountable Systems hidden in the vernacular architecture of different regions of the world. Therefore, a deeper analysis of these local systems used in the past can lead into innovation and valuable new insights for the development of new solutions. There is also an opportunity to refine existing practices and adapt them.

This can make a path towards the evolution of Timber Demountable Systems that are not only responding to a sustainable trend, but also are working harmoniously with the socio-cultural conditions of the diverse communities around the world.

Acknowledgement

We extend our sincere appreciation to the communities, universities and researchers in Mexico and Thailand, whose cooperation and knowledge-sharing were instrumental in this research. Our gratitude also goes to our professors and colleagues for their invaluable contributions. This article is the result of collective effort of all involved, and we hope it inspires further developments in vernacular demountable timber systems.

References

- [1] X. Estrella, A. Muresan, D. Redaelli, J. Brütting, J. Warmuth, and C. Fivet, “A Reuse-Ready Timber Slab-And-Column System For Modular Building Structures,” in *13th World Conference on Timber Engineering, WCTE 2023*, 2023, pp. 3588–3593. doi: 10.52202/069179-0467.
- [2] J. A. B. Arroyo, E. M. A. Guzmán, W. Martínez Molina, J. L. Tinajero, and C. Lara Gómez, “La Troje Michoacana, Una Herencia Constructiva Purhépecha,” *II Congreso Iberoamericano y X Jornada de Técnicas de Reparación y Conservación del Patrimonio*, 2011.
- [3] A. Arreguín Pérez, “Adaptación del sistema constructivo del troje para su preservación y uso habitacional en Charapan, Mich.,” UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO, 2020.
- [4] S. Ramasoot, “Sustainability via Adaptability: Learning from the Traditional Thai House’s Built-for-Change Architecture,” *Journal of Architectural/Planning Research and Studies*, vol. Volume 10, no. Issue 1.2013, 2022.
- [5] D. Kronenburg, *Flexible: Architecture that Responds to Change*, Illustrated. Laurence King Publishing, 2007.

1175

VIGAS LAMINADAS DE PINO LARICIO ANDALUZ REFORZADAS CON FIBRAS DE CARBONO: APLICACIÓN A LA RESTAURACIÓN DE LA SEDE DEL RECTORADO DE LA UNIVERSIDAD DE GRANADA

Carlos Cruz Rodríguez¹; Yaiza Fuentes García¹; Francisco J. Rescalvo¹; Rafael Bravo Pareja¹; Francisco Javier Lafuente Bolívar¹; Antolino Gallego Molina¹

¹ Universidad de Granada

Palabras clave / Palavras-chave:

Rehabilitación, Madera técnica, Materiales compuestos, Optimización

Resumen / Resumo:

En este trabajo se muestran los resultados obtenidos de la elaboración de cuatro vigas laminadas de altas prestaciones de pino laricio reforzadas con fibra de carbono (CFRP). Estas vigas se han incorporado dentro de la restauración del Patio de la Capilla del Hospital Real (UGR) para su sustitución por vigas existentes de madera aserrada fracturadas. Las láminas han sido clasificadas y localizadas en la sección transversal en función de su clase resistente y módulo elástico dinámico longitudinal. Se han realizado ensayos acústicos no destructivos y ensayos mecánicos, demostrando una mejora significativa en las propiedades mecánicas generales. Además, estas mejoras han sido comparadas con cálculos analíticos.

1. Introducción

Gran parte de las estructuras históricas están construidas con muros de fábricas y vigas o diagonales con madera aserrada. Ante una actuación de rehabilitación, a menudo surge la necesidad de sustituir parcial o totalmente dichos elementos bien por presencia de patologías como pudrición o ataques de xilófagos, aparición de grietas o fisuras, o aumento de las solicitaciones a las que antes estaban sometidas.

Generalmente, estos elementos suelen sustituirse por madera laminada, un producto de madera de ingeniería ampliamente utilizado actualmente. El pino es una de las especies más empleada para la elaboración de estos productos de ingeniería estructural. Las vigas laminadas permiten mejorar con respecto de la madera aserrada la resistencia, rigidez, así como alcanzar secciones y luces sin límite, además de conseguir una mayor homogeneidad estructural. Esta mejora se produce en gran medida gracias a las uniones dentadas o finger-joints, permitiendo sanear los defectos imperfecciones como nudos, fendas, etc.

Este trabajo se centra en la sustitución de tres vigas aserradas ubicadas en el forjado de primera planta del Patio de la Capilla del Hospital Real, edificio del siglo XVI recientemente restaurado. Durante la primera mitad del siglo XX se construyó una escalera en una de las esquinas de dicho forjado de dimensiones en planta de 1,6 x 1,6 m y una altura de 6,8 m. El peso estimado de la escalera es de 7.500 kg. Esto provocó que las vigas bajo la escalera colapsaran, debido principalmente a dos causas: 1) Elevada carga; 2) carga excéntrica. Las nuevas vigas laminadas han tenido que resolver dichas causas y dos retos añadidos: 1) mantener el ancho original de las vigas (120 mm) por ser un edificio declarado de Bien de Interés Cultural; 2) límite máximo de canto de viga por el espesor del forjado de 270 mm respecto del muro principal.

Para alcanzar las exigentes prestaciones mecánicas y limitaciones de sección, se llevó a cabo una triple estrategia: uso de pino laricio, optimización de la ubicación de las láminas y lámina embebida de CFRP. Todas las vigas se ensayaron en rango elástico (sin rotura) a flexión a 4 puntos. Como elemento de control, se elaboró una cuarta viga para su ensayo hasta rotura en laboratorio.

Mediante la formulación propuesta en [1] se ha estimado el módulo de elasticidad longitudinal y transversal de las vigas con y sin el refuerzo. El cálculo del módulo de elasticidad transversal mediante formulación analítica es necesario para el cálculo de este tipo de elementos reforzados

2. Situación previa

La Figura 1-a muestra una imagen de la escalera compuesta por tabiquería maciza de 16 cm de espesor y una escalera de caracol de 550 mm de ancho de huella media y tabica de 250 mm de media. Bajo la esquina exterior de la escalera se colocó un cuadrado a modo de arriostramiento y distribución de cargas. Sin embargo, ambos apoyos en el muro habían sido afectados por la humedad y las cabezas se encontraban prácticamente podridas. Al dejar el cuadrado de cumplir su función y junto con la elevada carga, las vigas situadas bajo la escalera colapsaron. En la Figura 1-b se observa la vista inferior del forjado, mostrando las vigas con grietas. Para la sustitución por elementos nuevos de madera laminada, además de respetar el ancho de 120 mm, las nuevas vigas mantuvieron el mecanizado acanalado de las vigas existentes. Este acanalado se excluyó del cálculo.



(a)



(b)

Figura 1. Zona de intervención. a) Escalera del S.XX situada excéntricamente. b) Vista inferior de las vigas colapsadas bajo escalera

3. Materiales y métodos

3.1. Caracterización de láminas y descripción de los ensayos

En total se emplearon 36 tablas de madera andaluza de pino laricio con unas dimensiones en tabla aserrada y seca de $50 \times 150 \times 2.600$ mm. Las tablas se secaron a oreo durante 6 meses. Tras el secado, el contenido medio de humedad fue de $10 \pm 2\%$. Con el fin de clasificar las tablas, se realizaron ensayos de resonancia acústica longitudinal para obtener el módulo de elasticidad dinámico, MoE_{din} . Se obtuvo la distribución normal para todas las tablas (Figura 2-a), con un valor medio de MoE_{din} de 13.869 MPa (aplicando la corrección por humedad al 12% según la norma [2]).

Teniendo en cuenta el número de tablas, fabricación y la distribución normal obtenida de módulo elástico longitudinal dinámico se asignaron 3 calidades (Figura 2-a). Los valores de MoE_{din} medio obtenidos fueron de 1.289 ± 1.780 MPa, 15.390 ± 661 MPa y 17.112 ± 949 MPa para las calidades 1, 2 y 3, respectivamente. Así mismo, se llevaron a cabo ensayos de resonancia transversal para obtener el módulo de elasticidad transversal G_{din} (Figura 2-b).

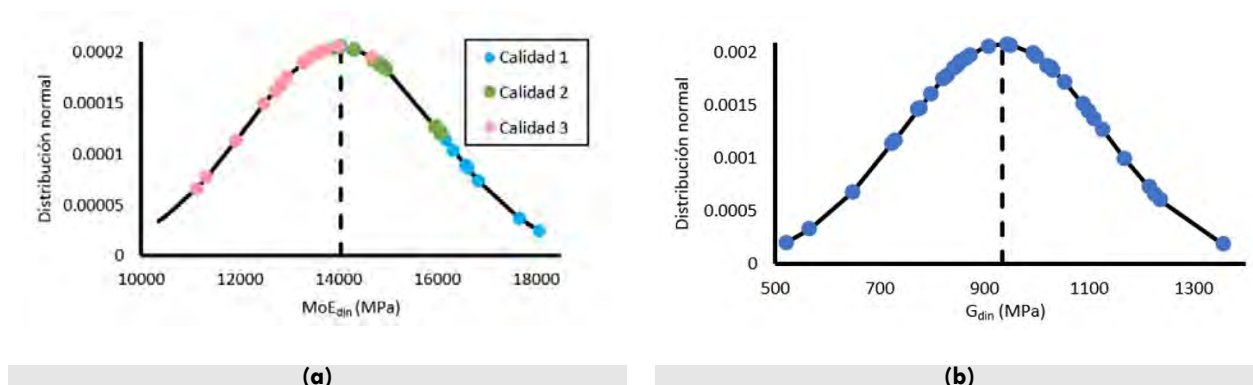


Figura 2. Distribución normal de las medidas acústicas de resonancia. a) MoE_{din} longitudinal. b) G_{din}

3.2. Vigas laminadas, configuración y fabricación

Teniendo en cuenta las tres calidades asignadas con el fin de obtener una optimización en sección, se han elaborado un total de cuatro vigas laminadas compuestas por 8 láminas cada una y un laminado de CFRP embebido entre las dos láminas inferiores. La longitud de las vigas para cumplir con la distancia entre apoyos fue de 3.500 mm.

En concreto, y siguiendo el diagrama de distribución de tensiones en una viga de sección rectangular, las láminas de mejor calidad (calidad 1) se han colocado en las láminas externas (máximas tensiones). Esto es, las láminas 1 y 8 según la Figura 3-a. La calidad 2 se dispuso en continuación a las láminas de calidad 1 en dirección al centro de la sección (láminas 2 y 7). Por último, en la parte central de la viga se colocaron las láminas de peor calidad (calidad 3). La Figura 3-b muestra una vista frontal de la viga con la disposición de calidades y la distribución de uniones dentadas dentro de la viga norma [3]. Por último, el laminado de fibra de carbono se embebó durante el proceso de laminado entre las láminas 1 y 2, siendo además de calidad 1 y 2, respectivamente. De esta manera, se consigue una gran capacidad resistente dadas las buenas características mecánicas en esta zona y también debido al brazo mecánico. Cada lámina incluye uniones dentadas entre tablas y están elaborados de acuerdo a la norma [3].

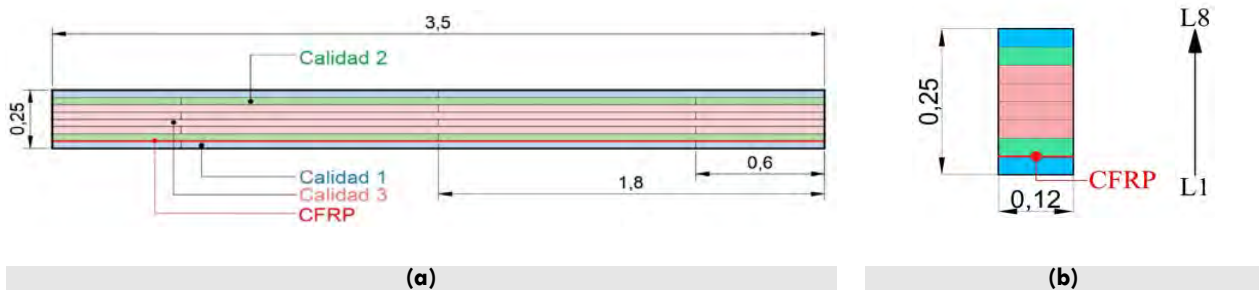


Figura 3. Configuración de vigas laminadas. a) vista frontal b) sección transversal. Dimensiones en m.

4. Resultados

A continuación, se presentan los resultados de la viga 4, la cual fue ensayada hasta rotura en laboratorio y sirvió como control para la validación del resto de propiedades de las vigas instaladas en obra. La Tabla 1 muestra la distribución en sección del módulo a cortante dinámico, módulo elástico dinámico longitudinal y las clases resistentes por lámina de la viga 4. Debido a la optimización en sección, se observa como las láminas externas alcanzan al menos una clase resistente T26, mientras que las internas varían entre una T14 y una T21. Es decir, en la zona interna el MoE_{din} promedio es de 12.454 MPa, mientras que, en las láminas externas de 15.323 MPa, lo que representa una diferencia del 23%.

Con el fin de evaluar la mejora introducida por el refuerzo embebido, la Tabla 2 muestra las diferentes propiedades mecánicas obtenidas para la misma viga antes y después de ser reforzada. Estos valores se han obtenido experimental y analíticamente empleando trabajos previos [4, 5].

Se observa que el refuerzo aporta un incremento del 10% respecto del módulo de elasticidad estático, valor cercano al módulo de elasticidad calculado analíticamente (8%). En cuanto a los resultados dinámicos de módulo de elasticidad longitudinal, como se esperaba se obtiene una menor variación (5%), debido a que longitudinalmente apenas influye la rigidez real de la fibra de carbono empleando esta metodología [4]. Al realizar una medida de resonancia transversal y obtener el G_{din} , si se obtiene una mejora en correlación con el resto de propiedades mecánicas del 8%. Por último, destacar que la resistencia máxima a flexión fue de 62 MPa, un 94% mayor que para la clase más exigente que incluye la norma [3], una GL32c.

Tabla 1. Propiedades y distribución de láminas en la viga 4. CR: Clase Resistente. Colores según calidad de la lámina (Figura 3)

POSICIÓN	G_{din} (MPa)	MoE_{din} (MPa)	CR
L8	1356	14319	T26
L7	864	13900	T24
L6	1125	12499	T18
L5	774	11113	T14
L4	950	12959	T18
L3	796	13285	T21
L2	855	14015	T26
L1	646	16326	T30

Tabla 2: Características mecánicas de la viga laminada 4, antes y después del refuerzo con CFRP.

Antes del refuerzo						Después del refuerzo				
Elemento	MoE _{est} (MPa)	MoE _{din} (MPa)	MoE _{analítico} (MPa)	G _{din} (MPa)	G _{analítico} (MPa)	MoE _{est} (MPa)	MoE _{din} (MPa)	MoE _{analítico} (MPa)	G _{din} (MPa)	G _{analítico} (MPa)
Viga 4	14265	13897	14490	1039	1037	15779	14651	15694	1132	894

5. Conclusiones

La selección de madera de calidad, la optimización en sección y la introducción del CFRP embebido ha demostrado ser una estrategia eficaz ante una situación de cargas y limitación geométrica altamente exigente. Se ha evaluado la mejora que introduce el refuerzo respecto de cada viga mediante ensayos experimentales y cálculos analíticos desarrollados en trabajos anteriores, verificando su validez. Todo ello ha conllevado a un producto de altas prestaciones inexistente en el mercado.

Agradecimientos

Constructora Dávila Restauración de monumentos; estudio de arquitectura Annona; Iberolam Timber&Technology (www.iberolam.com); Proyecto LIFE Wood for Future (<https://life-woodforfuture.eu/>)-(LIFE20 CCM/ES/001656); Proyecto Smarttimber (PID2020.114386RB.I00).

Referencias

- [1] Bender, Thomas, D, Skaggs and Donald, A. (2007) Shear Deflection of Composite Wood Beams. Wood and Fiber Science. págs. 327-338.
- [2] Norma Española, UNE-EN 384:2016+A1. (2020) Madera Estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad.
- [3] Norma Española UNE-EN 14080. (2022) Estructuras de madera. Madera laminada encolada y madera maciza encolada. Requisitos
- [4] Rescalvo, F.J, Timbolmas, C., Bravo, R., Valverde-Palacios, I. (2021.) Improving ductility and bending features of poplar glued laminated beams by means of embedded carbon material. Construction and Building Materials.
- [5] Timbolmas, C., Bravo, R., Rescalvo, F.J., Gallego, A. (2022) Development of an analytical model to predict the bending behavior of composite glulam beams in tension and compression. Journal of Building Engineering.

1176

VIVIENDA SOCIAL EN MADERA. ESTUDIO DE CASOS EN URUGUAY

Susana Torán Reyes¹; Laura Bozzo Clara¹; Stephanie García Marrero¹

¹ Facultad de arquitectura Diseño y Urbanismo - Udelar

Palabras clave / Palavras-chave:

Entramado ligero, Evaluación integral, Habitabilidad, Relocalizaciones

Resumen / Resumo:

Es indudable la influencia de los modos de producción del hábitat en la construcción de ciudad y ciudadanía, y cómo ha cambiado al modificarse los patrones culturales y promover el Estado distintas modalidades. Evaluar los programas de vivienda social es una metodología para la mejora continua de esos emprendimientos. La Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo de la Universidad de la República trabaja en ello desde hace tres décadas. El interés en incorporar la evaluación de las realizaciones en madera se refuerza por la promoción de los sistemas constructivos con madera nacional tendientes a disminuir el déficit habitacional, reduciendo tiempos de ejecución y costos de obra, previsto en el Plan Quinquenal de Vivienda 2020-2024 del Ministerio de Vivienda y Ordenamiento Territorial.

El proyecto plantea trabajar sobre una muestra en Montevideo, Rivera y Salto, construida en diferentes épocas, formas organizativas, tipologías y escalas. Se busca determinar debilidades y fortalezas del trabajo realizado para mejorar el futuro: relación costos - satisfacción de necesidades y mejoramiento de la calidad de vida de las familias; participación de los destinatarios en la construcción; utilización de tipologías y sistemas constructivos en madera; monitoreo y simulación del desempeño higrotérmico; grado de satisfacción y confort de los usuarios; estudio de factibilidad económica, financiera y logística entre otras.

La participación en CIMAD 24 será ocasión de poner en discusión conclusiones y propuestas que retroalimenten los diferentes programas de vivienda social en madera y en particular de la asistencia técnica, en los aspectos organizativos, constructivos, técnicos y de confort.

1. Introducción

La industria de la construcción es responsable del 4 % del consumo energético mundial y de un tercio de la emisión de los Gases de Efecto Invernadero (GEI) ambos indicadores están asociados al calentamiento global, fenómeno que incide directamente en el cambio climático (*United Nations Environment Programme. Annual Report UNEP 2007*).

Según la ONU, resolver la crisis habitacional será imposible con los materiales tradicionales. El recurso del que se dispone a gran escala es la madera, que es renovable, “almacena carbono y requiere para su procesamiento menos energía que otros materiales de construcción”. Es además, un material “biodegradable y no contaminante, susceptible de ser incorporado nuevamente a la tierra” (Hernández, 2010).

Durante décadas la construcción con madera y la vivienda colectiva se consideraron incompatibles. Hoy, hay un cambio de paradigma. Un número cada vez mayor de programas arquitectónicos utilizan una variedad de procesos constructivos en madera proporcionando respuestas que se adaptan mejor a los estándares de vida actuales y en particular, con el deseo de lograr un mejor desempeño ambiental.

En Uruguay el uso de la madera en la construcción ha sido escaso o nulo a pesar que es uno de los materiales más antiguos utilizado por la humanidad para construir sus refugios. Por consiguiente, en el país no existe una tradición de construir con madera, porque en el pasado no se contó con madera nacional para uso estructural y en algunas ciudades como Montevideo aún existe desde la época colonial la prohibición de construir con madera en zonas urbanas (Facultad de Arquitectura. Instituto de Historia de la Arquitectura (IHA), Carpeta 1538/8).

Por ello el uso de la madera en la construcción de viviendas en el país es aún incipiente, representa menos del 0,5 % del total de la construcción residencial (Moya et al, 2017,). Su aplicación en la última década se ha dado preferentemente en los programas de Realojos del Ministerio de Vivienda y Ordenamiento Territorial (MVOT) o de los gobiernos departamentales.

Uruguay se ha propuesto avanzar hacia una Estrategia nacional de desarrollo transformando la matriz productiva del sector forestal, incorporando tecnologías sostenibles e innovadoras en los procesos de industrialización de la madera para la construcción de viviendas. El gobierno actual, declaró de interés general la “promoción del uso de la madera con fines constructivos en vivienda, carpintería de obra y mueblería” (Ley nro. 19889 de Urgente Consideración, 2020).

La promoción de los sistemas constructivos en madera es uno de los objetivos específicos planteados en el Plan Quinquenal de Vivienda 2020-2024 del MVOT, como solución ante la crisis habitacional por el déficit habitacional histórico de 65.000 viviendas y los efectos negativos del cambio climático: “promover el uso de la madera de origen nacional en soluciones constructivas tendientes a aumentar la oferta de vivienda pública, reduciendo los tiempos de ejecución y los costos de obra”. Es así que la madera cobra mayor protagonismo por sus beneficios como material renovable que secuestra carbono, que requiere baja energía incorporada en su producción y tiene un escaso impacto en el ambiente (Ibáñez et al, 2019).

Como antecedentes a esta iniciativa, pueden señalarse los realojos realizados en 2013 en el que se trasladaron a más de 300 familias provenientes del asentamiento irregular Isla de Gaspar en Montevideo. Así como también la construcción de viviendas del Movimiento de Erradicación de la Vivienda Insalubre Rural (MEVIR) en madera en la localidad de Rivera y las relocalizaciones en el departamento de Salto, específicamente en Barrio Nuevo y Barrio Artigas, en el transcurso del período 2019-2022.

Este artículo se presenta como avance de un proyecto conjunto de los equipos de investigación Evaluación de Programas y Tecnologías para la Vivienda de Interés Social y el área Clima y Confort en Arquitectura, financiado por la Comisión Sectorial de Investigación Científica (CSIC), cuyo objetivo principal es evaluar de manera integral los programas del Plan de Vivienda Económica en Madera (PVEM). Entre ellos, las relocalizaciones y las viviendas de madera de MEVIR, de modo de propiciar mejoras en los programas

públicos de vivienda. Como objetivos específicos se plantean comparar aspectos físico-espaciales mediante el estudio de casos específicos ubicados en Montevideo y en Salto, analizar comparativamente las formas de integración y participación de las familias en todo el proceso desde la etapa pre-obra hasta la pre-ocupación y los aspectos económicos que estas soluciones conllevan. Se comparten resultados parciales de la investigación en curso.

2. Metodología

Se utilizará la metodología que el equipo Evaluación de Programas y Tecnologías para la Vivienda Social, integrado además por Álvarez Horacio, Campoleoni Myrna, Martínez Virginia y Roa Fernando, ha desarrollado desde 1992 en la evaluación de programas, proyectos, tecnologías y procesos en la construcción de viviendas de interés social. Es una metodología de evaluación integral y flexible, operativa a nivel de proyecto y de sus realizaciones (Gilboa et al, 1999). La metodología utilizada es cuanti y cualitativa y abarca el estudio de antecedentes y documentación de los programas, entrevistas individuales y colectivas a los diversos actores, relevamientos de las viviendas y encuestas a los usuarios en los casos seleccionados. Se basa en la división del estudio en tres grandes aspectos: físico, económico y social, que se analizan por separado y con diferentes herramientas, pero con una mecánica semejante para llegar, luego de un trabajo de síntesis, a un resultado final que los englobe, permitiendo comparar distintas propuestas en forma integral.

El uso de la madera en la construcción se inscribe en la búsqueda de soluciones edilicias más sustentables que propone “un nuevo equilibrio entre el uso de la Naturaleza y la atención a las necesidades humanas” (Gudynas, 2012, p. 15). Las elaboraciones de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) sobre este concepto, como el Informe Brundtland (1987) o la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible (2015), son las más conocidas debido al alcance y resonancia del organismo. El uso de la madera en la construcción viene ganando espacios no sólo en las iniciativas privadas, sino también en la producción de vivienda social en Uruguay, y a nivel internacional con el objetivo de obtener cero emisiones netas de carbono durante toda la vida útil de un edificio.

Si bien la aplicación de esta tecnología en la construcción de viviendas de interés social viene mostrando resultados alentadores no sólo en términos físicos y económicos, sino también socioambientales, el hecho de que en Uruguay la construcción de viviendas de interés social en madera sea relativamente reciente, implica que las investigaciones dedicadas al tema son incipientes. A su vez, estos estudios abordan parcialmente el fenómeno y ninguno analiza de manera integral, es decir, considerando los aspectos físicos, sociales y económicos. Ello impone la necesidad de una reflexión acerca de las líneas de acción al respecto y de una revisión crítica y una puesta en común de las experiencias desarrolladas en nuestro medio, sus realizaciones y los alcances e impactos producidos por ellas.

La hipótesis de trabajo es que las viviendas construidas con sistemas constructivos en madera presentarían una serie de ventajas con respecto a la construcción tradicional. Un aspecto importante que se destaca es el confort y los beneficios que brinda una vivienda en madera (biofilia), que serían similares o superiores a una vivienda tradicional. Estas premisas deben ser verificadas por lo menos en dos zonas climáticas diferentes de Uruguay, al norte en las ciudades de Rivera y Salto y al sur en Montevideo.

Los análisis previos (cualitativos y cuantitativos) y las conclusiones que se obtengan podrán conducir a responder en lo posible las siguientes inquietudes que hacen a las consecuencias sociales que tienen los programas de vivienda social en madera; el tipo de hábitat, ciudad y sociedad que se produce; la calidad de vida que aportan a sus destinatarios; si satisfacen o no sus necesidades; el costo que tienen para la sociedad y las mejoras que se puedan aportar.

3. Casos en estudio

En el Barrio Artigas, localizado en el departamento de Salto, se construyeron 116 viviendas de madera mediante la modalidad de obra “llave en mano”, empresa privada que es contratada por la Intendencia dentro del Plan Mejoramiento de Barrios (PMB). Las familias relocizadas provienen de asentamientos irregulares y de zonas inundables. Son viviendas individuales de 2,3 y 4 dormitorios construidas con un sistema de entramado ligero de madera de pino o eucalipto (*Pinus taeda*, *elliotti* o *Eucalyptus grandis*) con paneles recubiertos con placas de yeso cartón al interior y placas de fibrocemento tipo *syding* al exterior y una cubierta liviana.

Brazos Unidos es un barrio de Montevideo. En este conjunto se realojaron familias provienen de los asentamientos Isla de Gaspar y la Manchega de zonas inundables y contaminadas. Son 12 viviendas entre medianeras de 1,2 y 3 dormitorios. La obra la realiza una empresa social con fines educativos. La financiación es un convenio entre la Intendencia de Montevideo y el MVOT bajo el Plan Nacional de Relocalizaciones (PNR). En ambos casos la envolvente cuenta con aislantes térmicos, acústicos y barreras de vapor e impermeable.



Conjunto	Cantidad de viviendas	Obra		Tipología	Plan	Actuación en el territorio
		Inicio	Término			
Barrio artigas/ Salto	116	2018	2020	Vivienda exenta	PMB	Relocalización de familias provenientes de asentamientos irregulares y de zonas inundables
Brazos unidos/ Montevideo	12	2020	2022	Vivienda entre medianeras	PNR	

Figura 1. Ubicación de los conjuntos en Salto y Montevideo. 1. Barrio Artigas. 2. Brazos Unidos.

4. Consideraciones finales

El proyecto está aún en etapa de relevamiento y de entrevistas individuales y colectivas. La propuesta se enmarca en el interés del Equipo en ampliar el campo de análisis y dar continuidad a las evaluaciones efectuadas en materia de viviendas de interés social: programas de Núcleos Básicos Evolutivos; cooperativas de vivienda franja 1; cooperativas de ayuda mutua con diferentes reglamentaciones; cooperativas de vivienda de ahorro previo con distintas modalidades de gestión; incorporación o no de tecnologías innovadoras; participación o no de los usuarios en la producción de su hábitat.

La etapa final implicará la discusión de las conclusiones con los actores del proceso para elaborar las conclusiones finales del proyecto, en términos de recomendaciones a incorporar en la componente tecnológica y en manuales de uso y mantenimiento de las viviendas. La difusión de los resultados se realizará en seminarios y cursos.

Esta presentación en CIMAD 24 será la ocasión de poner en discusión los avances del proyecto y poner en diálogo las distintas miradas sobre cada línea de investigación ejecutada. Esperamos dar cuenta de los programas que fueron exitosos en su implementación y los que no, y por qué, teniendo en cuenta factores sociales, físicos y económicos. Será importante identificar cuánto pesa la participación de los sujetos en la obtención de resultados adecuados a las necesidades de las familias beneficiarias, e identificar la durabilidad de las viviendas construidas, y su respuesta a la evolución física en el tiempo. Creemos que los resultados del mismo pueden constituir un aporte importante para el diseño de políticas públicas en materia habitacional para los sectores de bajos ingresos en general, todo lo cual otorga particular pertinencia del aporte académico en este sentido.

1177

BRINGING DECAYED BEAMS BACK TO LIFE: ON-SITE RENOVATION AND REHABILITATION WITH FINE-GRAIN COMPOSITE INLAYS

Tom Bender¹; Max Moritz Keßler¹; Kay-Uwe Schober¹

¹ Mainz University of Applied Sciences, Timber and Plastics Research Group

Palabras clave / Palavras-chave:

Timber floors, Rehabilitation, Strengthening, Composites, Decay

Resumen / Resumo:

The restoration of historic timber floors in cultural heritage buildings is complex, especially when dealing with decayed beam-ends caused by fungal or insect defects. Common interventions, such as leaf joints with a wooden or steel leaf in a force-fit manner often encounter challenges related to quality assurance and limited workspace. Historic wooden constructions, especially at the junctures of roof and ceiling structures in outer wall areas, are susceptible to vulnerabilities over time. Traditional methods for addressing damaged beam-ends encompass a range of approaches. Carpentry methods, such as leaf joints, lap joints, and bracing, involve the skilled use of woodworking techniques. Prefabricated steel components, including the Weimar basket suspension and Zwickau joist hanger, offer solutions tailored to varying pruning lengths. The BETA-system, a widely adopted technique which has been developed originally by Renofors in The Netherlands and extensively used in the United Kingdom and in Germany [1], employs fiberglass rods and synthetic resin grouting to address structural issues. Despite their historical efficacy, all these methods face challenges related to workspace requirements and precision in execution, highlighting the need for innovative solutions. To overcome these limitations, a novel on-site rehabilitation system, further specified with the acronym KoSEV, has been developed by the Timber and Plastics Research Group in Mainz, Germany. It employs epoxy-resin composites to connect existing floor beams and wooden prostheses with minimal intrusion and labor work. An overview, how this system work along with investigations on the joint limits are presented in this paper.

1. Joint preparation and composite action when back in service

To address the drawbacks of traditional methods, the KoSEV on-site rehabilitation system has been developed and investigated under static and short-term loading [2] with focus on usability, simplicity, sustainability, durability and composite action under different climate conditions. This innovative system efficiently tackles challenges in confined workspaces, reducing both time and cost of rehabilitation. During the rehabilitation work, the damaged part of rafters or girders will be removed by cutting off the decayed beam end plus a minimum of 30 cm in grain direction according to normative regulations and the proof of safety, that all decayed parts and the fungi infection are gone [3], [4]. The missing part of the ceiling beams will be restored by a prosthesis, attaching new wooden beam sections to the original cut-back part using fine-grain composites and inlay technique.



Figure 1. KoSEV-system: shoring types in a roof

First, a groove is milled into both wooden parts, and a mineral casting of epoxy resin and fillers is placed into the groove, creating a force-fit connection through adhesive bonding. A steel coupling element absorbs bending tensile stresses, ensuring a complete and shear-resistant adhesive bond. The processing of the connection between the damaged beam and the beam prosthesis is completely independent of the angle of the damaged component, so that, for example, external truss structures can professionally restored as well without any complications (Figure 1).

The KoSEV-system's structural effectiveness stems from its application of a half lap joint model, fundamentally reshaping the rehabilitation of deteriorated timber floors. This approach facilitates the infiltration of epoxy resin into the wood surface, forming a cohesive compound with robust load-bearing capabilities. The interaction between wood and grout in the composite joint follows principles akin to solid construction concepts. As basis of research and development of the KoSEV-system, respective the composite material composition, the investigations on the adhesive bond-line behavior, the material models, the influence of hybrid fiber reinforcement, the composite action and the inlay joint capacity in different service conditions served the extensive work of SCHÖBER and JAHREIS in that specific research areas, [5]-[10].

Rigorous testing and adaptation of the grout's material properties, including the adoption of the average modulus of elasticity of the existing (partly damaged) flooring beams and rafters, ensure a resilient and structurally sound rehabilitation. The functionality of the rehabilitation method as well as the geometric and static application limits were tested and adapted to practical construction requirements. This also included aspects of processing, in that the viscosity and pot life of the plastic mineral casting were adaptively evaluated and adjusted. The force-fit connection achieved through adhesive bonding, involving the milling of grooves and the infusion of epoxy resin and fillers, establishes a durable bond surpassing conventional methods. The coupling element efficiently absorbs (bending) tensile stresses under loading conditions, while the composite material seamlessly transfers compressive stresses. This ensures a comprehensive and shear-resistant adhesive bond.

2. Material and structural limits

The analytical model applied to KoSEV reveals four distinct failure mechanism; all substantiated through empirical test setups. Within the joint section, potential failures include tension-induced steel coupling element failure or compression zone fracture (Figure 2). To mitigate these, a sufficiently wide compression zone and appropriately sized coupling elements are crucial. Another observed failure involves levering the potting compound out of the wood groove, prevalent in short and wide groove geometries, constrained by a minimum design groove length. A similar issue arises with excessively thin flank timbers, leading to buckling at the groove end due to transverse tensile stresses (Figure 3). Failure occurs also at the composite cross-section immediately at the height of the reinforcement. This failure splits the grout and the wooden beam horizontally and is difficult to exclude by design (Figure 4). While challenging to exclude those issues by design, proper prosthesis dimensioning ensures load-bearing capacity surpassing floor beam support requirements.



Figure 2. compression zone



Figure 3. groove end



Figure 4. along the reinforcement

Figure 5 presents results from testing. Depending on the series, the test specimens were made from European softwoods such as European spruce (*Picea abies*) or silver fir (*Abies alba*) and stored at around 60% rH and 20°C environmental temperature until to corresponding equilibrium moisture content was achieved for all samples. The tested samples were made from naturally dried sawn wood and formerly built-in and matured wood, recently removed from a ceiling during reconstruction works. The graphical

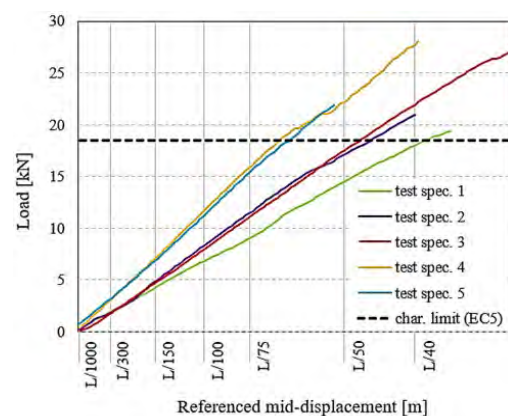


Figure 5. Load-slip-curve, span 4.00 m, series 60-100-300-18

results (Fig. 5) shall not describe nor discuss testing and results in detail, but give the readers of this manuscript an image of the structural response.

The results derived from six-point bending test series on specimen with a cross-section of 160 mm width and 120 mm height. The fine-grain composite inlay section had a width of 60 mm and a height of 100 mm, which seems to be rather narrow on the first sight.

Depending on age, location and neighborhood it is common in some counties and for the lab tests an appropriate dimension due to the specimens' cross-section and aforementioned aspects. The inlay sections have been reinforced for the lab tests by a threaded steel rod S235 M18-10.9. Especially the deflection results, referenced to the 4 m clear span of the test setup indicate, that all ultimate bearing loads of the single beam specimen exceeded the calculated characteristic limit according to Eurocode 5-1-1 [11] with mechanical values of the visual graded wood given in EN 338 [12]. The test results (Fig. 5) show the robustness and the effectiveness of the in-situ rehabilitation system presented under various test conditions. The joint capacity, taken into account the characteristic values of the different material parameters and the recommended deflection limit, looks quite promising. The load-bearing capacity could be restored for all test specimens, nondependent on the specimen's age.

3. Summary and outlook

The KoSEV-system presents a viable solution for on-site rehabilitation of decayed timber floors, addressing the limitations of traditional methods. Its efficient use in confined workspaces, coupled with reduced time and cost, positions it as a promising alternative for historic preservation and restoration. The system's success in load-bearing capacity tests and failure prediction indicate the potential for widespread applications and its structural behavior redefines approaches for timber floor rehabilitation. The capacity and potential to integrate naturally dried sawn wood seamlessly into matured structures reflects an innovative solution that not only addresses immediate rehabilitation needs but also establishes an enduring, robust remedy for decayed timber floors. However, research is going on with focus on long-term performance of the composite inlay compound. If the promising achievements and results continue, the KoSEV-system could revolutionize the way, how in-situ rehabilitation of historic timber floors can be done.

Acknowledgement

The German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy funded parts of the presented topic and studies according to a decision of the German Federal Parliament. The contents are solely the responsibility of the authors and do not necessarily represent the official views of the funding agency. On behalf of all authors, the corresponding author states that there is no conflict of interests.

References

- [1] Waterhouse, M. (1981) The restoration of structural timbers. Annual Convention of British Wood Preserving Association, pp. 26-31.
- [2] Bender, T.; Ihle, R.; Schober, K.-U.; Gruss, C.; Taeuber, A. (2021) Kontaktstoß-Sanierung mit Epoxidharz-Verbundwerkstoffen [Contact joint renovation system with epoxy resin composite materials]. Research report. Hochschule Mainz, Forschungsgruppe Holz und Kunststoffe [Mainz University of Applied Sciences, Timber and Plastics Research Group]. Mainz, Germany, p. 60 (in German).

- [3] Paul, O. (1979) Neue Sanierungsmethode für schadhafte Deckenbalkenköpfe [New renovation method for damaged ceiling beam heads]. *bauen mit holz* 8/79. Bruderverlag, Cologne, pp. 401-403 (in German).
- [4] Matthes, S. (2016) Sanierung von schwammbefallenen und schadstoffbelasteten Holzkonstruktionen am Beispiel der Rosa-Luxemburg-Schule in Chemnitz [Renovation of dry rot infected and contaminated timber constructions shown on the example of the Rosa Luxemburg School in Chemnitz]. Diploma Thesis. University of Cooperative Education, Glauchau, pp. 31-32 (in German).
- [5] Jahreis, M. (2019) Zur Entwicklung von Polymerverguss-Kopplungselementen für den Holzbau [Development of polymer concrete coupling elements in timber constructions]. Dissertation. Bauhaus-University of Weimar, Weimar, Germany (in German).
- [6] Jahreis, M.; Schober, K.U.; Rautenstrauch, K. (2009) The application of low intrusion techniques and smart materials for strengthening of timber structures in reconstruction. 1st International Conference on Protection of Historical Buildings (PROHITECH 09), (Mazzolani, F.M., Ed.), Vol. 1, pp. 319-324. CRC Press-Taylor & Francis Group, Rome, Italy.
- [7] Schober, K.U.; Rautenstrauch, K. (2009) Structural behavior of hybrid timber-composite beams. Composites & Polycon 2009. American Composites Manufacturers Association, Tampa, FL, USA.
- [8] Schober, K.U.; Rautenstrauch, K.; Jahreis, M. (2009) Low Intrusion Techniques for Strengthening of Timber Structures in Reconstruction. Wood Adhesives 2009. South Lake Tahoe, NV, USA.
- [9] Schober, K.U.; Haedicke, W.; Rautenstrauch, K. (2007) In-situ strengthening of timber structures with high-performance polymer concrete. The Third International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation, (Zingoni, Ed.), pp. 639-648. Millpress Science Publishers, Rotterdam, Cape Town, South Africa. ISBN 978 90 5966 054 0.
- [10] Dimmig-Osburg, A.; Rautenstrauch, K.; Schober, K.U. (2005) Upgrading and repair of timber structures with polymer concrete facing and strengthening. Intl. Symposium on Wood Science and Technologies, 50th Anniversary of The Japan Wood Research Society Pacifico. Yokohama, Japan.
- [11] DIN EN 1995-1-1:2010-12. Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings; German version EN 1995-1-1:2004 + AC:2006 + A1:2008. DIN, Berlin, Germany.
- [12] DIN EN 338:2016-07. Structural timber – Strength classes. German Version EN 338:2016. DIN, Berlin, Germany.

ÍNDICE DE AUTORES

- Abel Vega, 437
 Abner Braga, 472
 Ad Leijten, 675
 Adélio M. Mendes, 69
 Adrián Sánchez Sevilla, 250
 Aída Santana Sosa, 236
 Akemi Iino, 64
 Alan Jara Cisterna, 73, 602
 Alastair Ogle, 15
 Alberto Gonzalez, 437
 Alberto Gutierrez, 318
 Alberto Izquierdo Fuente, 163, 433
 Alejandro Bernabeu Larena, 12
 Alejandro Bozo González, 338
 Alejandro Jesús González Cruz, 383
 Alejandro Martínez De Arbulo, 407
 Alexander Opazo Vega, 73, 323, 353, 602
 Alexander Wenzel Schwarzenberg, 18, 28
 Aléxia Ribeiro, 549
 Alfonso Lozano Martínez-Luengas, 114, 119, 506, 637
 Alfredo Anibal Guillaumet, 577
 Alfredo Dias, 357, 549, 462, 670
 Alina Avellaneda, 270
 Aline Schmid, 300
 Almudena Majano Majano, 78, 227, 388
 Álvaro Iglesias Pordomingo, 163, 587
 Álvaro Magdaleno González, 163, 587
 Ana Belén Noriega Bravo, 214
 Ana Carolina Belizario, 496
 Ana Carolina Costa Viana, 520
 Ana Clara Cobas, 592
 Ana Lourenço, 15
 Ana Maria Lacasta, 270
 Ana S. Guimarães, 69
 André Christoforo, 670
 André M. A. Dias, 462
 Andrea Daina Tosco, 577
 Andrés Martín-Pastor, 388
 Andrés Sierra, 260, 651
 Andrew Waugh, 15
 Ángel Fombellida Villafruela, 379
 Ángel María Martín López, 492
 Anna Sandak, 562
 Antolín Lorenzana Iban, 7, 163, 587
 Antolino Gallego Molina, 109, 149, 290, 692
 Antonio Jesús De Los Aires Solís, 246
 Antonio José Lara Bocanegra, 78, 227, 388
 Antonio Roig, 388
 Ánxel Vidal Sánchez, 109, 149
 Araceli Muñoz García, 214
 Artur Feio, 200
 Baptiste Giorgio, 366
 Beatrice Faggiano, 323
 Beatriz Del Río Calleja, 379
 Beatriz González Rodrigo, 23, 33, 304, 348, 428, 452
 Boris Moya-Rojas, 646
 Borja Iñaki Iraola Sáenz, 612
 Bruna Bessa Rocha, 540
 Bruna Muniz, 418
 Camila Opazo-Carlsson, 646
 Carlito Calil Júnior, 59, 83, 218, 328, 487, 544
 Carlito Calil Neto, 219
 Carlos Albino, 660
 Carlos Cruz Rodríguez, 109, 149, 290, 692
 Carlos Galarce, 193, 196, 582
 Carlos Manuel Romero Luna, 94
 Carlos Martínez-Criado, 388
 Carlos Martins, 357
 Carlos Osuna-Sequera, 598
 Carlos R. Marín-Urbe, 193
 Carlos Rubio Bellido, 423
 Carlos Salinas-Lira, 593
 Carlos Vieira, 655
 Carmen Martín Palancar, 183
 Cassiano Barros, 99
 Cindy Torres Quirós, 348, 428
 Cinthya Bertoldo, 89
 Ciprian Palaghianu, 413
 Clara Queiroz, 496
 Claudia Alvarado, 193, 196, 582
 Claudia Marcela Ibañez Ojeda, 94, 665
 Cláudio Ferreira, 357
 Claudio Montero, 193, 582
 Covadonga Prendes, 437
 Cristian Maluk, 362, 530, 535
 Cristiane Inácio De Campos, 94
 Cristina Coelho, 655
 Daniel F. Llana, 38, 197, 510, 525, 621
 Daniel Godoy Machado, 154, 308, 418
 Daniel Luengas-Carreño, 43
 Daniel Ridley-Ellis, 621
 Danilo Soares Galdino, 94
 Dante Marranzini, 323
 David Lorenzo, 506, 637
 David Mañes Navarrete, 250
 David Martinez, 437
 David Sanz Arauz, 379
 David Tadeo Esquer Covarrubias, 689
 Desirée Rodríguez-Robles, 227
 Diego Aranda, 393

- Diego Calvetti, 559
 Diego Passarella, 154
 Diego Valdivieso, 260
 Dulce Henriques, 679
 Eduardo Bordallo, 413
 Eduardo Jodar, 64
 Edwin Ayala, 530, 535
 Elena Mitrenova, 236
 Elton Sousa, 496
 Emilio A. Luengo, 210
 Erica Shiose, 300
 Esther Moreno Fernández, 313
 Eva Hermoso, 210, 598
 Everton Hillig, 515
 Fabiana Lopes De Oliveira, 188
 Fabiana Moritani, 83
 Fabiana Oliveira, 496
 Federico Luis Del Blanco García, 379
 Felipe Álvarez Rabanal, 506
 Felipe Hideyoshi Icimoto, 83, 487
 Felipe Victorero, 265
 Fernando Mascarenha, 679
 Fernando Véliz Sanzana, 168
 Flavia Proverbio, 274
 Francisco Arriaga, 38, 510, 525
 Francisco Cifuentes Utrero, 12
 Francisco González Quintial, 246, 388
 Francisco González Yunta, 313
 Francisco J. Rescalvo, 109, 149, 290, 692
 Francisco Javier Lafuente Bolívar, 692
 Francisco Rodríguez Bejarano, 33
 Francisco Santos, 279
 Francisco Vergara González, 104
 Franco Benedetti Leonelli, 73, 353, 602
 Franka Brüchert, 231
 Gabriel Humberto Virgen-Cobos, 295
 Gabriela Lotufo Oliveira, 188
 Gamaliel López Rodríguez, 197
 Gastón Bruzzzone González, 154, 308, 665
 Gerardo Armanet, 260
 Gerson Rojas Espinoza, 104, 646
 Gloria Llorente Sánchez, 53
 Gonzalo Caballé, 343, 393
 Gonzalo Moltini, 333
 Gonzalo Rodríguez-Grau, 193, 582
 Goran Turk, 621
 Gregorio García López De La Osa, 304
 Guadalupe Olvera-Licon, 295
 Guillermo Fernández Ordóñez, 587
 Guillermo Gonzalez-Beltrán, 33
 Guillermo Íñiguez-González, 197, 333, 366, 510, 525, 621
 Guillermo Riesco Muñoz, 447
 Gustavo Violin, 99
 Hamed Matini Behzad, 515
 Helmer Mauricio Foronda Sepulveda, 255
 Ignacio Bobadilla Maldonado, 38, 515, 525
 Ignacio De Arteaga Jorda, 612
 Ignacio Javier Payá Zaforteza, 250
 Ignacio Lombillo, 119
 Iñaki Del Prim Gracia, 374, 501
 Irene Ferreira, 655
 Irene Mediavilla, 413
 Isabel Sáez, 12
 Israel Macedo Alquicira, 482
 J. Vicente Oliver Villanueva, 210
 Jacinto Ruiz Carmona, 274
 Jaime Augusto Jesus Cunha, 641
 Jaime E. Espinosa, 626
 Jairo Montaña, 159
 Jakub Sandak, 562
 Janet Calixto Roca, 23
 Javier Pinilla Melo, 313, 379
 Javier Ramón Sotomayor Castellanos, 124, 482
 João Dantas, 300
 João M. P. Q. Delgado, 69
 João Negrão, 129, 549
 João Pantoja, 472
 João Vitor Felipe Silva, 59
 Jorge Casaravilla, 154
 Jorge Daniel De Melo Moura, 540
 Jorge M. Branco, 323
 Jorge Manuel Martins, 69, 655
 Jorge Mellado Péndola, 353
 Jorge Santos, 655
 José A. Paz-Pérez, 28
 José Amorim Faria, 457, 559, 632, 641, 689
 José Antonio Balmori, 163, 318
 Jose Antonio Lorenzana Fernández, 109, 149
 José Guadalupe Rutiaga Quiñones, 124
 José Ignacio De Teresa Fernandez Casas, 383
 José L. Louzada, 323
 José Luis Gómez Royuela, 78
 José Luis Villanueva, 343, 393, 572
 Jose Machado, 200
 José Manuel Cabrero Ballarín, 612, 675
 José Manuel Fernández Tejeiro, 506
 Jose Miguel Rico-Martínez, 33
 José Navarrete Araya, 104
 Jose Ramón Aira Zunzunegui, 178, 313, 379, 684
 José Ramón Villar-García, 227
 José Xavier, 78
 Josep Ferrando Bramona, 12
 Josu Benito-Ayúcar, 43, 637

- Juan Acevedo, 651
 Juan Carlos Bamba Vicente, 383
 Juan Carlos Cabrero, 598
 Juan Carlos Santos, 279
 Juan Daniel Gereda Amaya, 255
 Juan David Giraldo Giraldo, 255
 Juan Enrique Martínez Martínez, 114
 Juan Gilberto Bugarin Castillo, 559
 Juan José Del Coz Díaz, 114
 Juan José Fontana, 418
 Juan José Ugarte G., 260, 651
 Juan José Ugarte A., 269
 Juan José Villacorta Calvo, 163, 433, 587
 Juan Manuel Rubiales Jiménez, 379
 Juan Rey Rey, 274
 Julen Perez Santisteban, 15
 Julio Cesar Molina, 59
 Julio Vivas, 7, 279, 587
 Karem Johana Castro Peláez, 255
 Kathleen Overton, 403, 616
 Kay-Uwe Schober, 231, 702
 Laia Haurie Ibarra, 270
 Lara Del Val Puente, 163, 433
 Laura Bozzo Clara, 697
 Laura Gonzalo Calderón, 178
 Laura Moya, 154, 308, 665
 Laura Scrideli, 64
 Leandro Domenech, 418
 Leandro Dussarrat Brito, 487, 544
 Leonardo Maciel Moretti, 144
 Lia Caren Meyer, 577
 Linette Salvo-Sepulveda, 593
 Lisa Muñoz, 193, 582
 Louis Denaud, 290
 Luis Ariel Bobadilla Moreno, 423
 Luis Gallardi Favilla, 418, 467
 Luis Javier Sánchez Aparicio, 379, 684
 Luis Saúl Esteban, 413
 Luisa Hora De Carvalho, 53, 655
 Luis-Alfonso Basterra, 56, 163, 433
 M^a Victoria Sierra Ramos, 304
 Manuel Carpio Martínez, 18, 28
 Manuel Guaita Fernández, 109, 149
 Manuel Moya Ignacio, 227
 Manuel Sánchez-Solís, 48, 224
 Manuel Suazo Uribe, 323
 Manuel Touza, 637
 Mar Alonso Martínez, 114, 506
 Marcela Vidal-Vega, 646
 Marcelo Fs.f. De Moura, 78
 Marcia Braga González, 94
 Marcos Cesar De Moraes Pereira, 328
 María Angeles Benito Pradillo, 183, 398
 María Aurelia Segura Lopez, 38
 María Belén Feijóo Lombao, 109, 149
 María Cecilia Filippetti, 577
 María Del Mar Barbero-Barrera, 452
 Maria Machimbarrena, 318
 María Portela Barral, 109, 149
 María Romero Cuberos, 140
 Marina Arce Blanco, 38
 Mario Azaña Galán, 333, 343, 572
 Mario Núñez-Decap, 104, 646
 Mario Rando, 370
 Mario Suárez, 7
 Mario Ubilla, 265
 Marta Bugés Aragonés, 12
 Marta Herráez, 318
 Marta Salvador Del Pozo, 214
 Martin Aichholzer, 236
 Mathiyas Thatal, 641
 Mauricio Vargas Mosqueda, 205, 241
 Maurizio Piazza, 129
 Max Moritz Keßler, 702
 Maximilian Leonhard Müller, 231
 Md Imtiaz Ahmad, 641
 Melissa Lago De Jesus S. Silva, 219
 Mercedes González Redondo, 379
 Micaela Ruiz, 554
 Miguel C. Cabo Fernández, 282, 567
 Miguel David Rojas López, 255
 Miguel Esteban, 295, 510, 525
 Miguel Redón Santafé, 250
 Miguel Tortoriello, 592
 Milagros Casado Sanz, 197, 318, 433
 Mileny Suellen Garcia De Souza, 59
 Mohammed Hamdallah, 457
 Mônica Ruy, 109
 Montero Claudio, 323
 Natalia Perez-Peña, 593
 Nelson Pereira, 58
 Nicol López, 159, 477
 Nilson Tadeu Mascia, 99, 173, 607
 Nuno Ferreira, 58, 69, 655
 Nuno Vale, 69
 Omar Gómez, 119
 Pablo Augusto Krah, 173
 Pablo González-Serna, 43
 Pablo Guindos Bretones, 18, 159, 168
 Pablo Narváez Cañedo, 214
 Pablo Sanz-Honrado, 684
 Pablo Vidal-López, 227
 Patricia Rocha, 58
 Patricia Valledado Cordobés, 163, 433

- Patricio Arrien, 592
 Patricio Cortés, 193
 Paula Maria Ribeiro Levi, 457
 Paula Villanueva-Llaurado, 684
 Pedro Hurtado-Valdez, 407, 442
 Pedro Nel Benjumea Hernández, 255
 Peter Dechent Anglada, 353
 Pierre Blanchet, 366
 Pilar Giraldo, 270
 Poliana Dias De Moraes, 520
 Rachita Klinmalee, 689
 Rafael Alonso, 393
 Rafael Bravo Pareja, 149, 290, 692
 Rafael Mansini Lorensani, 408
 Ramón Sancibrián, 119
 Ramon Vilela Bergamin, 99, 173
 Raquel Fernandes, 655
 Raquel Gonçalves, 89, 144, 408
 Raquel López Labiano, 214
 Raúl Araya, 159
 Rebeca Sánchez, 119
 Régis Pommier, 193, 582
 Renato Barbosa Sampaio, 520
 René Herrera Diaz, 562
 Rene Navarrete Padilla, 286
 Ricardo Candel Gurrea, 250
 Ricardo Devesa Devesa, 12
 Ricardo M. S. F. Almeida, 69
 Roberto D. Martínez López, 53, 163, 197, 433, 515
 Roberto Daniel Manavella, 577
 Roberto Quinteros Mayne, 612
 Rodrigo Alejandro Espinoza Maldonado, 423
 Rodrigo Souza Nogueira, 83
 Rogério Simões, 670
 Romeu Vicente, 660
 Rose Marie Garay Moena, 338, 554
 Rubén A. Ananias, 593
 Ruben Santamaria-Maestro, 684
 Salvador Gilabert Sanz, 210
 Sandra Monteiro, 357
 Sandro Lopes, 655
 Santiago Matute Díez, 140
 Saúl Gutiérrez, 393, 572
 Sebastián Barrios, 477
 Sebastián Berwart Astudillo, 168, 477
 Sebastián Cárcamo, 260
 Sebastián Guindos, 477
 Sebastián Martorell Mateo, 12
 Sebastián Quagliotti Estradé, 154, 308
 Sergio Adati, 99
 Sergio Campesino, 270
 Silvia Böthig Gargiulo, 308, 665
 Silvia Gómez, 343
 Sofía Carabaña Lozano, 398
 Soledad García Morales, 379
 Soledad Rodríguez, 7, 437
 Sonaila Qazi, 632
 Sonia Correa Jurado, 124, 482
 Sonsoles González Rodrigo, 23, 304
 Steffi Schillem, 413
 Stella Stopa Assis Palma, 408
 Stephanie García Marrero, 697
 Stephany Arrejuría De Giuda, 308
 Susana Torán Reyes, 467, 697
 Susana Velasco Sánchez, 135
 Tamara Coello-García, 413
 Tania Cerrón Oyague, 442
 Teresa Artola-guijarro, 407
 Teresa De Troya, 598
 Thor Winkler, 15
 Tom Bender, 702
 Udo Hans Sauter, 231
 Ulrich Hübner, 675
 Valentina Torres Poblete, 366
 Vanesa Baño, 333, 418
 Victor Ferreira, 660
 Víctor Rosales Garcés, 73, 193, 418, 582, 602
 Víctor Sepulveda-Villarreal, 593
 Vitor Hugo Minari, 328
 Viviana Paniagua Hernández, 348, 428
 Waldo Bustamante, 265
 Walter Lindolfo Weingaertner, 520
 Wendy Esther Romero Cisneros, 689
 Werner Gerwin, 413
 Wesam Al Asali, 492
 Y. Zaarir, 197
 Yaiza Fuentes García, 109, 149, 290, 692
 Yolanda Ambrosio-Torrijos, 452
 Zannat Ara Dilshad Shangi, 457



CIMAD

Madrid, España

10-14 de Junio

III Congreso Ibero-Latinoamericano
de la Madera en la Construcción

24

<https://doi.org/10.20868/UPM.book.83748>