

ANÁLISE DE SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS DE UMA LAJE MISTA MADEIRA-BETÃO

JOÃO CARLOS SANTOS SOUSA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES

Orientador: Professor Doutor Jorge Manuel Fachana Moreira da Costa

JUNHO DE 2024

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2023/2024

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

✉ m.ec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado em Engenharia Civil – 2023/2024 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2024*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

A meus Pais

Learning never exhausts the mind

Leonardo da Vinci

AGRADECIMENTOS

Este espaço é dedicado a todos que contribuíram para que fosse possível realizar este trabalho e assim encerrar este ciclo tão importante na minha vida.

À minha família, em especial aos meus pais, por todo o esforço que fazem para que consiga atingir os meus objetivos na minha vida académica e pelo seu apoio incondicional.

Ao meu orientador, Professor Jorge Costa, a quem agradeço toda a sua ajuda e transmissão de informação, e também a confiança que depositou em mim todos estes meses, algo que foi essencial para que pudesse concluir esta etapa.

Aos meus amigos e colegas de faculdade por me terem acompanhado ao longo destes anos. Em especial ao Paulo Moreira, Marcelo Coelho, Eduardo Gomes e Ricardo Coelho por estarem sempre disponíveis para me ajudar quando preciso e por todos os momentos que me proporcionam.

RESUMO

A sustentabilidade na construção civil tem se tornado um tema de grande importância devido à necessidade de reduzir o impacto ambiental da indústria. A utilização de sistemas construtivos que utilizam materiais renováveis é uma abordagem promissora para alcançar esse objetivo.

Este trabalho investiga a utilização de lajes mistas de madeira-betão, combinando os benefícios de ambos os materiais para criar estruturas resistentes e sustentáveis. O trabalho não pretende apresentar uma análise exaustiva sobre o comportamento estrutural deste tipo de lajes mas, essencialmente, expor as suas principais características e aspetos construtivos mais relevantes e fornecer uma ferramenta que permita a um projetista – ao nível de estudo prévio – aferir da viabilidade e limitações das soluções existentes, a serem analisadas e dimensionadas de forma detalhada num segundo momento.

Entre os aspetos identificados como relevantes para o funcionamento deste sistema, a aplicação de uma camada de betão sobre vigas ou painéis de madeira, permite obter pavimentos que apresentam elevadas capacidades de carga e bom comportamento face ao fogo. Por outro lado, o sistema de ligação neste tipo de estruturas é fundamental para impedir que ocorram deslizamentos entre a madeira e o betão, bem como transmitir esforços entre os dois materiais.

Nesta dissertação é feita uma revisão bibliográfica que permite entender o funcionamento dos elementos constituintes deste tipo de soluções e explicado como é feito o dimensionamento de lajes mistas madeira-betão segundo o método- γ , presente no Eurocódigo 5.

De forma a avaliar soluções, foi elaborada uma folha de cálculo automática que permite ao utilizador fazer uma verificação instantânea da segurança da laje que pretende dimensionar. Apenas sendo necessário introduzir alguns parâmetros do seu projeto.

O sistema mais comum de lajes mistas madeira-betão consiste na aplicação de uma camada de betão sobre vigas de madeira, porém esta solução apresenta alguns constrangimentos arquitetónicos devido a presença de elementos salientes no teto de um piso.

Desta forma, nesta dissertação é estudada uma variante *flat slab* que apresenta vantagens em relação ao modelo comum. Esta solução consiste na aplicação de uma camada de betão sob painéis contínuos de madeira, que permitem evitar os problemas arquitetónicos e reduzir a espessura total de laje necessária para se alcançar um vão desejado.

O modelo *flat slab* foi alvo de estudo para construção de edifícios seguindo o sistema LCT, desenvolvido pela empresa CREE. Este tipo de sistema é indicado para edifícios de dimensões consideráveis e apresenta-se como uma solução que combina técnicas de construção modular com pré-fabricação.

Esta variante, apesar de ter custos mais elevados, pode ser vantajosa na projeção de edifícios de habitação visto ser uma solução esteticamente mais interessante.

PALAVRAS-CHAVE: madeira-betão, lajes, método- γ , *flat slab*, sistema LCT.

ABSTRACT

Sustainability in construction has become a topic of great importance due to the need to reduce the industry's environmental impact. The use of building systems that utilise renewable materials is a promising approach to achieving this goal.

This work investigates the use of mixed wood-concrete slabs, combining the benefits of both materials to create resistant and sustainable structures. The work does not intend to present an exhaustive analysis of the structural behavior of this type of slabs but, essentially, to expose its main characteristics and most relevant constructive aspects and to provide a tool that allows a designer – at the level of base design – to assess the feasibility and limitations of the existing solutions, to be analyzed and designed in detail in a second stage.

Among the aspects that were identified as relevant for this type of solution, applying a layer of concrete over wooden beams or panels makes it possible to obtain floors that have high load-bearing capacities and good fire behaviour. Also, the connection system in this type of structure is essential to prevent slippage between the wood and the concrete, as well as to transmit forces between the two materials.

This dissertation reviews the literature in order to understand the functioning of the constituent elements of this type of solution and explains how to design wood-concrete composite slabs according to the γ -method present in Eurocode 5.

In order to evaluate solutions, an automatic spreadsheet was created that allows the user to instantly check the safety of the slab they want to design. The user only needs to enter a few parameters from his project.

The most common system of mixed wood-concrete slabs consists of applying a layer of concrete over wooden beams, but this solution presents some architectural constraints due to the presence of protruding elements in the ceiling of a floor.

Therefore, this dissertation studies a flat slab variant that has advantages over the common model. This solution consists of applying a layer of concrete over continuous wooden panels, which avoids architectural problems and reduces the total slab thickness required to achieve a desired span.

The flat slab model was studied for the construction of buildings using the LCT system, developed by the company CREE. This type of system is suitable for buildings of considerable size and is presented as a solution that combines modular construction techniques with prefabrication.

This variant, despite its higher costs, can be advantageous when designing residential buildings as it is a more aesthetically pleasing solution.

KEYWORDS: wood-concrete, slabs, γ -method, flat slab, LCT system.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE GERAL	VII

1. INTRODUÇÃO 1

1.1. ENQUADRAMENTO	1
1.2. OBJETIVOS DO TRABALHO	2
1.3. ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURA	2

2. ESTRUTURAS MISTAS MADEIRA-BETÃO 3

2.1. INTRODUÇÃO	3
2.2. PROPRIEDADES DOS MATERIAIS	4
2.2.1. MADEIRA – ASPETOS GERAIS	5
2.2.1.1 MADEIRA MACIÇA	6
2.2.1.2 MADEIRA LAMELADA COLADA (GLULAM)	9
2.2.1.3 MADEIRA LAMELADA CRUZADA (CLT)	10
2.2.2. BETÃO	12
2.3. SISTEMAS DE LIGAÇÃO DE ESTRUTURAS MISTAS MADEIRA-BETÃO	13
2.3.1. SISTEMA DE LIGAÇÃO TRADICIONAIS	14
2.3.2. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE SISTEMAS DE LIGAÇÃO	17
2.3.3. DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UM SISTEMA DE LIGAÇÃO	19
2.3.4. MÓDULOS DE DESLIZAMENTO SEGUNDO EUROCÓDIGO 5 E CEN/TS 19103	22
2.4. CAMADA INTERMÉDIA	23
2.5. SISTEMA LCT	24
2.5.1. CONFIGURAÇÃO DO MODELO	24
2.5.2. VANTAGENS DO SISTEMA LCT	28
2.5.3. SISTEMA DE PLANEAMENTO	30
2.6. NOTAS FINAIS	31

3. DIMENSIONAMENTO DE LAJES MADEIRA-BETÃO 33

3.1. INTRODUÇÃO	33
3.2. PRINCÍPIOS GERAIS DE DIMENSIONAMENTO	33
3.2.1. COMBINAÇÕES DE AÇÕES	34
3.2.2. SOBRECARGA	36

3.2.3. INFLUÊNCIA DA DURAÇÃO DAS AÇÕES E DO TEOR EM ÁGUA NA DEFORMAÇÃO	36
3.2.4. INFLUÊNCIA DA DURAÇÃO DAS AÇÕES E DO TEOR EM ÁGUA NA CAPACIDADE RESISTENTE	37
3.2.5. FISSURAÇÃO DO BETÃO	39
3.3. MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO (EUROCÓDIGO 5).....	40
3.3.1. RIGIDEZ EFETIVA À FLEXÃO	41
3.3.2. ESTADOS LIMITE ÚLTIMOS	43
3.3.2.1. TENSÕES NORMAIS	44
3.3.2.2. RESISTÊNCIA AO CORTE	44
3.3.2.3. FORÇA ATUANTE NO LIGADOR	45
3.3.3. ESTADOS LIMITE DE UTILIZAÇÃO	45
3.3.4. VERIFICAÇÕES A CURTO E LONGO PRAZO	46
3.4. LIGAÇÕES COM ENTALHE	49
 4. FOLHA DE CÁLCULO DE APOIO AO DIMENSIONAMENTO	 55
4.1. INTRODUÇÃO	55
4.2. SUBMISSÃO DE DADOS.....	56
4.2.1. GEOMETRIA DA LAJE.....	56
4.2.2. CARGAS APLICADAS	57
4.2.3. PROPRIEDADES DO BETÃO.....	59
4.2.4. PROPRIEDADES DA MADEIRA.....	60
4.2.5. PROPRIEDADES DA LIGAÇÃO	60
4.3. VERIFICAÇÃO DE SEGURANÇA	62
 5. COMPARAÇÃO DE SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS	 65
5.1. INTRODUÇÃO	65
5.2. PRINCÍPIOS DE ANÁLISE	66
5.3. CASO DE ESTUDO – MODELO FLAT SLAB.....	67
5.3.1. GEOMETRIA	67
5.3.2. CARGAS APLICADAS	68
5.3.3. MATERIAIS E SISTEMA DE LIGAÇÃO.....	69
5.3.4. RESULTADOS OBTIDOS	71
5.3.5. INFLUÊNCIA DA ALTERAÇÃO DE PARÂMETROS DE DIMENSIONAMENTO	75
5.3.5.1. Classe de resistência da madeira	76
5.3.5.2. Classe de resistência do betão.....	76
5.3.5.3. Largura do entalhe.....	76
5.4. COMPARAÇÃO COM MODELO STANDARD	77
5.4.1. ANÁLISE ESTRUTURAL	77

5.4.1.1. Resultados obtidos – Modelo Standard	77
5.4.1.2. Influência da alteração de parâmetros de dimensionamento – Modelo Standard.....	80
5.4.2. ANÁLISE ECONÓMICA	81
6. CONCLUSÃO	83
6.1. CONCLUSÕES.....	83
6.2. TRABALHOS FUTUROS	84
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Emissões de dióxido de carbono globais de betão, em comparação com a magnitude das emissões globais de países e outras indústrias [4]	3
Figura 2 – Solução construtiva comum de uma laje mista madeira-betão. Adaptado de [5]	4
Figura 3 - Emissões de gases de efeito de estufa associadas ao uso de madeira em comparação com o betão. Adaptado de [9]	6
Figura 4 – Vigas de madeira maciça.	9
Figura 5 - Configuração do <i>Glulam</i> [16]	9
Figura 6 - Configuração típica do CLT [17, 18]	11
Figura 7 – Deformação e distribuição de tensões de um sistema sem ação composta (1) e de um sistema com ação composta total (2). Adaptado de [26]	13
Figura 8 - Ligação colada com perfil de aço [26]	15
Figura 9 - Ligação entalhada em combinação com ligadores metálicos [26]	15
Figura 10 - Sistemas de ligação por contacto direto. (1) Blocos de madeira; (2) Entalhes horizontais e verticais [26]	16
Figura 11 - Sistema de ligação com ligadores metálicos. (1) Pontual; (2) Contínua [26]	16
Figura 12 - Ligadores metálicos dispostos com inclinação [27]	17
Figura 13 - Sistemas de ligação comuns em estruturas mistas madeira-betão [27]. Legenda: (A1). Pregos; (A2). Barras de aço coladas; (A3/4). Parafusos; (B1/2). Anéis e placas dentadas; (B3). Tubo de aço; (B4). Placas de metal perfuradas; (C1). Entalhes redondos na madeira com ligadores; (C2). Entalhes quadrados com ligadores; (C3). Entalhes com ligadores de aço pré-esforçados; (C4). Tabuas de madeira pregadas e placas de aço; (D1). Treliza de aço colada na madeira; (D2). Placa de aço colada na madeira	17
Figura 14 - Variação da rigidez da estrutura compósita em função do modulo de deslizamento do sistema de ligação. Adaptado de [28]	18
Figura 15 - Exemplo de diagrama força-deslizamento de um sistema de ligação. Adaptado de [6]. ...	18
Figura 16 – Curvas força-deslizamento típicas de diferentes sistemas de ligação. Adaptado de [26].	19
Figura 17 – Configuração do provete para ensaio de determinação das propriedades mecânicas de um sistema de ligação [29]. Legenda: 1. Betão; 2. Madeira; 3. Placa de aço; 4. Ligador metálico; 5. Contenções laterais; 6. Medidores de deslocamento	20
Figura 18 – Carregamento em função do tempo de acordo com o ensaio definido na norma EN 26891. Adaptado de [26]	20
Figura 19 - Rigidez de um sistema de ligação metálico usando vários valores de F_{est} e com o módulo de deslizamento calculado como indicado no Eurocódigo 5 [26]	21
Figura 20 - Vista lateral de um pavimento misto madeira-betão com presença de camada intermédia. Adaptado de [27]	23
Figura 21 - Comparação da pegada de carbono da solução CREE com a convencional em betão armado [4]	24

Figura 22 - Sistema de construção LCT [31]. Legenda: 1. Laje de fundação; 2. Núcleo vertical; 3. Painéis de laje híbrida madeira-betão; 4. Pilares de madeira lamelada colada; 5. Viga central de aço/betão; 6. Pilares de betão armado	25
Figura 23 - Entalhes nas vigas de madeira.....	25
Figura 24 - Estrutura de um piso segundo o sistema CREE [4]	26
Figura 25 - Diferentes disposições de janelas admitidas num sistema LCT [31]	26
Figura 26 - Paredes exteriores de um edifício LCT [31].	27
Figura 27 – Montagem dos painéis de fachada [31]	27
Figura 28 - Exemplos de disposições de espaço de um sistema LCT [31]	28
Figura 29 - Comparação laje mista LCT com solução em betão [31]. Legenda: 1. Parede de fachada; 2. Pilar em madeira lamelada colada (solução mista). Pilar em betão (solução em betão); 3. Laje LCT (solução mista). Laje de betão armado (solução em betão); 4.1. Serviços primários do edifício; 4.2. Serviços secundários do edifício; 5. Sistema de pavimento	29
Figura 30 - Processo integrado CREE [4]	30
Figura 31 - B&B HOTEL em Guimarães. Construído pela empresa Grupo Casais	31
Figura 32 - Armaduras transversais e longitudinais instaladas na camada de betão. Adaptado de [29]. Legenda: 1. Betão; 2. Madeira; 3. Ligador metálico; 4. Armadura transversal; 5. Armadura longitudinal	39
Figura 33 – Diagrama de tensões de uma estrutura mista com ligação rígida. Adaptado de [6]	40
Figura 34 - Diagrama de tensões de uma estrutura mista com ligação deformável. Adaptado de [6] .	41
Figura 35 - Distribuição de tensões em sistemas de ligação com diferentes níveis de rigidez. Adaptado de [28] 1. Sistema rígido; 2. Sistema deformável; 3. Ausência de sistema de ligação.	42
Figura 36 - Parâmetros da secção transversal do sistema compósito madeira-betão. Adaptado de [26]	43
Figura 37 - Secção transversal e distribuição das tensões de flexão de um compósito madeira-betão [19].....	45
Figura 38 - Componentes da flecha [19]	46
Figura 39 - Dimensionamento de lajes mistas madeira-betão.....	49
Figura 40 – Sistema de ligação com recurso a entalhes e ligador metálico para prevenir o arrancamento [36].....	50
Figura 41 – Diferentes técnicas de reforço de entalhes [8]	50
Figura 42 – Dimensões de um sistema de ligação entalhado [29]. Legenda: 1. Betão; 2. Madeira; 3. Ligador metálico; 4. Entalhe	51
Figura 43 - Modos de rotura de uma estrutura mista madeira-betão com entalhe. Adaptado de [35] .	53
Figura 44 – Secção “Geometria da laje” da folha de cálculo	56
Figura 45 – Secção transversal da laje com os dados inseridos no exemplo da Figura 44	57
Figura 46 - Secção “Cargas aplicadas” da folha de cálculo	58

Figura 47 - Lista disponível para a classe de duração das ações.	59
Figura 48 - Secção “Propriedades - Betão” do programa de cálculo	59
Figura 49 - Secção “Propriedades - Madeira” do programa de cálculo	60
Figura 50 - Secção “Propriedades - Ligação” do programa de cálculo.....	61
Figura 51 - Modos de rotura e limite de deformação da laje entalhada.....	61
Figura 52 - Secção “Verificação a curto prazo” do programa de cálculo	62
Figura 53 - Exemplo de condições de segurança não cumpridas	63
Figura 54 - Diagrama de momentos fletores e esforços transversos	66
Figura 55 – Exemplo de secção transversal de um modelo <i>flat slab</i>	67
Figura 56 - Parâmetros da geometria da laje (valores variáveis a amarelo)	68
Figura 57 - Parâmetros das cargas aplicadas (valores variáveis a amarelo)	69
Figura 58 – Exemplo de secção longitudinal de um modelo <i>flat slab</i>	70
Figura 59 - Parâmetros do sistema de ligação (valores variáveis a amarelo)	70
Figura 60 – Exemplo de secção transversal a meio vão de um modelo <i>flat slab</i>	71
Figura 61 - Vão em função da carga aplicada numa laje <i>flat slab</i> de espessura total 220 milímetros. 71	
Figura 62 - Vão em função da carga aplicada numa laje <i>flat slab</i> de espessura total 240 milímetros. 73	
Figura 63 - Vão em função da carga aplicada numa laje <i>flat slab</i> de espessura total 260 milímetros. 74	
Figura 64 - Vão máximo em função da espessura total de uma laje mista madeira-betão	75
Figura 65 - Exemplo de secção transversal de um modelo composto por vigas.....	78
Figura 66 - Vão em função da carga aplicada numa laje típica madeira-betão de espessura total 260 milímetros	78
Figura 67 - Vão máximo em função da espessura total de uma laje standard madeira-betão.....	80
Figura 68 - Solução 2,7x8,1m do modelo <i>flat slab</i>	82
Figura 69 - Solução 2,7x8,1m do modelo composto por vigas	82

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Classes de resistências de madeiras resinosas. Adaptado de [13]	7
Tabela 2 - Classes de resistências de madeiras folhosas. Adaptado de [13]	8
Tabela 3 - Classes de resistência de madeiras lameladas coladas. Adaptado de [15].....	10
Tabela 4 - Classes de resistência do betão. Adaptado de [25]	13
Tabela 5 - Módulos de deslizamento obtidos nos ensaios para os diferentes valores de Fest [26]	21
Tabela 6 - Valores do módulo de deslizamento k_{ser} de sistemas de ligação madeira-betão. Adaptado de [19, 29].....	22
Tabela 7 - Influência da presença de uma camada intermédia na capacidade de carga e rigidez de um sistema de ligação. Adaptado de [28]	23
Tabela 8 - Comparação sistema LCT com solução convencional em betão [31].....	30
Tabela 9 - Classificação da duração das ações. Adaptado de [19]	34
Tabela 10 - Fatores de segurança parciais recomendados segundo Eurocódigo 0 [32]	35
Tabela 11 - Valores dos coeficientes de combinação para ações em edifícios. Adaptado de [32].....	35
Tabela 12 - Valores de sobrecarga recomendados em edifícios. Adaptado de [34]	36
Tabela 13 - Valores do coeficiente k_{def} . Adaptado de [19]	36
Tabela 14 - Valores do coeficiente k_{mod} . Adaptado de [19]	37
Tabela 15 - Coeficiente que têm em conta os efeitos de longo prazo na resistência à compressão e tração do betão [25]	38
Tabela 16 - Fatores parciais recomendados para as propriedades e resistências dos materiais. Adaptado de [19, 25, 29]	39
Tabela 17 - Armadura mínima em cada direção (cm^2/m) para controlar a fissuração do betão sem ser necessário calcular a largura das fissuras [29]	40
Tabela 18 - Exemplos de valores limite para as deflexões de vigas [19]	46
Tabela 19 - Fatores de avaliação do coeficiente de fluência efetivo [35]	48
Tabela 20 - Peso volúmico dos materiais segundo Eurocódigo 1.	58
Tabela 21 - Vão em função da carga aplicada numa laje <i>flat slab</i> de espessura total 220 milímetros	72
Tabela 22 - Vão em função da carga aplicada numa laje <i>flat slab</i> de espessura total 240 milímetros	73
Tabela 23 - Vão em função da carga aplicada numa laje <i>flat slab</i> de espessura total 260 milímetros	74
Tabela 24 - Variação do vão máximo em função da classe de madeira utilizada.....	76
Tabela 25 - Variação do vão máximo em função da classe de betão utilizada.....	76
Tabela 26 - Variação do vão máximo em função da largura do entalhe	77
Tabela 27 - Vão em função da carga aplicada numa laje standard madeira-betão de espessura total 260 milímetros	79
Tabela 28 - Variação do vão máximo em função da classe de madeira utilizada.....	80

Tabela 29 - Variação do vão máximo em função da classe de betão utilizada	81
Tabela 30 - Variação do vão máximo em função da largura do entalhe.....	81
Tabela 31 - Custo dos materiais de uma solução <i>flat slab</i> e de uma solução típica	82

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

E_d - Valor de cálculo do efeito das ações;

E - Efeito de uma ação;

$\gamma_{G,j}$ - Coeficiente parcial de segurança relativo à ação permanente j ;

$\gamma_{Q,i}$ - Coeficiente parcial de segurança relativo à ação variável i ;

$G_{k,j}$ - Valor característico da ação permanente j ;

$Q_{k,i}$ - Valor característico da ação variável i ;

$\psi_{0,i}$ - Coeficiente para a determinação do valor de combinação de uma ação variável i ;

$\psi_{2,i}$ - Coeficiente para a determinação do valor quase-permanente de uma ação variável j ;

X_k - Valor característico de uma propriedade resistente;

γ_M - Coeficiente parcial de segurança da madeira;

k_{mod} - Fator de modificação relativo à duração das ações e o teor em água;

k_{def} - Fator de deformação;

F_{max} - Capacidade de carga característica determinada de acordo com a norma EN 26891;

F_{est} - Capacidade de carga estimada, definida de acordo com a norma EN 26891 e utilizada na determinação do módulo de deslizamento médio para os estados limites últimos;

f_{ck} - Valor de cálculo de uma propriedade resistente;

$f_{ctk,0,05}$ - Valor característico de uma propriedade resistente;

γ_c - Coeficiente parcial de segurança relativo ao betão;

a_{cc} - Coeficiente que tem em conta os efeitos de longo prazo na resistência à compressão do betão e os efeitos desfavoráveis resultantes do modo como a carga é aplicada.

a_{ct} - Coeficiente que tem em conta os efeitos de longo prazo na resistência à tração do betão e os efeitos desfavoráveis resultantes do modo como a carga é aplicada.

$F_{v,Rk}$ - Valor característico de uma propriedade resistente;

γ_v - Coeficiente parcial de segurança da resistência ao corte da ligação;

k_{mod}' - Fator de modificação da capacidade resistente da ligação relativo à duração das ações e o teor em água.

$(EI)_{eff}$ - Rigidez efetiva à flexão;

E_1 - Módulo de elasticidade do betão;

E_2 - Módulo de elasticidade da madeira;

I_1 - Momento de inércia da secção transversal de betão;

I_2 - Momento de inércia da secção transversal de madeira;

A_1 - Área da secção transversal de betão;

A_2 - Área da secção transversal de madeira;

a_1 - Distância entre o centroide da secção transversal de betão e o centroide da secção compósita;

a_2 – Distância entre o centroide da secção transversal de madeira e o centroide da secção compósita;
 γ_1 – Fator compósito da secção transversal de betão;
 b_i – Base da secção transversal do material i ;
 h_i – Altura da secção transversal do material i .
 s - Espaçamento entre ligadores;
 L - Vão da viga;
 k - Módulo de deslizamento do ligador;
 σ_i - Componente da tensão normal devido ao esforço axial;
 $\sigma_{m,i}$ - Componente da tensão normal devido à flexão;
 f_{cd} - Valor de cálculo da resistência à compressão do betão;
 f_{ctd} - Valor de cálculo da resistência à tração do betão;
 $f_{t,0,d}$ - Valor de cálculo da resistência à tração na direção paralela às fibras da madeira;
 $f_{m,d}$ - Valor de cálculo da resistência à flexão da madeira;
 $f_{v,d}$ - Valor de cálculo da resistência de corte da madeira;
 $F_{v,Ed}$ – Valor de cálculo da força aplicada no ligador;
 $F_{t,Ed}$ – Valor de cálculo da força de tração entre a madeira e a secção transversal de betão;
 $F_{v,Rd}$ - Valor de cálculo da capacidade resistente da ligação;
 w_{inst} – Flecha instantânea;
 $w_{net,fin}$ – Flecha final efetiva;
 w_{fin} – Flecha final;
 w_c – Contraflecha;
 w_{creep} – Flecha devido ao efeito da fluência;
 k_{cr} - Fator de fendilhação definido pelo Eurocódigo 5;
 b_n - Largura do entalhe;
 l_n - Comprimento do entalhe;
 l_{min} - Comprimento mínimo de corte;
 $f_{c,d}$ - Valor de cálculo da resistência à compressão do betão;
 $f_{c,0,d}$ - Valor de cálculo da resistência à compressão da madeira na direção paralela às fibras;
 h_n - Profundidade do entalhe;
 $f_{v,d}$ - Valor de cálculo da resistência ao corte da madeira;
 l_v - Comprimento da madeira localizada em frente ao entalhe;
 l_s - Comprimento da madeira entre entalhes;
 θ - Inclinação da escora de compressão

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

A indústria da construção desempenha um papel crucial no desenvolvimento da sociedade e da economia, especialmente nos países mais desenvolvidos; é um setor que consome um número de recursos elevado que, no total, representa 7,5% do emprego em toda a economia europeia [1]. Contudo, é uma atividade com impactos ambientais negativos, nomeadamente em relação ao elevado número de emissões de dióxido de carbono que apresenta. Segundo um estudo realizado sobre as emissões de CO₂ em 2009, o setor da construção foi responsável por cerca de 23% das emissões de CO₂ emitidas por todas as atividades económicas globais [2].

A utilização da madeira na construção, combina o seu potencial de pré-fabricação e construção mais rápida, com uma energia incorporada mais baixa e o seu potencial de retardar as emissões de carbono durante a vida útil de um edifício. Sendo um material cuja disponibilidade local é muito variável, é possível considerar uma estratégia de utilização em conjunto com outros materiais, tirando proveito dos atributos de cada um e, no seu conjunto, mitigar os impactos ambientais negativos que alguns possuem, nomeadamente o betão.

Neste sentido, a evolução das técnicas de construção civil e o crescente foco na sustentabilidade têm impulsionado o desenvolvimento de soluções inovadoras que combinam diferentes materiais, aproveitando suas propriedades complementares. Nesse contexto, as estruturas de lajes mistas madeira-betão emergem como uma alternativa promissora, integrando os benefícios mecânicos e ambientais de ambos os materiais.

As estruturas mistas de madeira e betão combinam os dois materiais para maximizar as suas propriedades individuais. Dado que o betão possui baixa resistência à tração, esta abordagem construtiva utiliza uma camada de betão na região de compressão e reserva a madeira para suportar as forças de tração. A eficácia desta combinação depende de um sistema de ligação eficiente, que assegura a transferência de esforços entre os dois materiais.

O sistema LifeCycle Tower (LCT), desenvolvido pela empresa austríaca CREE GmbH apresenta-se como um sistema inovador na construção de edifícios mistos madeira-betão. Este sistema não só promove o uso de materiais renováveis, como a madeira, mas também apresenta várias vantagens graças às técnicas de construção modular e pré-fabricação industrial.

A presente dissertação surge com o interesse de continuar a inovar a prática de construção de estruturas mistas madeira-betão.

1.2. OBJETIVOS DO TRABALHO

A presente dissertação tem como objetivo principal a exploração de uma variante da solução utilizada no sistema LCT da CREE. A laje de um sistema LCT é composta por vigas de madeira sob uma camada de betão, o que causa constrangimentos arquitetónicos devido à presença de vigas salientes de dimensão considerável.

A variante em questão consiste num modelo *flat slab* em que a secção de madeira tem a mesma largura que a camada de betão. Este modelo, além de evitar o problema arquitetónico referido, permite reduzir a altura total de laje necessária para alcançar um certo comprimento de vão.

Os objetivos da presente dissertação de forma a concluir o desenvolvimento do modelo alternativo são os seguintes:

- Caracterizar os elementos constituintes de um pavimento misto madeira-betão de forma a dar a compreender a sua funcionalidade;
- Analisar o comportamento estrutural de lajes mistas madeira-betão utilizando o modelo de cálculo do Eurocódigo 5;
- Elaboração de uma folha de cálculo que permita automatizar o dimensionamento de lajes mistas madeira-betão e comparar diversas soluções;
- Determinar as combinações de alturas de madeira e betão que permitem os maiores vãos admissíveis;
- Comparar as soluções da variante com o modelo utilizado pelo sistema LCT em termos estruturais e económicos.

1.3. ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURA

A dissertação é constituída por um total de 6 capítulos que abordam o seguinte:

- O primeiro capítulo apresenta uma breve introdução onde é dado um enquadramento do tema e mencionados quais são os objetivos da dissertação, bem como a metodologia adotada.
- O segundo capítulo introduz os elementos constituintes de uma laje mista madeira-betão. São caracterizados os diferentes tipos de materiais e a suas classes de resistência, bem os diferentes tipos de sistemas de ligação normalmente utilizados neste tipo de estrutura. São também abordadas as técnicas construtivas e um sistema LCT e mencionadas as vantagens que este tipo de sistema oferece;
- No terceiro capítulo é explicado como é feito o dimensionamento de uma laje mista madeira-betão segundo as normas e recorrendo ao método de cálculo do anexo B do Eurocódigo 5. Apresenta um enfoque nos sistemas de ligação com recurso a entalhes dado ser o normalmente utilizado no sistema LCT;
- O quarto capítulo apresenta uma folha de cálculo de apoio ao dimensionamento de lajes mistas madeira-betão elaborada com recurso ao programa *EXCEL*, segundo os princípios de dimensionamento mencionados no capítulo anterior. É feita uma explicação detalhada secção presente na folha de cálculo;
- No quinto capítulo é feito o desenvolvimento da variante *flat slab* com recurso a folha de cálculo automática explicada no capítulo anterior. São apresentados os princípios de análise utilizados e determinadas as combinações de alturas que permitem maior eficiente da estrutura compósita. É analisada a influencia de alguns parâmetros na capacidade resistente da laje e posteriormente feita uma comparação com o modelo base da CREE;
- No sexto e último capítulo, é feita a conclusão da presente dissertação onde é feita uma reflexão dos resultados obtidos no capítulo anterior e uma proposta de trabalhos a desenvolver no futuro.

2

ESTRUTURAS MISTAS MADEIRA-BETÃO

2.1. INTRODUÇÃO

O setor da construção tem um impacto ambiental bastante negativo sendo responsável por uma grande parte das emissões de dióxido de carbono; naturalmente, se não forem adotadas novas práticas de construção, estes problemas tendem a aumentar de expressão.

A escolha dos materiais tem influência na pegada ecológica dos edifícios. O betão e o aço são os dois materiais mais usados na indústria da construção, nomeadamente na construção de edifícios em altura, devido as suas capacidades estruturais, durabilidade, resistência ao fogo, flexibilidade de utilização em diferentes enquadramentos espaciais, e ainda o seu custo. No entanto, os processos de produção destes dois materiais são processos que, além de requererem recursos apreciáveis, nomeadamente energia, libertam grandes quantidades de dióxido de carbono para o planeta. Estima-se que a produção de cimento seja responsável por cerca de 8% das emissões totais de dióxido de carbono e a indústria do aço entre 7% a 9% [3].

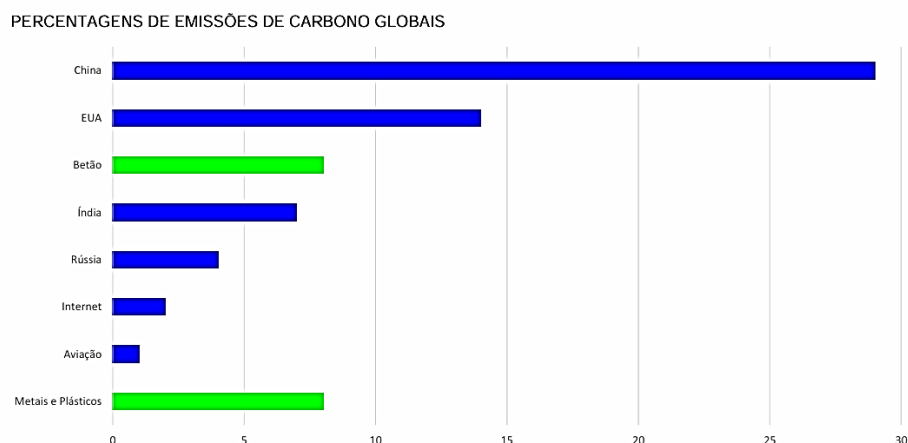


Figura 1 – Emissões de dióxido de carbono globais de betão, em comparação com a magnitude das emissões globais de países e outras indústrias [4]

Uma estratégia sustentável para combater este problema pode passar pelo aumento da utilização de madeira como material de construção dado que, este material tem a capacidade de criar emissões de dióxido de carbono negativas através dum processo de sequestro. Naturalmente, as árvores absorvem

dióxido de carbono da atmosfera durante o crescimento através do processo da fotossíntese, e quando a madeira é utilizada como material de construção, o carbono que foi sequestrado durante o crescimento da árvore permanece armazenado na madeira. Isto significa que o dióxido de carbono não é libertado de volta para a atmosfera durante a vida útil da estrutura. Caso a quantidade de dióxido de carbono sequestrado, seja superior a quantidade de dióxido de carbono libertado para a atmosfera pelo processo de transformação da madeira, considera-se que as emissões são negativas.

2.2. PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

As lajes mistas de madeira-betão representam uma inovação significativa no campo da construção sustentável, combinando as vantagens dos dois materiais para criar estruturas eficientes e ecológicas. Combinando a sustentabilidade, leveza e as propriedades térmicas da madeira com a rigidez, resistência mecânica e a capacidade de resistência ao fogo do betão, é possível obter uma estrutura resistente e ecológica ao mesmo tempo.

Um tipo de estrutura com uma utilização relativamente frequente da junção destes materiais, consiste na aplicação de uma camada de betão sobre vigas de madeira, formando uma laje, como é apresentado na Figura 2.

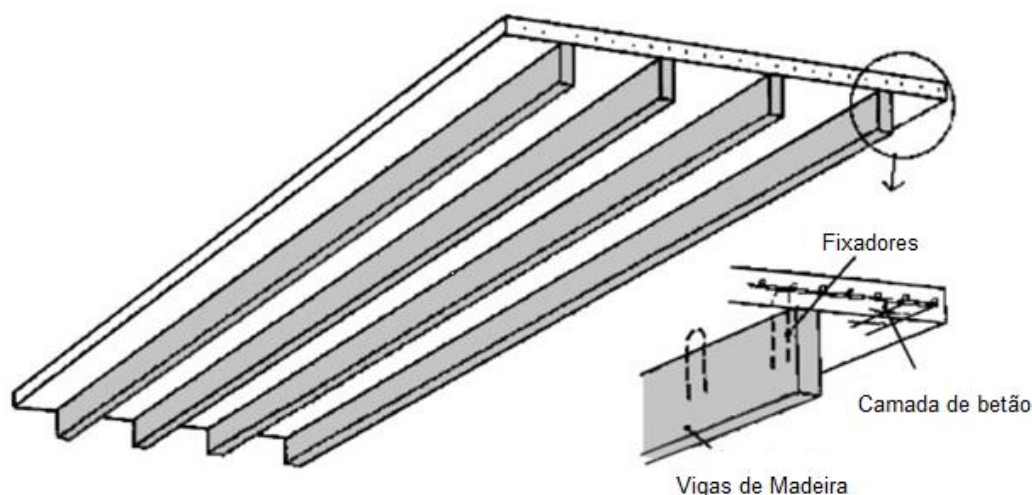


Figura 2 – Solução construtiva comum de uma laje mista madeira-betão. Adaptado de [5]

Um dos principais benefícios dos sistemas mistos madeira-betão é a redução do peso próprio em comparação com sistemas integralmente em betão armado. A madeira, com densidade significativamente menor, contribui para que a estrutura seja mais leve, o que permite diminuir a necessidade de fundações mais resistentes e conseguir alcançar vãos maiores [6-8]. Apesar desta solução não ser tão leve como uma estrutura unicamente de madeira, uma laje mista madeira-betão pode permitir suportar até três vezes mais carga e ter uma rigidez cerca de seis vezes superior a um pavimento apenas em madeira [5].

Desde que seja garantida uma ligação rígida entre os dois materiais, uma estrutura mista de madeira-betão apresenta bom comportamento face a sismos. Além disso, devido à capacidade de resistência ao

fogo do betão, este tipo de estrutura também apresenta bom comportamento em caso de incêndio. Outra vantagem destes pavimentos mistos é a sua capacidade de isolamento acústico. A camada de betão melhora o isolamento contra ruídos aéreos, enquanto que a maior capacidade de amortecimento da madeira contribui para um melhor isolamento contra ruídos de impacto [5], vantagens acrescidas em relação a pavimentos constituídos exclusivamente com um dos materiais.

A rapidez de construção na obra, a menor necessidade de cofragem e a redução das fundações devido a menor peso próprio tornam estes sistemas uma boa opção do ponto de vista económico [5, 7].

O campo de aplicação das estruturas mistas de madeira e betão não está apenas reduzido à construção ou reabilitação de edifícios, uma vez que este tipo de solução também é possível de ser usado na construção de pontes [6].

As estruturas mistas de madeira e betão envolvem a integração conjunta destes dois materiais de forma a otimizar as suas propriedades. Sabendo que o betão é um material muito pouco resistente à tração, esta solução construtiva contempla a aplicação de uma camada de betão na zona submetida à compressão, enquanto que a madeira fica sujeita às forças de tração. O sistema de ligação é responsável pela transmissão de esforços entre os dois materiais.

2.2.1. MADEIRA – ASPETOS GERAIS

Dentro dos materiais de construção mais utilizados pela indústria (betão, aço e madeira), a madeira apresenta-se como sendo o único material natural e renovável. É também o que consome menos energia para completar o seu processo de transformação, sendo assim o material mais eficiente no caminho para a sustentabilidade.

A madeira provém das árvores, sendo estas responsáveis por consumir o dióxido de carbono existente na atmosfera e libertar oxigénio. Quando se utiliza a madeira na construção de edifícios, o dióxido de carbono absorvido é armazenado ao longo da vida útil do edifício. Com isto, é possível reduzir significativamente as emissões de dióxido de carbono resultantes da construção apenas por substituir o uso de betão e aço pelo uso de um material sustentável como a madeira.

Com o uso de madeira como material de construção, além da redução de emissões incorporadas, as emissões de transporte também são reduzidas. Devido à leveza dos componentes de madeira em comparação com o betão, as emissões de gases poluentes como o dióxido de carbono devido ao transporte dos materiais são consideravelmente inferiores [9]. Estes aspetos encontram-se salientados na Figura 3.

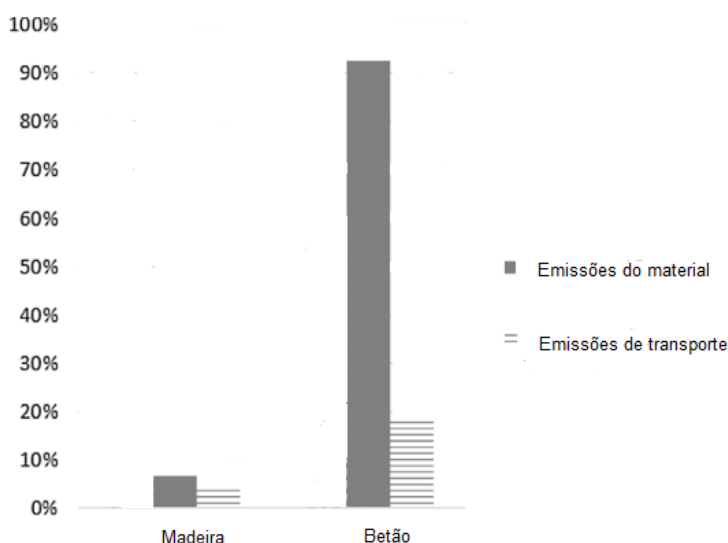


Figura 3 - Emissões de gases de efeito de estufa associadas ao uso de madeira em comparação com o betão. Adaptado de [9]

Devido às suas características a madeira é geralmente englobada em elementos pré-fabricados (assemblagem “*off-site*”), o que permite processos de montagem simples e um menor número de equipamentos de construção no local, o que consequentemente provoca uma redução da poluição sonora e do desperdício de resíduos em obra.

A madeira é um material leve e com boas propriedades mecânicas, capaz de resistir à compressão e à tração. Apresenta também uma elevada estanquidade ao ar e um baixo coeficiente de condutividade térmica, o que faz da madeira um bom isolante térmico e acústico.

2.2.1.1 MADEIRA MACIÇA

A madeira maciça pode ser definida como sendo uma madeira que não foi submetida a processos de extração química, embora possa ter sido fisicamente alterada através da serração. Quando se diz que uma madeira não foi submetida a processos de extração química, significa que este material manteve a sua composição química natural sem sofrer alterações através de reações químicas industriais. Esta madeira pode ter sido fisicamente alterada através da serração ou outros métodos mecânicos, mas não teve componentes removidos ou adicionados quimicamente.

A madeira maciça é obtida diretamente dos troncos das árvores sendo, assim, apenas uma única peça sólida e não formada por camadas [10].

As árvores de onde se obtém a madeira são divididas em duas classes tendo em conta a sua origem, as resinosas ou “*softwoods*” e as folhosas ou “*hardwoods*”. O termo resinosa refere-se às árvores gimnospermas que têm sementes sem revestimento; o termo folhosa é usado para as árvores angiospermas que produzem sementes com cobertura. As resinosas apresentam uma capacidade de crescimento mais rápido que as folhosas o que faz com que, em média, a sua dureza e densidade sejam menores; no entanto, há variações dessas propriedades dentro do mesmo grupo [11].

A madeira caracteriza-se por ser um material anisotrópico, ou seja, as suas propriedades variam consoante a direção em que as fibras da madeira estão orientadas. Além disso, diversas propriedades mecânicas como o módulo de elasticidade, a dureza, a densidade e a resistência, também variam consoante a

espécie da mesma. Desta forma, nem todas as madeiras são apropriadas para a construção de edifícios [12]. Além das propriedades físicas essenciais para o estudo estrutural, existem outras propriedades que também variam consoante a espécie da madeira como a cor, o brilho e o cheiro.

Mesmo dentro da mesma espécie, as propriedades da madeira podem variar significativamente devido a fatores como a localização, as condições climáticas, a idade da árvore ou processos de tratamento. A norma EN 338 [13] especifica as classes de resistência para madeira maciças com base nas suas propriedades resistentes. As classes de resistência são utilizadas para o dimensionamento de estruturas de madeira, permitindo que os engenheiros projetem com confiança, sabendo que as madeiras utilizadas atendem a padrões específicos de desempenho. Ao dimensionar uma estrutura de madeira, o projetista pode projetar utilizando os valores de resistência de uma classe particular e depois especificar essa classe nas condições técnicas a observar na seleção de material.

As classes de resistência são determinadas por ensaios específicos segundo a norma EN 384 [14], que avaliam propriedades como a resistência à flexão, densidade e módulo de elasticidade. Se os valores característicos de resistência à flexão, densidade e módulo de elasticidade médio paralelo às fibras, para uma população (conjunto de amostras) de madeira, forem maiores ou iguais aos valores de uma classe de resistência, então a população de madeira pode ser atribuída a essa classe de resistência.

As classes de resistência das madeiras resinosas representam-se pela letra C, enquanto as folhosas representam-se pela letra D. A Tabela 1 e a Tabela 2 apresentam as várias classes existentes e as respetivas propriedades.

Tabela 1 - Classes de resistências de madeiras resinosas. Adaptado de [13]

		Classes de resistência								
		C14	C16	C18	C22	C24	C27	C30	C35	C40
Propriedades de resistência (N/mm ²)										
Flexão	$f_{m,k}$	14	16	18	22	24	27	30	35	40
Tração paralela	$f_{t,0,k}$	8	10	11	13	14	16	18	21	24
Tração perpendicular	$f_{t,90,k}$	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Compressão paralela	$f_{c,0,k}$	16	17	18	20	21	22	23	25	26
Compressão perpendicular	$f_{c,90,k}$	4,3	4,6	4,8	5,1	5,3	5,6	5,7	6,0	6,3
Corte	$f_{v,k}$	1,7	1,8	2,0	2,4	2,5	2,8	3,0	3,4	3,8
Propriedades de rigidez (N/mm ²)										
Módulo de elasticidade médio paralelo	$E_{0,mean}$	7	8	9	10	11	12	12	13	14
Módulo de elasticidade paralelo (5º percentil)	$E_{0,05}$	4,7	5,4	6,0	6,7	7,4	8,0	8,0	8,7	9,4
Módulo de elasticidade médio perpendicular	$E_{90,mean}$	0,21	0,27	0,30	0,33	0,37	0,40	0,40	0,43	0,47

Módulo de distorção médio	G_{mean}	0,44	0,50	0,56	0,63	0,69	0,75	0,75	0,81	0,88
Densidade (Kg/m ³)										
Densidade	ρ_k	290	310	320	340	350	370	380	400	420
Densidade média	ρ_{mean}	350	370	380	410	420	450	460	480	500

Tabela 2 - Classes de resistências de madeiras folhosas. Adaptado de [13]

		Classes de resistência					
		D30	D35	D40	D50	D60	D70
Propriedades de resistência (N/mm ²)							
Flexão	$f_{m,k}$	30	35	40	50	60	70
Tração paralela	$f_{t,0,k}$	18	21	24	30	36	42
Tração perpendicular	$f_{t,90,k}$	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	0,9
Compressão paralela	$f_{c,0,k}$	23	25	26	29	32	34
Compressão perpendicular	$f_{c,90,k}$	8,0	8,4	8,8	9,7	10,5	13,5
Corte	$f_{v,k}$	3,0	3,4	3,8	4,6	5,3	6,0
Propriedades de rigidez (kN/mm ²)							
Módulo de elasticidade médio paralelo	$E_{0,mean}$	10	10	11	14	17	20
Módulo de elasticidade paralelo (5º percentil)	$E_{0,05}$	8,0	8,7	9,4	11,8	14,3	16,8
Módulo de elasticidade médio perpendicular	$E_{90,mean}$	0,64	0,69	0,75	0,93	1,13	1,33
Módulo de distorção médio	G_{mean}	0,60	0,65	0,70	0,88	1,06	1,25
Densidade (Kg/m ³)							
Densidade	ρ_k	530	560	590	650	700	900
Densidade média	ρ_{mean}	640	670	700	780	840	1080

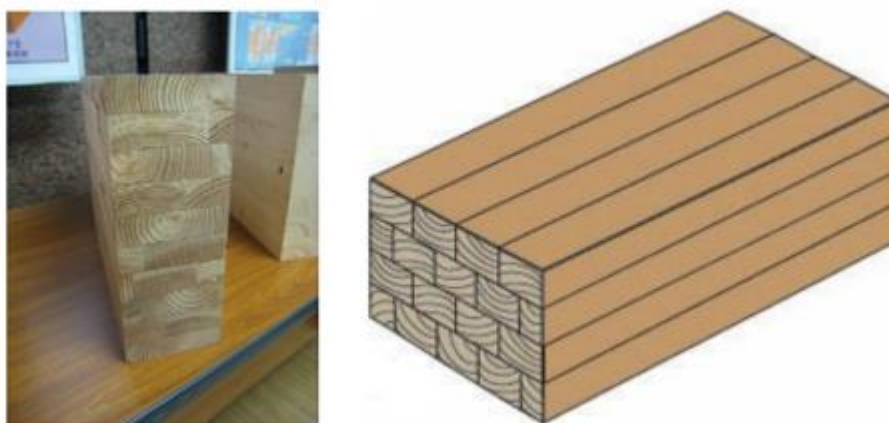


Figura 4 – Vigas de madeira maciça.

2.2.1.2 MADEIRA LAMELADA COLADA (GLULAM)

A madeira lamelada colada ou *Glulam* é um produto industrializado que altera as características da madeira de modo a reduzir os defeitos da mesma. Com origem na Alemanha, a madeira lamelada colada consiste na colagem de várias tábuas ou lamelas de madeira serrada, previamente secas e classificadas, sobrepostas paralelamente entre si e ao eixo longitudinal da peça, o que a torna num material mais homogêneo e isotrópico [3].

A norma EN 1194 [15] define as classes de resistência do *Glulam* com base nos valores característicos da resistência, nomeadamente à flexão, tração, compressão e corte, o seu módulo de elasticidade e distorção, e também a sua massa volúmica. Uma madeira só pode ser considerada pertencente a uma classe após garantir conformidade baseada em ensaios segundo as normas EN 408 e EN 1193 ou em cálculos segundo as normas EN 384 e EN 408.

Figura 5 - Configuração do *Glulam* [16]

Existem dois tipos de madeira lamelada colada: homogénea (h) e combinada (c). A EN 1194 [15] refere que a madeira lamelada colada **homogénea** apresenta uma secção transversal em que todas as lamelas pertencem à mesma espécie e classe de resistência. Por outro lado, na madeira lamelada colada **combinada**, as lamelas podem pertencer a diferentes espécies e diferentes classes de resistência. Nas

combinadas, as lamelas com classe de resistência mais elevada situam-se na zona superior e na zona inferior enquanto as com de menor resistência ficam na zona central, habitualmente sujeita a esforços de menor magnitude.

Devido à laminagem, a madeira lamelada colada minimiza os defeitos da madeira, o que resulta num produto mais resistente que a madeira maciça [3]. Apresenta uma melhor relação resistência/peso quando comparada com o aço ou o betão e, além disso, é um material bastante versátil em termos de dimensões o que a torna ideal para a construção de vigas e pilares. Outra vantagem é o comportamento que apresenta face a fumos e fogo [16].

Na Tabela 3 apresentam-se as principais características das várias classes de resistência de madeira lamelada colada.

Tabela 3 - Classes de resistência de madeiras lameladas coladas. Adaptado de [15]

		Classes de resistência GL							
		24h	24c	28h	28c	32h	32c	36h	36c
Propriedades de resistência (N/mm ²)									
Flexão	$f_{m,g,k}$	24	24	28	28	32	32	36	36
Tração paralela	$f_{t,0,g,k}$	16,5	14	19,5	16,5	22,5	19,5	26	22,5
Tração perpendicular	$f_{t,90,g,k}$	0,4	0,35	0,45	0,4	0,5	0,45	0,6	0,5
Compressão paralela	$f_{c,0,g,k}$	24	21	26,5	24	29	26,5	31	29
Compressão perpendicular	$f_{c,90,g,k}$	2,7	2,4	3,0	2,7	3,3	3,0	3,6	3,3
Corte	$f_{v,g,k}$	2,7	2,2	3,2	2,7	3,8	3,2	4,3	3,8
Propriedades de rigidez (N/mm ²)									
Módulo de elasticidade médio paralelo	$E_{0,g,mean}$	11,6	11,6	12,6	12,6	13,7	13,7	14,7	14,7
Módulo de elasticidade paralelo (5º percentil)	$E_{0,g,05}$	9,4	9,4	10,2	10,2	11,1	11,1	11,9	11,9
Módulo de elasticidade médio perpendicular	$E_{90,g,mean}$	0,39	0,32	0,42	0,39	0,46	0,42	0,49	0,46
Módulo de distorção médio	$G_{g,mean}$	0,72	0,59	0,78	0,72	0,85	0,78	0,91	0,85
Densidade (Kg/m ³)									
Massa volúmica	$\rho_{g,k}$	380	350	410	380	430	410	450	430

2.2.1.3 MADEIRA LAMELADA CRUZADA (CLT)

O CLT (*Cross Laminated Timber*), podendo também se chamar madeira lamelada cruzada em português, é também um material derivado da madeira. Tal como a madeira lamelada colada, consiste

na colagem de várias camadas de lamelas de madeira com cola estrutural; porém, no caso do CLT, as tábuas estão dispostas ortogonalmente entre si. O CLT é, geralmente, composto por um número ímpar de camadas, podendo ser três, cinco ou sete, mas, em certos casos específicos, pode ser ampliado [17].

O CLT é predominantemente utilizado em edifícios como lajes, paredes ou outros elementos estruturais. A madeira laminada cruzada é particularmente vantajosa quando utilizada em conjuntos de paredes e pavimentos pré-fabricados devido ao efeito de reforço proporcionado pela sua estrutura cruzada, que aumenta significativamente a resistência e a rigidez em determinados sistemas de ligação [17].

As dimensões dos painéis variam consoante o fornecedor escolhido e estão limitadas devido a questões de logística (armazenamento e transporte). Normalmente, a largura pode ir até um valor de 3 metros, o comprimento até 18 metros e a espessura até 50 centímetros [19].

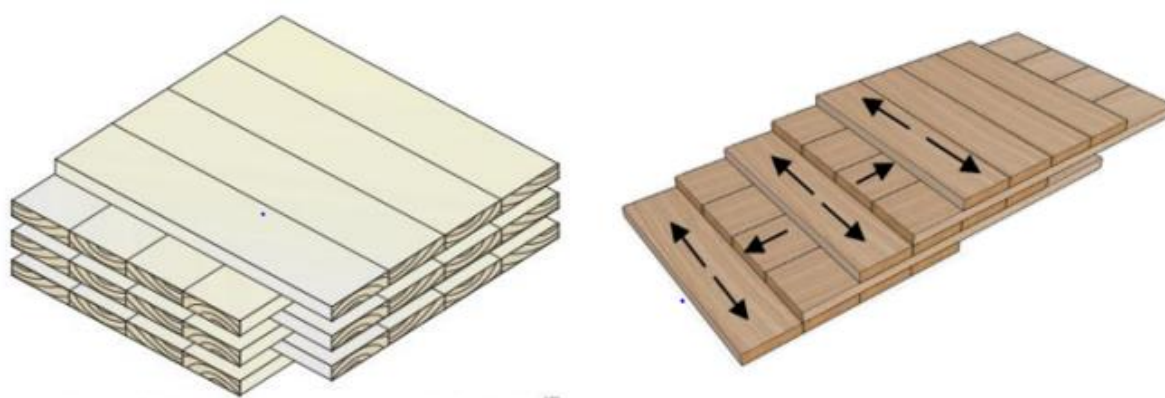


Figura 6 - Configuração típica do CLT [17, 18]

A espécie de madeira escolhida para a produção de um painel CLT pode variar consoante o tipo elemento estrutural, respeitando sempre as condições exigidas pelas normas, nomeadamente o Eurocódigo 5 [19].

Atualmente, praticamente todas as estruturas CLT são feitas de madeiras resinosas. No entanto, tem sido manifestado interesse em explorar as madeiras de folhosas para o fabrico destes painéis. Experiências com madeira de eucalipto mostraram resultados promissores que apontam para a sua adequação em painéis estruturais, uma vez que tem uma relação peso/densidade relativamente baixa, mas ainda assim possui uma boa resistência e uma boa capacidade de ligação [20]. Tanto o eucalipto como o pinho são duas espécies de madeira aceitáveis para a produção de painéis CLT [21], o que abre perspectivas interessantes no panorama português.

A utilização do CLT oferece um vasto número de vantagens. Começando pela sua sustentabilidade, por ser um material derivado da madeira, este diminui significativamente as emissões de gases de efeito de estufa sendo assim um ótimo material em termos de pegada ecológica, além de outras características sustentáveis já referidas sobre a madeira. Apresenta também um coeficiente de condutividade térmica baixo contribuindo para uma melhor eficiência energética.

Os painéis são pré-fabricados *off-site*, o que permite reduzir significativamente o tempo, trabalho e o número de trabalhadores necessários em obra, bem como o risco de acidentes. Além disso permitem a possibilidade de já apresentarem detalhes do projeto tais como aberturas para janelas, portas ou outras instalações necessárias.

O CLT apresenta excelentes propriedades de resistência e rigidez mesmo sendo um material leve, sendo mais forte do que o aço estrutural numa comparação por peso [3].

Além disso, têm vindo a ser feitos estudos que concluem que este material tem um bom comportamento face a ações sísmicas devido à elasticidade da madeira, evitando o colapso da estrutura. No entanto é preciso garantir que as ligações utilizadas são suficientemente rígidas [18].

Ao contrário de outros produtos industrializados da madeira, o Eurocódigo 5 não refere regras específicas para dimensionamento de estruturas com CLT. Além disso, não tem uma classificação em classes de resistência como a madeira lamelada cruzada. Desta forma, o engenheiro para efetuar o dimensionamento preciso de uma estrutura com CLT, precisa, em primeiro lugar, de selecionar o fornecedor [22].

2.2.2. BETÃO

Num sistema misto, o papel do betão é, fundamentalmente, para resistir aos esforços de compressão. Num compósito madeira-betão, este material também é importante para melhorar o comportamento face ao fogo da estrutura. A laje de betão permite criar uma barreira eficaz contra a propagação do fogo entre pisos. No entanto, devido à sua elevada massa volúmica, a espessura da camada de betão deve ser acautelada visto que tem uma influência nas cargas permanentes aplicadas na estrutura. Uma elevada espessura da camada de betão cria a necessidade de fundações mais resistentes e consequente aumento de custos associados. Num cenário de reabilitação a questão do peso próprio do betão é ainda mais importante.

Uma forma de resolver este problema, pode passar pela adoção de um betão de agregados leves (menor massa volúmica) em vez de um betão normal. Porém, o módulo de elasticidade e a resistência à tração de um betão leve são menores, o que leva a uma menor rigidez efetiva à flexão e consequente necessidade de sistemas de ligação com menor espaçamento [23].

A diminuição da massa volúmica do betão promove uma diminuição das cargas, o que diminui as deformações. Porém, a diminuição do módulo de elasticidade associada à utilização de um betão leve causa um aumento das deformações [24]. Além disso, a diminuição dos custos devido à redução do peso próprio da estrutura, pode ser contrariada pela necessidade de sistemas de ligação com distribuição mais apertada.

Outro problema associado à utilização de betão, é a reduzida resistência à tração que o material apresenta. Numa estrutura mista madeira-betão, a laje de betão pode ser acompanhada por uma armadura de forma a controlar a fissuração do betão derivada da baixa resistência à tração e efeitos de retração.

A Tabela 4 apresenta algumas classes de resistência e as respetivas propriedades associadas, fornecidas pelo Eurocódigo 2 [25].

Tabela 4 - Classes de resistência do betão. Adaptado de [25]

		C16/20	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50
Compressão característica	f_{ck}	16	20	25	30	35	40
Compressão característica (cubo)	$f_{ck,cubo}$	20	25	30	37	45	50
Compressão média	f_{cm}	24	28	33	38	43	48
Tração média	f_{ctm}	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5
Tração (5º percentil)	$f_{ctk,0,05}$	1,3	1,5	1,8	2,0	2,2	2,5
Tração (95º percentil)	$f_{ctk,0,95}$	2,5	2,9	3,3	3,8	4,2	4,6
Módulo de elasticidade	E_{cm}	29	30	31	33	34	35

2.3. SISTEMAS DE LIGAÇÃO DE ESTRUTURAS MISTAS MADEIRA-BETÃO

Numa estrutura de madeira-betão, o sistema de ligação tem um papel crucial na segurança da estrutura. Este elemento é responsável por evitar o deslizamento entre os dois materiais e pela transmissão de esforços. Desta forma, é crucial que a ligação seja rígida o suficiente para que sejam evitadas deformações; porém também é importante ter em atenção o número de ligadores para que a solução construtiva não se torne ineficiente em termos de custo e tempo de execução [6].

Uma solução mista eficiente só é obtida quando se utiliza um sistema de ligação eficaz para ligar a madeira ao betão. Uma ligação eficaz é uma ligação com resistência suficiente para transmitir os esforços de flexão e de corte, e suficientemente rígida para limitar o deslizamento entre os dois materiais. A Figura 7 apresenta a diferença entre o comportamento de uma estrutura sem sistema de ligação (1) e de uma estrutura com um sistema de ligação perfeito (2).

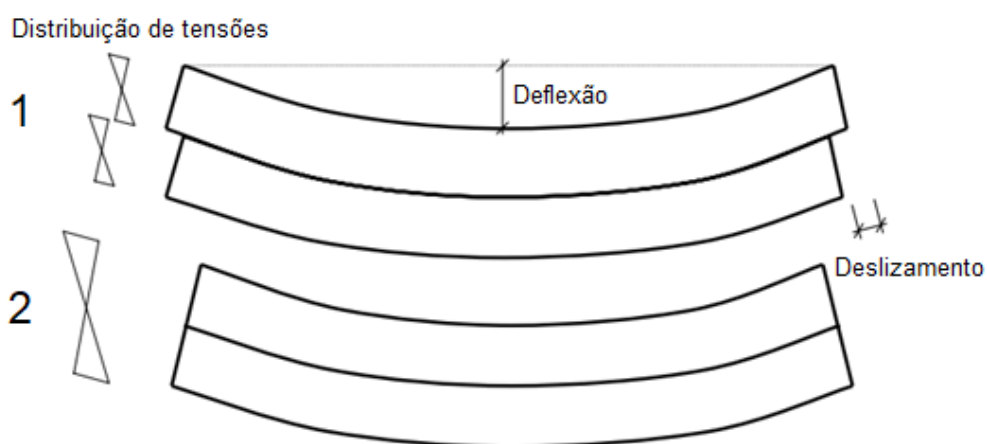


Figura 7 – Deformação e distribuição de tensões de um sistema sem ação composta (1) e de um sistema com ação composta total (2). Adaptado de [26]

Na estrutura sem sistema de ligação, existe um deslizamento significativo entre a madeira e o betão, o que leva a que os dois materiais resistam independentemente à flexão e, conseqüentemente, às tensões de compressão e de tração.

No segundo exemplo, os materiais são forçados a atuar como um só, resultando numa distribuição de tensões diferente. Neste caso, a madeira vai estar sujeita, essencialmente, a tensões de tração e o betão a tensões de compressão, o que resulta em deflexões inferiores. Desta forma, é possível verificar a importância que o comportamento mecânico do sistema de ligação tem no funcionamento das estruturas compósitas.

2.3.1. SISTEMA DE LIGAÇÃO TRADICIONAIS

Originalmente, os sistemas de ligação utilizados neste tipo de estruturas eram os mesmos que normalmente se utilizava em estruturas de madeira, nomeadamente, pregos e parafusos [26]. Estes sistemas ainda continuam a ser usados em estruturas mistas madeira-betão devido à sua simplicidade; no entanto, têm vindo a ser desenvolvidos novos sistemas de ligação de forma a aumentar a sua eficiência em termos estruturais e económicos.

Os sistemas de ligação de estruturas compostas podem ser classificados consoante o seu modo de funcionamento. As categorias são as seguintes [24]:

- Ligações por atrito;
- Ligações coladas;
- Ligações por contacto direto madeira-betão;
- Ligações por interposição de elementos metálicos.

As ligações por atrito envolvem sistemas que estão ligados pelo atrito propriamente dito entre os dois materiais ou uma aderência natural (química) que possa ser possível de estabelecer. Têm vindo a ser realizados estudos que procuram analisar se é possível a execução de uma estrutura mista madeira-betão com apenas este sistema de ligação.

Mesmo que seja necessário outro mecanismo de ligação, o atrito entre os dois materiais continua a ser uma parcela importante na rigidez da ligação [24]. Segundo Erler, com a utilização de um betão especial à base de polímeros com agregados de areia, foi possível eliminar, quase por completo, o deslizamento entre a madeira e o betão. A aderência entre os polímeros e a madeira era suficiente para transmitir os esforços de corte sem qualquer outro mecanismo de ligação [26]

As ligações coladas são as que permitem atingir graus mais elevados de rigidez, tendo uma ação composta completa da estrutura. Um exemplo de uma das ligações mais resistentes e rígidas, consiste na colagem de um perfil de aço com a forma de um “T”. A alma do perfil é colada na viga de madeira com resina epóxi. No banzo é inserida uma rede de aço contínua ao longo da camada de betão. A elevada rigidez da ligação madeira-aço elimina qualquer deslizamento na estrutura [26].

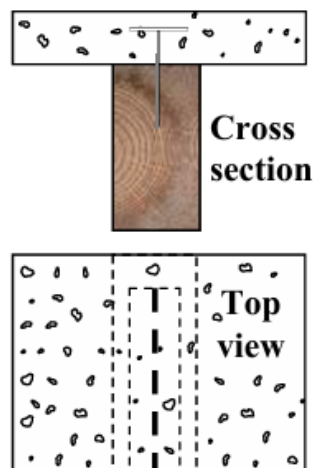


Figura 8 - Ligação colada com perfil de aço [26]

Apesar das vantagens referidas sobre as ligações coladas, o comportamento deste tipo de ligação, a longo prazo, ainda é algo que ainda se encontra sob análise e estudo, nomeadamente no efeito que derivam de variações humidade ou de cargas aplicadas na estrutura.

As ligações por contacto direto são sistemas bastante eficientes para estruturas mistas madeira-betão, uma vez que apresentam valores de rigidez e resistência elevados com custos relativamente baixos. Neste tipo de sistema de ligação, os esforços de corte são transferidos de um material para o outro através do contacto direto entre os dois materiais, devido ao facto de um material se encontrar embutido no outro [24, 26]. Grande parte das ligações por contacto direto consistem na abertura de um corte na madeira que posteriormente é preenchido com betão.

A desvantagem associada a este tipo de ligação é a suscetibilidade de levantamento (descolamento) da camada de betão. De forma a resolver este problema, este sistema de ligação é normalmente combinado com ligadores metálicos para aumentar a resistência da ligação na direção vertical [26]. O Eurocódigo 5 indica que a componente vertical da força de corte na zona da ligação deve ser considerada como 10% da força total, devendo a estrutura ser projetada para resistir a essa componente [24].

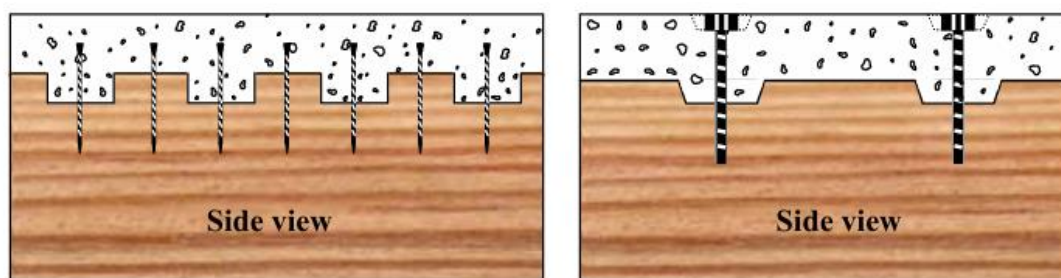


Figura 9 - Ligação entalhada em combinação com ligadores metálicos [26]

Segundo Yttrup, o levantamento da camada de betão pode ser contrariado pela abertura de entalhes horizontais e verticais nas vigas de madeira. A desvantagem deste sistema assenta na necessidade de parte da madeira estar dentro da camada de betão [26], o que complica a sua execução.

Além da abertura de entalhes, as ligações por contacto direto podem caracterizar-se pela colagem de blocos de madeira aos elementos principais, como é apresentado no exemplo situado à esquerda da Figura 10.

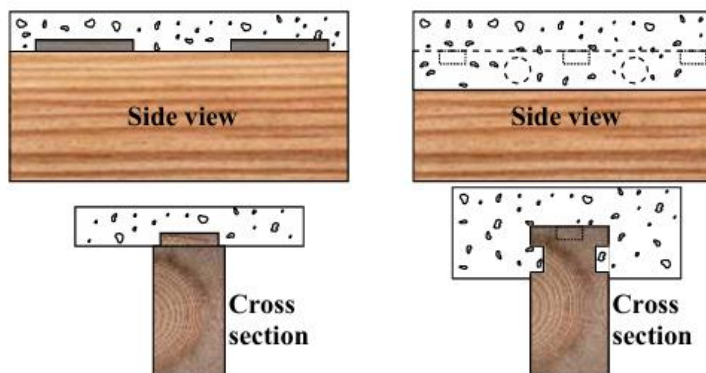


Figura 10 - Sistemas de ligação por contacto direto. (1) Blocos de madeira; (2) Entalhes horizontais e verticais [26]

As ligações por interposição de elementos metálicos consistem na utilização de conectores de metal pontuais, como, por exemplo, parafusos, pregos, ou elementos contínuos ao longo da viga, como malhas de aço (Figura 11). Este tipo de sistema é o mais comum em ligações compostas madeira-betão devido a sua facilidade de produção e o seu custo relativamente baixo [27].

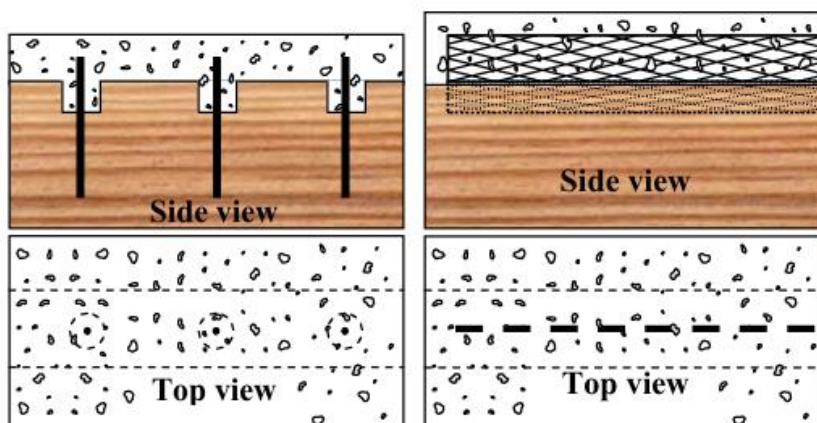


Figura 11 - Sistema de ligação com ligadores metálicos. (1) Pontual; (2) Contínua [26]

Ao longo do tempo têm vindo a ser desenvolvidos ligadores metálicos próprios para estruturas mistas de madeira-betão de forma a maximizar as características mecânicas deste tipo de sistemas e reduzir tempos e custos de aplicação [26].

Algumas experiências com ligadores metálicos inclinados com um ângulo de 60° sobre o plano horizontal demonstraram que a inclinação do elemento metálico poderia aumentar a capacidade de carga e aumentar o módulo de deslizamento da ligação. No entanto, a inclinação promove que a ligação esteja solicitada a esforços de arrancamento de maior valor, pelo que, a escolha do elemento metálico neste tipo de ligação em estruturas mistas madeira-betão deve ser bem ponderada e analisada [24].

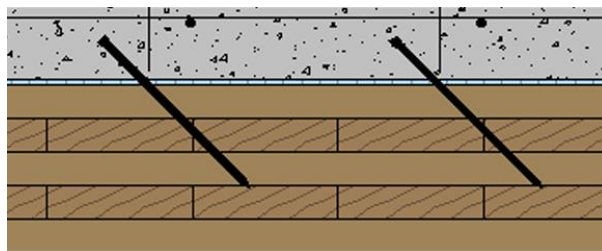


Figura 12 - Ligadores metálicos dispostos com inclinação [27]

Na Figura 13 apresenta-se uma compilação dos sistemas de ligação mais correntes em estruturas mistas madeira-betão.

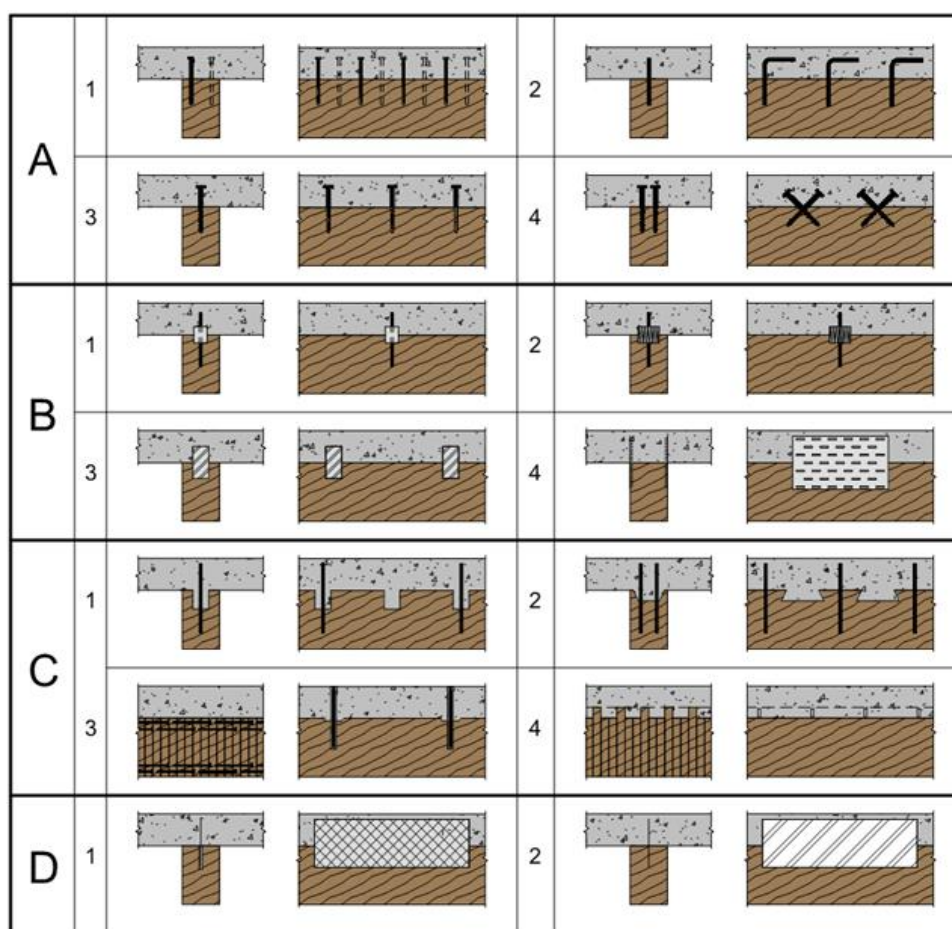


Figura 13 - Sistemas de ligação comuns em estruturas mistas madeira-betão [27]. Legenda: (A1). Pregos; (A2). Barras de aço coladas; (A3/4). Parafusos; (B1/2). Anéis e placas dentadas; (B3). Tubo de aço; (B4). Placas de metal perfuradas; (C1). Entalhes redondos na madeira com ligadores; (C2). Entalhes quadrados com ligadores; (C3). Entalhes com ligadores de aço pré-esforçados; (C4). Tabuas de madeira pregadas e placas de aço; (D1). Treliça de aço colada na madeira; (D2). Placa de aço colada na madeira

2.3.2. CARATERIZAÇÃO MECÂNICA DE SISTEMAS DE LIGAÇÃO

A capacidade de carga (F_{max}) e o módulo de deslizamento (k_s) são as principais propriedades de um sistema de ligação de uma estrutura mista madeira-betão. A capacidade de carga caracteriza a força máxima que pode ser aplicada na ligação. O módulo de deslizamento fornece informação sobre o

deslizamento da estrutura em função da carga aplicada numa fase elástica (Figura 14), sendo o melhor parâmetro para caraterizar a rigidez de uma ligação [26].

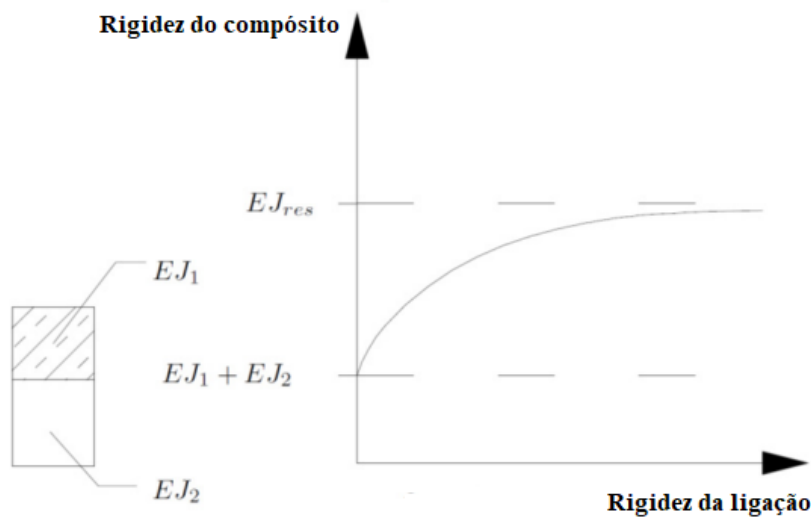


Figura 14 - Variação da rigidez da estrutura compósita em função do módulo de deslizamento do sistema de ligação. Adaptado de [28]

Através de um diagrama como o da Figura 15, é possível retirar informação sobre as propriedades mecânicas de um dado sistema de ligação, sendo informação a fornecer pelo fabricante respetivo.

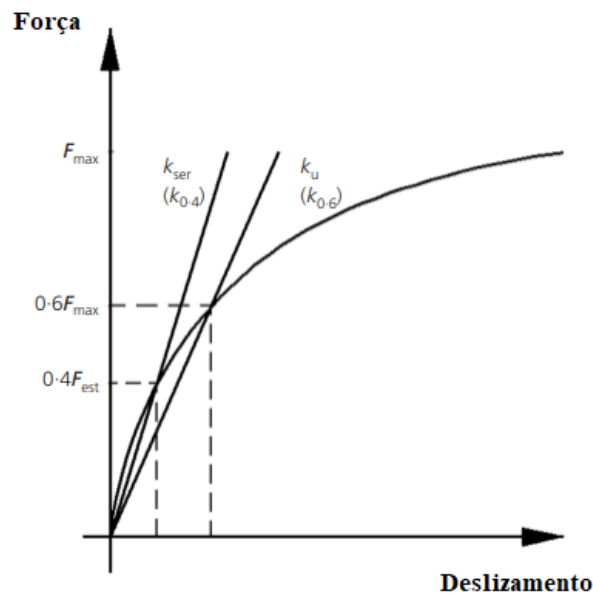


Figura 15 - Exemplo de diagrama força-deslizamento de um sistema de ligação. Adaptado de [6].

O coeficiente de deslizamento (k_s) apresenta dois valores diferentes consoante o estado limite a que está a ser verificada a estrutura. Numa análise aos Estados Limite de Utilização, o valor do coeficiente

de deslizamento corresponde ao valor definido pela tangente da curva quando a carga é 40% da carga máxima ($F_{\max}$) e é representado por k_{ser} . Aquando de uma verificação aos Estados Limite Últimos, é recomendado que o modo de deslizamento seja definido pela tangente da curva quando a carga é 60% da carga máxima e é representado por k_u [6]. O Eurocódigo 5 define que o valor de k_u também pode ser definido sendo 2/3 do valor de k_{ser} .

A Figura 16 apresenta o comportamento típico de vários sistemas de ligação face à aplicação de uma carga.

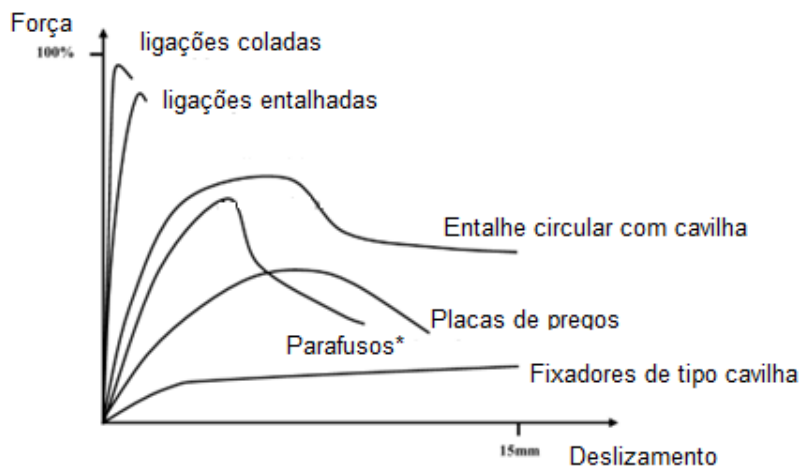


Figura 16 – Curvas força-deslizamento típicas de diferentes sistemas de ligação. Adaptado de [26]

É possível constatar que o comportamento mecânico por interposição de elementos metálicos é bastante diferente do comportamento das ligações coladas e das ligações por contacto direto madeira-betão. As ligações coladas e entalhadas são caracterizadas por elevadas resistências e rigidez, enquanto as ligações metálicas apresentam o contrário. No entanto, apesar da capacidade resistente e rigidez das ligações aparafusadas ser menor, estas apresentam capacidades de deformação plástica muito maiores em comparação com as restantes [26].

2.3.3. DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UM SISTEMA DE LIGAÇÃO

Devido a ausência de uma norma dedicada a ligações mistas de madeira e betão, os ensaios aplicados neste tipo de estruturas eram normalmente realizados apenas em conformidade com a norma EN 26891 que estabelece os princípios e regras para ligações madeira-madeira. Apenas com a publicação da especificação técnica dedicada a estruturas mistas madeira-betão CEN/TS 19103 [29] em 2021 é que foram adicionadas regras ao dimensionamento deste tipo de solução construtiva.

Segundo o documento técnico [29], os ensaios de determinação das propriedades mecânicas de compósitos madeira-betão devem ser ensaios de corte estático duplo com a configuração da Figura 17. A configuração apresentada consiste numa peça de madeira localizada entre duas peças de betão, onde os elementos são devidamente ligados consoante o tipo de sistema de ligação pretendido para o estudo. Devem ser introduzidas contenções laterais de forma a evitar a separação entre a madeira e o betão, sem que apliquem forças de pré-esforço que aumentem o atrito entre as superfícies.

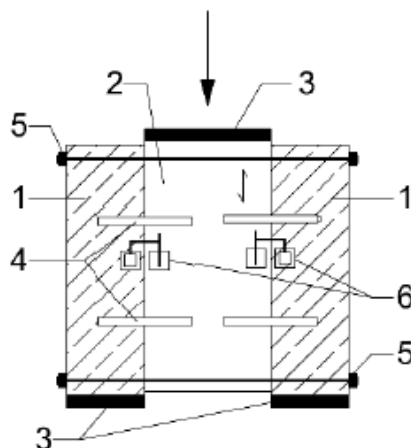


Figura 17 – Configuração do provete para ensaio de determinação das propriedades mecânicas de um sistema de ligação [29]. Legenda: 1. Betão; 2. Madeira; 3. Placa de aço; 4. Ligador metálico; 5. Contensões laterais; 6. Medidores de deslocamento

Quanto ao processo de aplicação da carga, este é definido pela norma EN 26891 [30]. O ensaio consiste na aplicação de uma força de compressão no centro no provete, ou seja, na peça de madeira, o que origina planos de corte nas juntas com os elementos de betão.

Os valores das cargas a aplicar no provete ao longo do ensaio são definidas por uma estimativa da capacidade de carga da ligação baseada em cálculos ou ensaios preliminares, representada por F_{est} . Esta estimativa deve ser alterada caso se verifique que o valor médio obtido nos ensaios desvie mais de 20% de F_{est} .

Numa primeira fase do ensaio, é aplicada uma força crescente até $0,4F_{est}$ que é mantida durante 30 segundos. De seguida, é reduzida até $0,1F_{est}$ e é novamente mantida durante 30 segundos. Após este processo, a força aplicada aumenta até que se atinja a capacidade de carga máxima ou um deslizamento superior a 15 milímetros.

O incremento final é controlado até se atingir $0,7F_{est}$, correspondendo a cerca de $0,2F_{est}$ por minuto. Após se atingir 70% da carga estimada, o ensaio passa a ser conduzido com controlo de deslocamento. A Figura 18 apresenta o processo de carregamento ao longo do tempo enunciado.

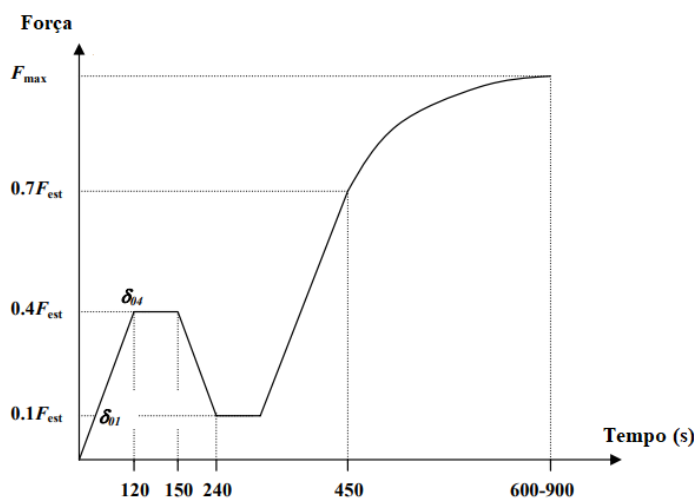


Figura 18 – Carregamento em função do tempo de acordo com o ensaio definido na norma EN 26891. Adaptado de [26]

O módulo de deslizamento do sistema de ligação é obtido com a informação dos deslizamentos medidos nos momentos em que a carga aplicada correspondeu a $0,1F_{est}$ e $0,4F_{est}$. A equação de cálculo do coeficiente de deslizamento com base no ensaio realizado é a seguinte:

$$k_s = \frac{0,4F_{est}}{\frac{4}{3}(\delta_{04} - \delta_{01})} \quad (1)$$

De notar que o valor do módulo de deslizamento obtido com base no ensaio (k_s) corresponde a valor a utilizar na verificação aos estados limite de utilização (k_{ser}). O valor a utilizar na verificação aos estados limites últimos corresponde a 2/3 do valor obtido, como já referido anteriormente.

Ao realizar os seus estudos, Dias [26] verificou que a fórmula de cálculo do módulo de deslizamento (1) não é a mais adequada para sistemas de ligação com interposição de elementos metálicos, devido ao facto de este tipo de ligação não apresentar um comportamento linear-elástico perfeito até pelo menos 40% da capacidade de carga. Em grande parte das ligações coladas e entalhadas este problema não acontece, como demonstra a Figura 16.

Dias demonstrou que, o valor da carga estimada (F_{est}) e os momentos em que o deslizamento é medido, influenciam significativamente os valores obtidos do coeficiente de deslizamento.

A Figura 19 e a Tabela 5 apresentam os resultados obtidos do carregamento de um sistema de ligação metálico para 3 diferentes valores de F_{est} . Os valores escolhidos são necessariamente devido ao facto de, como já mencionado anteriormente, a força estimada dever ser alterada quando varia em 20% os valores obtidos nos ensaios. Desta forma, os 3 valores diferentes de F_{est} usados são: $0,8F_{max}$, F_{max} e $1,2F_{max}$.

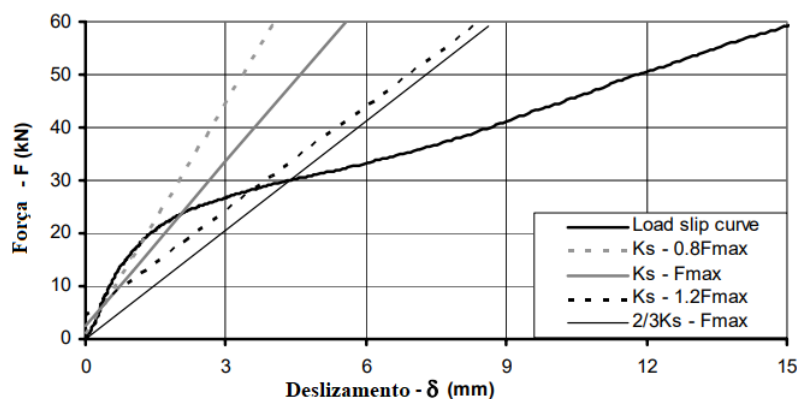


Figura 19 - Rigidez de um sistema de ligação metálico usando vários valores de F_{est} e com o módulo de deslizamento calculado como indicado no Eurocódigo 5 [26]

Tabela 5 - Módulos de deslizamento obtidos nos ensaios para os diferentes valores de F_{est} [26]

	F_{est}	$0,4F_{est}$ (kN)	k_s (kN/mm)
$0,8F_{max}$	47	28	15
F_{max}	59	24	10
$1,2F_{max}$	71	19	7

Com base na Figura 19 e Tabela 5, é possível verificar que a escolha da carga estimada inicial a aplicar tem influência nos valores do módulo de deslizamento k_s , calculado segundo a equação (1). O ensaio com a escolha de uma carga estimada de 80% da capacidade de carga resultou num valor do módulo de deslizamento cerca de 2 vezes maior do que no ensaio em que a carga estimada escolhida foi 120% da carga máxima. Com isto, conclui-se que mesmo seguindo a norma, é possível obter valores de k_s bastante diferentes apenas devido à escolha de F_{est} .

2.3.4. MÓDULOS DE DESLIZAMENTO SEGUNDO EUROCÓDIGO 5 E CEN/TS 19103

O Eurocódigo 5 e a especificação técnica CEN/TS 19103 [29] definem fórmulas de cálculo do coeficiente de deslizamento (k_{ser}) a adotar quando se pretende dimensionar uma estrutura de madeira-betão recorrendo a sistemas de ligação por interposição de elementos metálicos ou a entalhes (Tabela 6). O dimensionamento de estruturas mistas de madeira-betão, nomeadamente lajes, é abordado com mais detalhe no capítulo seguinte.

Tabela 6 - Valores do módulo de deslizamento k_{ser} de sistemas de ligação madeira-betão. Adaptado de [19, 29]

Ligador	Documento	k_{ser}
Sistemas de ligação metálicos (N/mm)		
Cavilhas		
Parafusos com porca (com ou sem folga)	EC5	$2 \frac{\rho_m^{1,5} d}{23}$
Pregos (com pré-furação)		
Pregos (sem pré-furação)	EC5	$\frac{\rho_m^{1,5} d^{0,8}}{15}$
Agrafos	EC5	$2 \frac{\rho_m^{1,5} d^{0,8}}{40}$
Anéis do tipo A segundo EN 912	EC5	$\rho_m d_c$
Placas de corte do tipo B segundo EN 912		
Placas dentadas tipo C1 a C9 segundo EN 912	EC5	$\frac{1,5 \rho_m d_c}{2}$
Placas dentadas tipo C10 a C11 segundo EN 912	EC5	$\rho_m d_c$
Sistemas de ligação entalhados (N/mm/mm)		
Profundidade do entalhe igual a 20 milímetros	CEN/TS 19103	1000
Profundidade do entalhe maior que 30 milímetros	CEN/TS 19103	1500

Sendo:

k_{ser} – Módulo de deslizamento para verificação aos estados limite de utilização;

ρ_m – Densidade média da componente em madeira em kg/m³;

d – Diâmetro do ligador em milímetros;

d_c – Diâmetro do ligador em milímetros definido pela norma EN 13271.

2.4. CAMADA INTERMÉDIA

Em vários sistemas compósitos madeira-betão é, normalmente, instalada uma camada intermédia entre os dois materiais, nomeadamente na reabilitação de pavimentos de madeira, de forma a criar uma proteção contra a temperatura ou humidade. A Figura 20 apresenta uma possível configuração de uma estrutura mista madeira-betão com a presença de uma camada intermédia.

Apesar das vantagens associadas à presença de uma camada intermédia entre a madeira e o betão, esta influencia o desempenho mecânico do sistema de ligação. Estudos realizados por Van der Linden, Dias e Jorge [28] permitiram chegar à conclusão que as propriedades mecânicas do sistema de ligação, nomeadamente a capacidade de carga e a rigidez, num sistema com camada intermédia, eram inferiores às propriedades de um sistema equivalente, mas sem a presença de uma camada intermédia. A Tabela 7 apresenta os resultados experimentais obtidos pelos estudos enunciados.

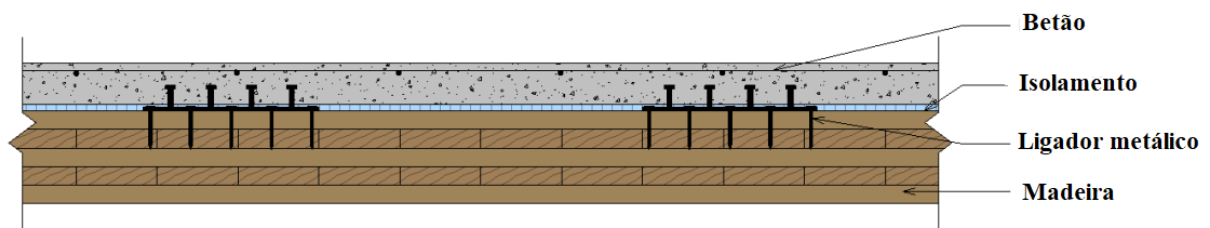


Figura 20 - Vista lateral de um pavimento misto madeira-betão com presença de camada intermédia. Adaptado de [27]

Tabela 7 - Influência da presença de uma camada intermédia na capacidade de carga e rigidez de um sistema de ligação. Adaptado de [28]

Tipo de sistema de ligação	Redução da capacidade de carga	Redução da rigidez	Referência do estudo
Pregos	13%	27%	Dias
Parafusos inclinados	30%	50%	Van der Linden
Entalhes com cavilhas	30%	22%	Van der Linden
Cavilhas	8%	35%	Dias
Entalhes	16%	34%	Dias
Parafusos inclinados	-	30%	Jorge

Os resultados da Tabela 7 mostram que para vários tipos de sistemas de ligação, em todos eles houve uma redução das suas propriedades mecânicas quando se insere uma camada intermédia, especialmente na rigidez.

2.5. SISTEMA LCT

Uma das abordagens mais inovadoras na construção de edifícios híbridos madeira-betão, é o sistema *LifeCycle Tower* (LCT), desenvolvido pela empresa austríaca CREE GmbH. Além de promover o uso de materiais renováveis (madeira), este sistema apresenta vantagens devido a técnicas de construção modular e pré-fabricação industrial.

A estrutura de um edifício CREE é composta por pilares de madeira lamelada colada, lajes híbridas, um núcleo de reforço e vigas intermédias de aço ou betão, quando necessário. Pode ser concebida para edifícios até 30 pisos ou até uma altura máxima de 100 m. Os sistemas CREE podem ser implementados para vários usos diferentes de edificação, tais como habitacional, industrial, escritórios; podem também ser aplicados a edifícios educacionais, hospitalares ou culturais. Além disso, têm a capacidade de adaptar os seus componentes às diferentes regulamentações existentes nas várias regiões.

Em termos de pegada de carbono, a solução CREE apresenta uma redução de mais de 40% em relação a soluções convencionais (Figura 21).

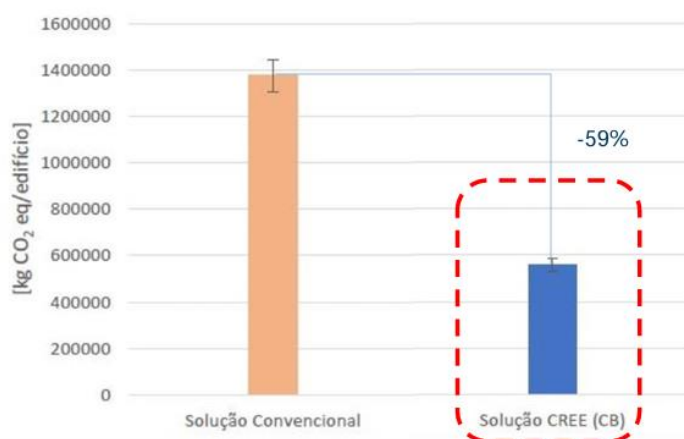


Figura 21 - Comparação da pegada de carbono da solução CREE com a convencional em betão armado [4]

2.5.1. CONFIGURAÇÃO DO MODELO

A Figura 22 apresenta os elementos construtivos que constituem um sistema LCT. A laje de fundação e o núcleo vertical são construídos em betão armado, de forma a garantir uma base sólida e estável para o edifício. As paredes, tetos e escadas localizadas no núcleo central são elementos pré-fabricados de betão. As restantes lajes, localizadas em cada piso, são painéis mistos de madeira-betão, montados em pilares de madeira lamelada colada (Glulam) na zona da fachada e em pilares de betão armado na zona central do edifício. Além dos pilares em betão armado, no centro do edifício, existem vigas intermédias de aço ou de betão, com o objetivo de garantir a estabilidade do edifício e servirem de apoio intermédio aos painéis de laje.

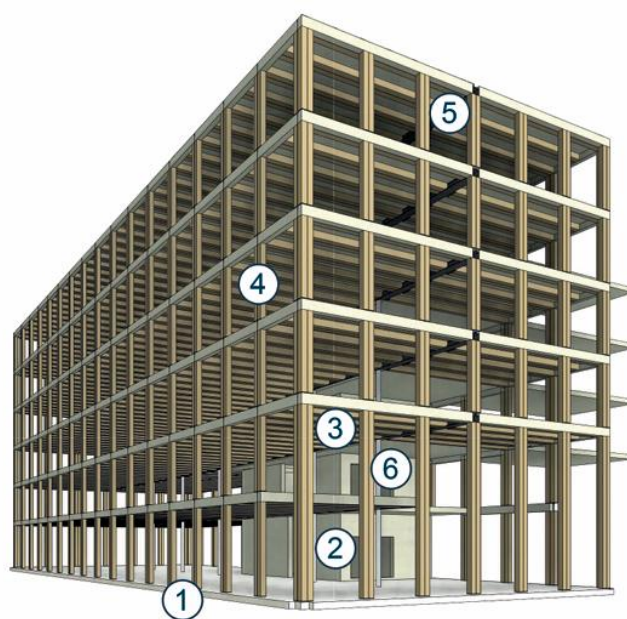


Figura 22 - Sistema de construção LCT [31]. Legenda: 1. Laje de fundação; 2. Núcleo vertical; 3. Painéis de laje híbrida madeira-betão; 4. Pilares de madeira lamelada colada; 5. Viga central de aço/betão; 6. Pilares de betão armado

Como referido, os painéis de laje são um composto de madeira-betão que podem garantir a estabilidade do edifício até vãos de nove metros, sendo ideal para disposição de espaços “*open space*”. A camada de betão, proporciona a necessária separação face ao fogo entre os pisos, além de assegurarem uma rigidez no plano horizontal, essencial para a distribuição das forças horizontais.

O método preferido da CREE para a ligação entre a madeira e o betão é uma ligação através da utilização de entalhes. Esta opção de ligação entre os dois materiais permite uma produção mais rápida e mostra ser uma alternativa mais económica. Além disso, permite que o processo de reciclagem seja mais fácil, sendo mais fácil separar os diferentes materiais.



Figura 23 - Entalhes nas vigas de madeira

As possíveis dimensões dos painéis de laje são as indicadas na Figura 24, podendo ser consideradas outras dimensões sob consulta prévia. Segundo a empresa, para vãos inferiores a 5 metros, reduz-se consideravelmente a eficiência técnico/económica da solução.

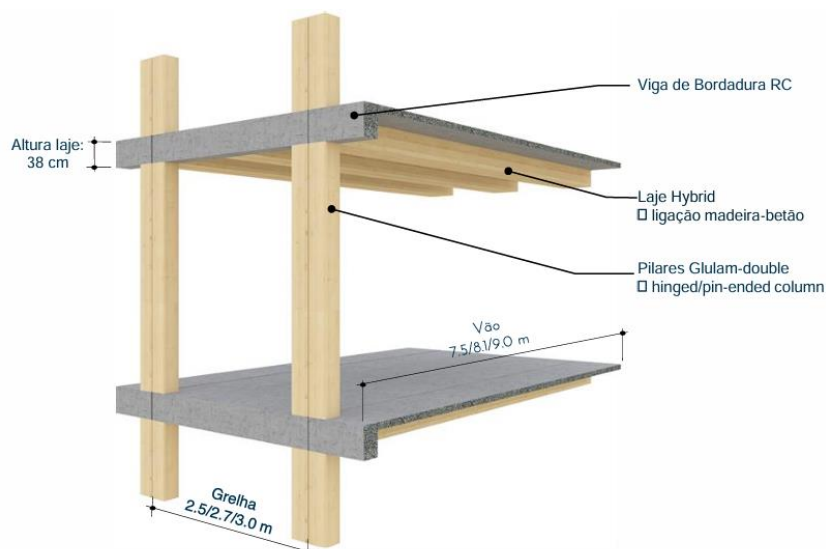


Figura 24 - Estrutura de um piso segundo o sistema CREE [4]

As paredes de fachada de um edifício LCT são construídas em madeira e não contribuem para suportar cargas atuantes na estrutura (exceto em alguns casos específicos em que seja necessário). Desta forma, é possível modificar os detalhes da fachada consoante as diferentes necessidades de cada projeto (Figura 25); no entanto, é necessário garantir que as dimensões dos elementos individuais da fachada estão em conformidade com as condições de transporte locais e de proteção ao fogo.

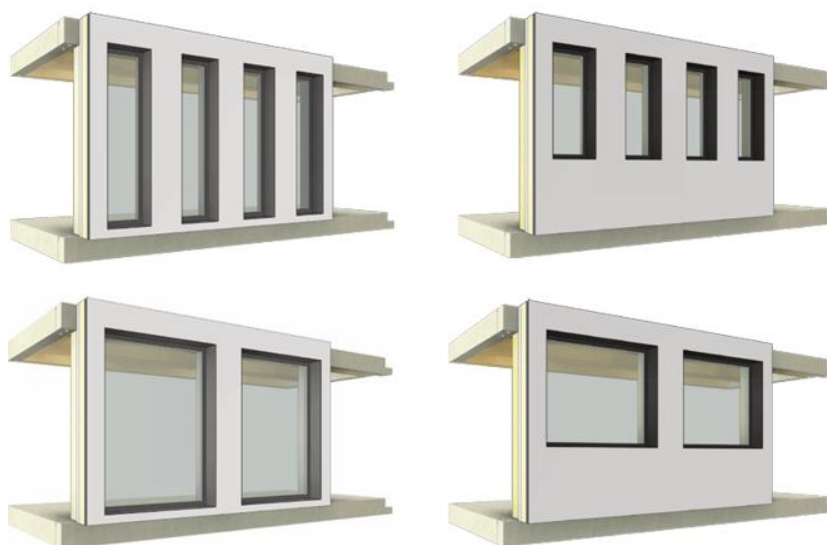


Figura 25 - Diferentes disposições de janelas admitidas num sistema LCT [31]

Os elementos da fachada são completamente pré-fabricados em fábrica com janelas, proteções solares e revestimentos incluídos, se possível. Isto permite que a montagem das paredes reduza o número de juntas e o trabalho necessário no local, conseguindo construir um edifício num curto espaço de tempo. Além disso, a desmontagem ou substituição de elementos na fachada é facilmente efetuada.



Figura 26 - Paredes exteriores de um edifício LCT [31].

A montagem dos elementos da fachada é realizada em conjunto com os pilares da estrutura, tal como mostra a Figura 27. A combinação da montagem dos pilares da estrutura com a fachada montada num único passo do processo, permite obter um pavimento estanque num curto espaço de tempo. Os painéis de laje são instalados posteriormente



Figura 27 – Montagem dos painéis de fachada [31]

Idealmente, o sistema LCT é concebido para edifícios com um número mínimo de 8 pisos, o que torna o seu uso adequado para a construção de escritórios, hotéis ou apartamentos. Pelo facto de os vãos poderem atingir cerca de 9 metros e as paredes divisórias, não estruturais, poderem ser removidas ou adicionadas conforme a necessidade do projeto, é possível ter uma disposição flexível das divisões do edifício.

Como é facilmente compreensível, o facto deste sistema possuir vigas de madeira aparentes faz com que seja mais interessante a sua utilização em edifícios com espaços modulares ou open-space, onde essas vigas podem surgir como elemento arquitectónico assumido ou estarem ajustadas aos elementos de parede não resistente. Exemplos de aplicações deste tipo surgem na Figura 28.



Figura 28 - Exemplos de disposições de espaço de um sistema LCT [31]

2.5.2. VANTAGENS DO SISTEMA LCT

Um edifício construído segundo o método LCT é planeado e pré-fabricado de forma sistemática. No entanto, isso não invalida a capacidade de personalizar o projeto consoante requisitos e preferências. Este sistema de construção apresenta um grande número de vantagens, das quais se destacam as seguintes:

- A produção *off-site* permite aumentar os níveis de produtividade, e consequente velocidade de construção, em comparação com a construção tradicional em obra. Reduz a necessidade de um grande número de trabalhadores em obra, ficando mais protegidos das condições ambientais exteriores. Além disso, na produção *off-site*, os trabalhadores produzem numa posição ergonómica;
- Melhor previsão de custos e tempo de construção devido ao processo integrado de conceção e construção;
- Eficiente economicamente para edifícios de grande dimensão;
- Redução da pegada ambiental devido ao uso de materiais renováveis como a madeira. Redução da poluição sonora e do trânsito nos locais de obra;
- Redução do peso da superestrutura e consequente redução do tamanho das fundações necessárias para sustentar a estrutura devido ao reduzido peso volúmico da madeira e mais resistente a sismos. Boas propriedades acústicas e bom comportamento face a vibrações e fogo devido à camada de betão dos painéis de lajes híbridas;
- Liberdade de conceção da arquitetura em alguns programas, nomeadamente na fachada e no interior do edifício;
- Redução de custos de manutenção e operação devido a estratégias de conceção passiva.

Na Figura 29 e Tabela 8, são comparadas duas soluções construtivas diferentes. A solução que se encontra mais à esquerda segue o sistema *LifeCycle Tower* da CREE enquanto a outra é uma solução convencional em betão. Além das vantagens referentes ao peso próprio da estrutura e do uso de materiais

renováveis que a solução LCT apresenta, este sistema também apresenta uma disposição do espaço mais eficiente. Para o mesmo pé direito, o sistema da CREE permite uma maior superfície de janela, como é possível constatar na figura.

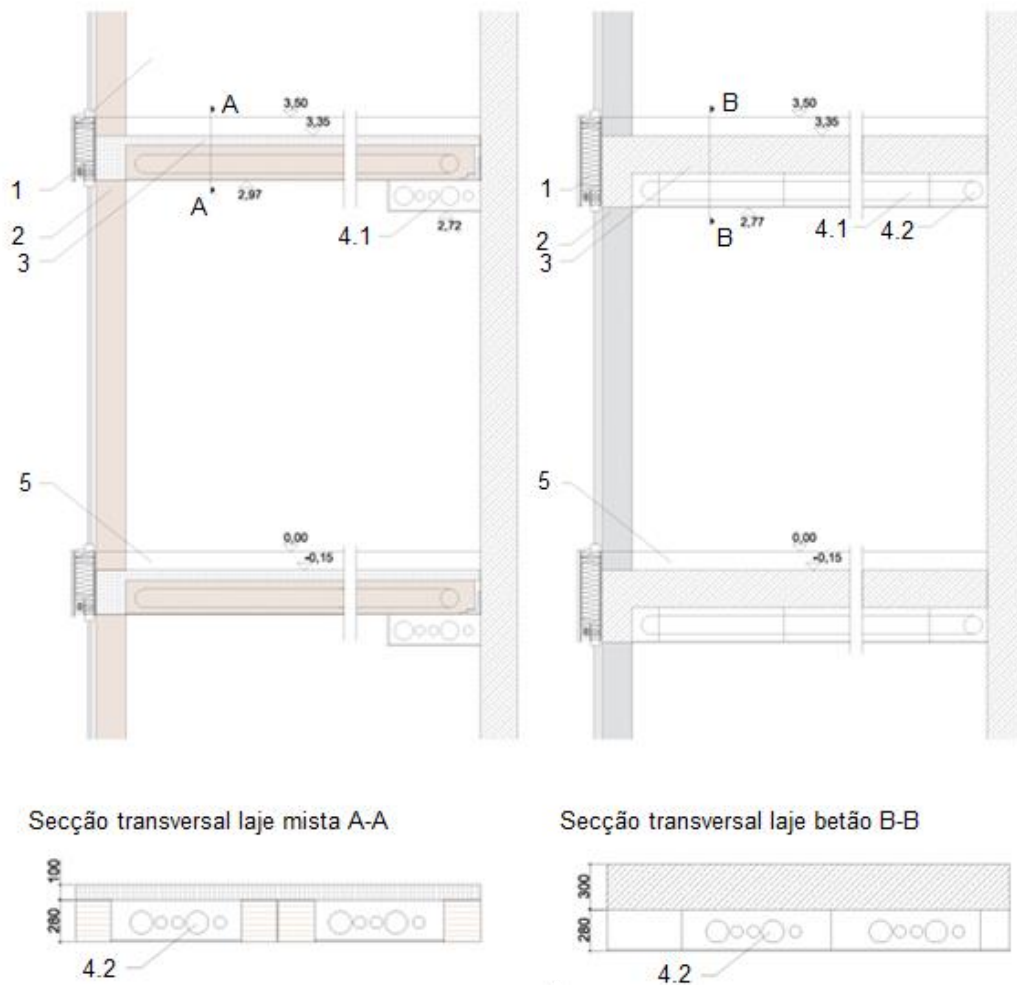


Figura 29 - Comparação laje mista LCT com solução em betão [31]. Legenda: 1. Parede de fachada; 2. Pilar em madeira lamelada colada (solução mista). Pilar em betão (solução em betão); 3. Laje LCT (solução mista). Laje de betão armado (solução em betão); 4.1. Serviços primários do edifício; 4.2. Serviços secundários do edifício; 5. Sistema de pavimento

Tabela 8 - Comparação sistema LCT com solução convencional em betão [31]

	Sistema híbrido madeira-betão	Sistema em betão armado
Volume de betão	0,1 m ³ /m ²	0,3 m ³ /m ²
Volume de madeira	0,1 m ³ /m ²	0 m ³ /m ²
Peso da estrutura de suporte	300 kg/m ²	750 kg/m ²
Emissões de CO ₂	0,15 to/m ²	0,75 to/m ²
Velocidade de operação (por 5 trabalhadores + grua)	500 m ² /dia	50 m ² /dia
Estanquidade do edifício	Instantânea	Após conclusão da envolvente
Garantia do custo	Alta	Baixa
Garantia de qualidade	Alta	Baixa
Melhoria da qualidade do espaço interior em termos de saúde	Sim	Não
Substituição de partes estruturais	Fácil	Difícil

2.5.3. SISTEMA DE PLANEAMENTO

Ao contrário do processo de planeamento convencional, em que o dono-de-obra define o seu objetivo, após isso contrata uma equipa projetista e somente depois contrata um empreiteiro para realizar a construção, no processo de planeamento CREE todos os intervenientes trabalham em conjunto desde o início, de forma que este processo seja o mais eficiente possível. O mapeamento do processo de planeamento baseado numa plataforma BIM e integrado com todas as partes envolvidas desde o início é um requisito importante para a implementação de uma construção modular sustentável e eficiente (Figura 30).

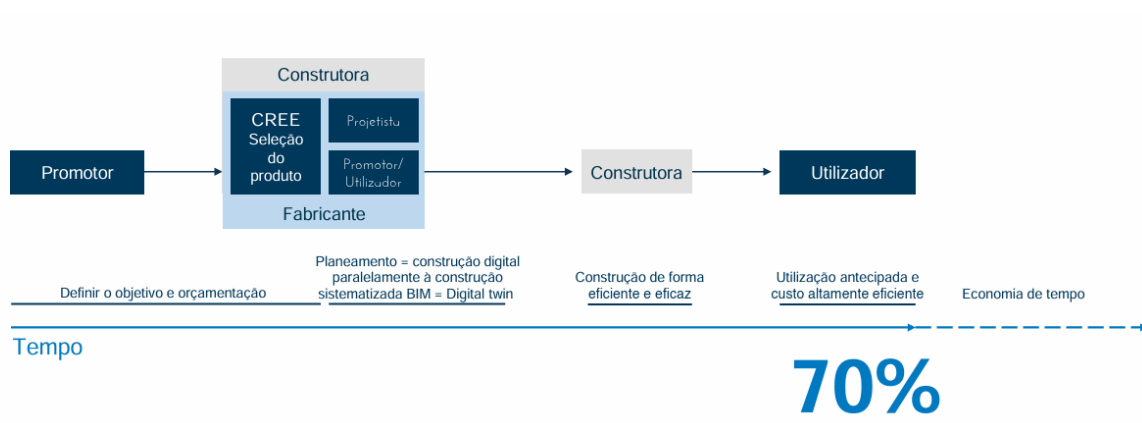


Figura 30 - Processo integrado CREE [4]

A empresa austríaca disponibiliza, numa plataforma própria, as informações sobre todos os seus edifícios construídos com o seu método. O objetivo é partilhar as suas experiências de construção, planeamento e utilização de edifícios construídos com o método CREE com empresas que, tal como a *CREE Buildings*, estejam interessadas em inovar o setor da construção e alcançar níveis adequados de construção sustentável. A empresa portuguesa Grupo Casais é uma das interessadas neste objetivo, tendo já sido responsável pela construção de alguns edifícios utilizando os métodos enunciados anteriormente.

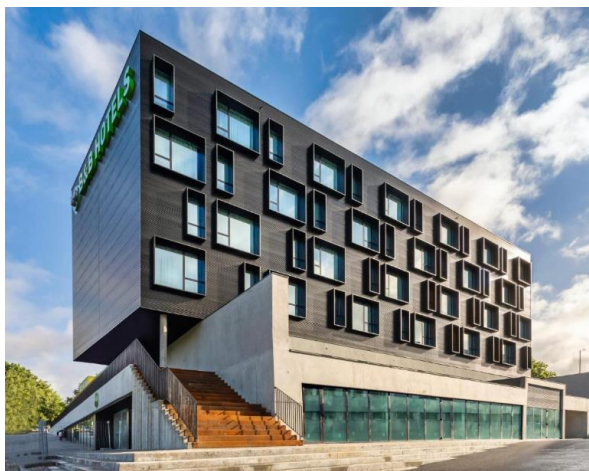


Figura 31 - B&B HOTEL em Guimarães. Construído pela empresa Grupo Casais

2.6. NOTAS FINAIS

Neste capítulo procurou-se apresentar um resumo dos aspetos mais relevantes na conceção de uma estrutura mista madeira-betão, passando pela descrição das principais características dos materiais, das soluções construtivas que estão associadas à junção dos mesmos e, na parte final, a referência a um sistema construtivo que começa a ter alguma expressão em Portugal.

Como referido no início, o objetivo deste trabalho consiste em explorar uma variante da solução-base CREE, pelo que se considerou importante efetuar este levantamento de modo que um projetista possa ter uma noção das diversas questões e condicionantes que estão em jogo, antes de decidir sobre a solução construtiva que irá desenvolver, podendo tomar essa decisão com maior conhecimento do que se encontra em jogo, vantagens, inconvenientes, potencial e limitações.

3

DIMENSIONAMENTO DE LAJES MADEIRA-BETÃO

3.1. INTRODUÇÃO

Ao contrário das estruturas compósitas de betão e aço, ainda não existe um Eurocódigo dedicado às estruturas mistas de madeira e betão. Como tal, o dimensionamento deste tipo de estruturas deve ser realizado com base no Eurocódigo 5 [19] e na Especificação Técnica CEN/TS 19103 [29] publicada em 2022 e que apresenta recomendações gerais aplicáveis a projetos de estruturas mistas de madeira e betão.

A publicação desta Especificação Técnica surgiu para responder ao aumento do uso de estruturas mistas madeira-betão verificado nos últimos anos. Este documento apresenta regras de dimensionamento complementares ao Eurocódigo 5, encontrando-se neste momento em fase de teste até 2025. Após este período, é previsto que se converta numa nova parte do Eurocódigo 5.

Quando se pretende projetar estruturas madeira-betão, a documentação associada impõe algumas limitações que têm de ser cumpridas, nomeadamente:

- Utilização de madeira de classe de resistência mínima C24 ou GL24 para estruturas com sistemas de ligação entalhados;
- Utilização de betão de classe de resistência mínima C12/15. No caso de o sistema de ligação ser realizado com recurso a entalhes, a classe de resistência mínima é C20/25;
- Espessura mínima da camada de betão de 50 milímetros e máxima de 300 milímetros. Espessura máxima da camada intermédia de 50 milímetros;
- Mínimo de 4 ligações distribuídas ao longo do vão da estrutura. No caso de o vão ser inferior a 2 metros, o número mínimo de ligações pode ser reduzido para 2.
- Armadura mínima de $0,80 \text{ cm}^2/\text{m}$ nas duas direções (transversal e longitudinal), a menos que seja necessário mais de forma a controlar a fissuração do betão. O objetivo da armadura é controlar a fendilhação de modo a manter a integridade da ligação, sendo mais eficaz quando colocada perto da madeira.

3.2. PRINCÍPIOS GERAIS DE DIMENSIONAMENTO

O Eurocódigo 5 refere que, tal como qualquer outro projeto de estruturas, este deve ser projetado de acordo com os princípios base descritos no Eurocódigo 0 [32]. Como tal, a segurança estrutural de uma laje mista deve ser verificada relativamente aos estados limite últimos e estados limite de utilização.

De forma a ter em consideração as condições ambientais às quais a estrutura estará exposta durante a sua vida útil, o Eurocódigo 5 classifica as estruturas em classes de serviço. A classificação em diferentes

classes de serviço é essencial para que a estrutura seja devidamente projetada com base no teor de água dos materiais. A categorização feita pelo Eurocódigo 5 é a seguinte:

- Classe de serviço 1: teor de água nos materiais correspondente a uma temperatura de 20°C e a humidade relativa do ar apenas excede 65 % durante algumas semanas por ano;
- Classe de serviço 2: teor de água nos materiais correspondente a uma temperatura de 20°C e a humidade relativa do ar apenas excede 85 % durante algumas semanas por ano;
- Classe de serviço 3: condições climáticas que resultam em valores de teor de água nos materiais superior aos referidos na classe de serviço 2.

A Especificação Técnica propõe que as estruturas mistas madeira-betão devem ser concebidas de modo a pertencerem apenas à classe de serviço 1 ou à classe de serviço 2.

Relativamente às ações atuantes na estrutura, o Eurocódigo 5 define 5 categorias de duração. Esta classificação permite dimensionar refletindo adequadamente as condições reais de utilização da estrutura. As categorias enunciadas são dadas pela Tabela 9.

Tabela 9 - Classificação da duração das ações. Adaptado de [19]

Classe de duração da ação	Ordem de grandeza de duração	Exemplo de ação
Permanente	Superior a 10 anos	Peso próprio
Longo prazo	Entre 6 e 10 meses	Armazenamento
Médio prazo	Entre 1 semana e 6 meses	Sobrecarga de pavimento, neve
Curto prazo	Inferior a uma semana	Neve, vento
Instantânea	Instantânea	Vento, acidentes

3.2.1. COMBINAÇÕES DE AÇÕES

A verificação aos Estados limite últimos é considerada para assegurar que a estrutura não colapse sob cargas extremas. Segundo o Eurocódigo 0, na verificação a estes estados limite, deve ser usada a combinação de ações fundamental dada pela expressão seguinte:

$$E_d = E \left\{ \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \right\} \quad (2)$$

Aquando da verificação aos estados limite de utilização, é utilizada a combinação de ações característica (2) numa análise a curto prazo para verificação da deformação instantânea, enquanto a longo prazo é utilizada a combinação de ações quase-permanente (3) para verificar a deformação ao longo do período de vida da estrutura [33].

$$E_d = E \left\{ \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} Q_{k,i} \right\} \quad (3)$$

$$E_d = E \left\{ \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \right\} \quad (4)$$

Sendo:

E_d - Valor de cálculo do efeito das ações;

E - Efeito de uma ação;

$\gamma_{G,j}$ - Coeficiente parcial de segurança relativo à ação permanente j ;

$\gamma_{Q,i}$ - Coeficiente parcial de segurança relativo à ação variável i ;

$G_{k,j}$ - Valor característico da ação permanente j ;

$Q_{k,i}$ - Valor característico da ação variável i ;

$\psi_{0,i}$ - Coeficiente para a determinação do valor de combinação de uma ação variável i ;

$\psi_{2,i}$ - Coeficiente para a determinação do valor quase-permanente de uma ação variável j .

Tabela 10 - Fatores de segurança parciais recomendados segundo Eurocódigo 0 [32]

Fator de segurança	Valor recomendado segundo EC0
γ_G	1,35
γ_Q	1,5

Os valores dos coeficientes de combinação para ações (ψ_0 e ψ_2) são definidos pelas categorias de utilização do edifício.

Na Tabela 11 são apresentadas algumas das categorias de utilização fornecidas pelo Eurocódigo 1 [34] e os respetivos coeficientes de combinação para ações fornecidos pelo Eurocódigo 0.

Tabela 11 - Valores dos coeficientes de combinação para ações em edifícios. Adaptado de [32]

Categoria de utilização	ψ_0	ψ_2
Categoria A (zonas de habitação)	0,7	0,3
Categoria B (zonas de escritórios)	0,7	0,3
Categoria C (zonas de reunião de pessoas)	0,7	0,6
Categoria D (zonas comerciais)	0,7	0,6

3.2.2. SOBRECARGA

As ações em edifícios que resultam da sua ocupação, são definidas por sobrecarga. Ao dimensionar um projeto de estruturas é necessário quantificar o valor da sobrecarga consoante a categoria de utilização do edifício pretendido. Os valores característicos das sobrecargas são definidos pelo Eurocódigo 1 e constam da Tabela 12.

Tabela 12 - Valores de sobrecarga recomendados em edifícios. Adaptado de [34]

Categoria de utilização	Valores recomendados de q_k (kN/m ²)
Categoria A (zonas de habitação)	2,0
Categoria B (zonas de escritórios)	3,0
Categoria C (cinemas, escolas, palcos)	3,0 a 5,0*
Categoria D (zonas comerciais)	4,0 a 5,0*
Nota*: As categorias C e D estão divididas em subcategorias que apresentam diferentes valores recomendados	

3.2.3. INFLUÊNCIA DA DURAÇÃO DAS AÇÕES E DO TEOR EM ÁGUA NA DEFORMAÇÃO

Os efeitos a longo prazo na estrutura devem ser tidos em conta quando se pretende dimensionar uma estrutura mista madeira-betão visto que, a duração das cargas aplicadas na estrutura e o teor de humidade influenciam a deformação a longo prazo.

O Eurocódigo 5 define um coeficiente de deformação k_{def} com base na classe de serviço em que é projetada a estrutura (Tabela 13).

Tabela 13 - Valores do coeficiente k_{def} . Adaptado de [19]

Material	Classe de serviço		
	1	2	3
Madeira maciça	0,60	0,80	2,0
Madeira lamelada colada	0,60	0,80	2,0

O efeito da fluência dos materiais na distribuição de tensões e na deformação da estrutura composta a longo prazo, deve ser considerado utilizando os módulos de elasticidade efetivos do betão e da madeira, bem como o módulo de deslizamento efetivo do sistema de ligação. O cálculo dos módulos efetivos é algo que é abordado mais à frente nesta dissertação.

3.2.4. INFLUÊNCIA DA DURAÇÃO DAS AÇÕES E DO TEOR EM ÁGUA NA CAPACIDADE RESISTENTE

A duração das ações e o teor em água nos materiais também são considerados face à capacidade resistente da estrutura. No caso da madeira é utilizando um fator de modificação k_{mod} . O valor atribuído a este coeficiente depende da classe de serviço e da duração das ações da estrutura, sendo cada vez mais reduzido consoante a intensidade dos efeitos. Além disso varia conforme o tipo de madeira escolhido para o projeto.

Tabela 14 - Valores do coeficiente k_{mod} . Adaptado de [19]

Material	Classe de serviço	Classe de duração das ações				
		Permanente	Longo prazo	Médio prazo	Curto prazo	Instantânea
Madeira maciça	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
	2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
	3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90
Madeira lamelada colada (Glulam)	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
	2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
	3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90

O Eurocódigo 5 dá indicação de que se uma combinação de cargas consistir em ações pertencentes a diferentes classes de duração de carga, deve ser escolhido um valor de k_{mod} que corresponda à ação com a duração mais curta, por exemplo, para uma combinação de peso próprio e carga de curta duração, deve ser utilizado um valor de k_{mod} correspondente à carga de curta duração.

O valor de cálculo de uma propriedade resistente da madeira é assim determinado pela seguinte expressão:

$$X_d = k_{mod} \frac{X_k}{\gamma_M} \quad (5)$$

X_k - Valor característico de uma propriedade resistente;

γ_M - Coeficiente parcial de segurança da madeira;

k_{mod} - Fator de modificação relativo à duração das ações e o teor em água.

Os valores de cálculo das tensões de rotura à compressão (6) e à tração do betão (7) são determinados com recurso ao Eurocódigo 2 [25].

$$f_{cd} = a_{cc} \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (6)$$

$$f_{ctd} = a_{ct} \frac{f_{ctk,0,05}}{\gamma_c} \quad (7)$$

f_{ck} – Valor de cálculo de uma propriedade resistente;

$f_{ctk,0,05}$ - Valor característico de uma propriedade resistente;

γ_c – Coeficiente parcial de segurança relativo ao betão;

a_{cc} – Coeficiente que tem em conta os efeitos de longo prazo na resistência à compressão do betão e os efeitos desfavoráveis resultantes do modo como a carga é aplicada.

a_{ct} – Coeficiente que tem em conta os efeitos de longo prazo na resistência à tração do betão e os efeitos desfavoráveis resultantes do modo como a carga é aplicada.

Tabela 15 - Coeficiente que têm em conta os efeitos de longo prazo na resistência à compressão e tração do betão [25]

Coeficiente	Valor recomendado
a_{cc}	1,0
a_{ct}	1,0

A influência da duração das ações e do teor em água na resistência da ligação entre o betão e a madeira deve ser considerada utilizando o fator de modificação k_{mod}' . Este valor deve ser calculado utilizando a seguinte equação:

$$k_{mod}' = \sqrt{k_{mod} a_{cc}} \quad (8)$$

Sendo assim, o valor de cálculo da capacidade resistente ao corte da ligação entre a madeira e o betão é dado pela equação (9).

$$F_{v,Rd} = k_{mod}' \frac{F_{v,Rk}}{\gamma_v} \quad (9)$$

$F_{v,Rk}$ – Valor característico de uma propriedade resistente;

γ_v – Coeficiente parcial de segurança da resistência ao corte da ligação;

k_{mod}' – Fator de modificação da capacidade resistente da ligação relativo à duração das ações e o teor em água.

Tabela 16 - Fatores parciais recomendados para as propriedades e resistências dos materiais. Adaptado de [19, 25, 29]

Material	Valor do coeficiente parcial
Madeira e derivados	
• Madeira maciça	1,3
• Madeira lamelada colada (Glulam)	1,25
Betão	1,5
Ligador	1,25

3.2.5 FISSURAÇÃO DO BETÃO

Segundo a Especificação Técnica CEN/TS 19103 [29], a fissuração do betão devido as tensões de tração suportadas pelo material, deve ser tida em conta na determinação dos esforços internos, da deformação e da resistência da camada de betão da estrutura mista. Tal pode ser feito através da introdução de uma camada fictícia (desprezável do ponto de vista estrutural) que representa a zona fissurada do betão. A altura da camada é determinada iterativamente até que se verifique que a tensão de tração é menor que o valor de cálculo da resistência (f_{ctd}).

O documento técnico considera que as fissuras no betão devem ser controladas através do uso de armaduras transversais e longitudinais de acordo com a classe de resistência e espessura da camada de betão (Figura 32). A Tabela 17 apresenta os valores de armadura mínimos recomendados pelo documento para algumas classes de betão [29].

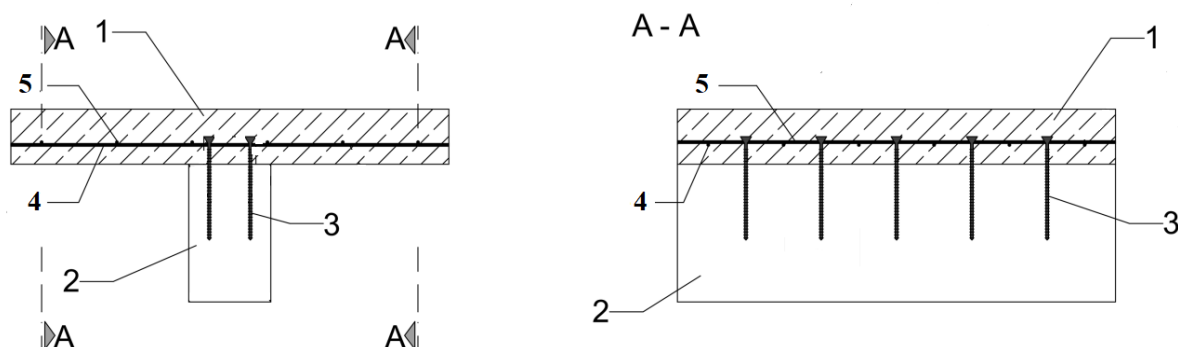


Figura 32 - Armaduras transversais e longitudinais instaladas na camada de betão. Adaptado de [29]. Legenda: 1. Betão; 2. Madeira; 3. Ligador metálico; 4. Armadura transversal; 5. Armadura longitudinal

Tabela 17 - Armadura mínima em cada direção (cm^2/m) para controlar a fissuração do betão sem ser necessário calcular a largura das fissuras [29]

Classe de betão	Espessura da camada de betão (cm)	Armadura mínima (cm^2/m)
C20/25	5	0,80*
	7	0,80*
	10	0,88
C25/30	5	0,80*
	7	0,80*
	10	1,04
C30/37	5	0,80*
	7	0,82
	10	1,16

*Valor controlado pela obrigação mínima de $0,80 \text{ cm}^2/\text{m}$

3.3. MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO (EUROCÓDIGO 5)

O cálculo dos esforços atuantes e deformações na secção pode ser feito de diferentes formas com base na rigidez da ligação entre os dois materiais. No caso de a ligação ser rígida podemos homogeneizar a secção num só material e obter os esforços atuantes na secção e as deformações usando apenas equações simples da resistência dos materiais [18].

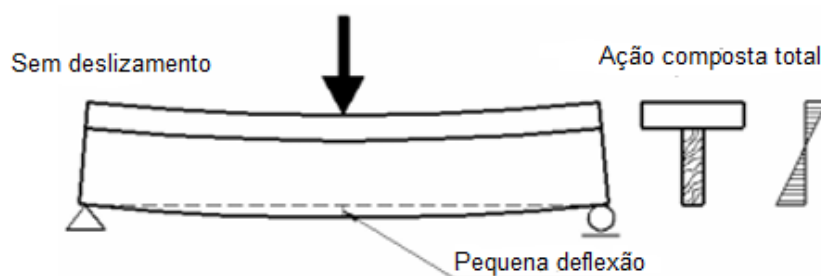


Figura 33 – Diagrama de tensões de uma estrutura mista com ligação rígida. Adaptado de [6]

Caso a ligação entre os dois materiais não seja rígida o suficiente, irão começar a aparecer deslizamentos horizontais. Sendo assim, o cálculo dos esforços e deformações fica mais complexo. Podem ser usados vários métodos diferentes para analisar o desempenho da estrutura, porém no contexto desta dissertação é a utilizado o método- γ , apresentado ao longo deste capítulo.

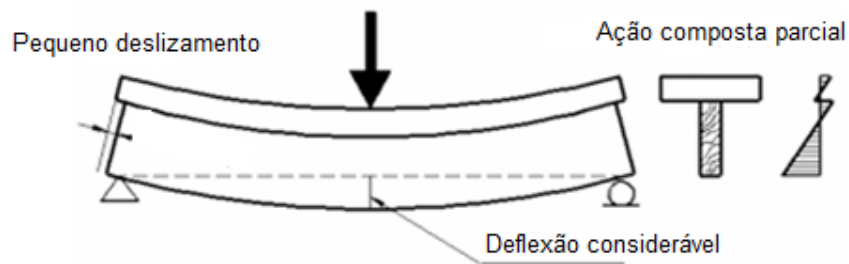


Figura 34 - Diagrama de tensões de uma estrutura mista com ligação deformável. Adaptado de [6]

O cálculo dos esforços internos e a deformação usando o método- γ é feito segundo o anexo B do Eurocódigo 5. Nele é apresentado um método simplificado de dimensionamento de vigas unidas mecanicamente, assumindo as seguintes condições:

- A viga é simplesmente apoiada.
- As camadas de madeira e betão têm ambas o comprimento total do vão.
- As camadas de madeira e betão estão ligadas por fixadores metálicos com comportamento elástico e um coeficiente de deslizamento k .
- A distância entre os fixadores metálicos é constante ou varia em função do esforço transversal atuante. A distância máxima só pode ser até quatro vezes maior que a distância mínima.
- A carga atua na direção z formando um momento M_x e um esforço transversal V_x .

Neste método, a eficiência da transferência de esforços é avaliada através de um coeficiente γ , que é considerado no cálculo da rigidez à flexão da estrutura. O método é indicado para o dimensionamento de sistemas simples como vigas de um único vão com cargas uniformemente distribuídas. É o único método que permite que a avaliação dos esforços seja realizada sem recurso a um software, podendo ser feita apenas com recurso a uma folha de cálculo, ou até mesmo à mão [28].

3.3.1. RIGIDEZ EFETIVA À FLEXÃO

Segundo o método- γ , a rigidez efetiva à flexão é dada pela seguinte equação:

$$(EI)_{\text{eff}} = E_1 I_1 + \gamma_1 E_1 A_1 a_1^2 + E_2 I_2 + E_2 A_2 a_2^2 \quad (10)$$

O índice 1 representa as grandezas associadas à camada de betão e o índice 2 às vigas de madeira.

A área da secção transversal (11) e o momento de inércia (12) são calculados da seguinte forma:

$$A_i = b_i h_i \quad (11)$$

$$I_i = \frac{b_i h_i^3}{12} \quad (12)$$

O fator compósito γ é calculado utilizando a seguinte equação (13). O valor deste fator varia entre 0 e 1, sendo que $\gamma = 0$ representa um sistema sem ligador e $\gamma = 1$ uma ligação totalmente composta sem deslizamento na interface entre a madeira e o betão.

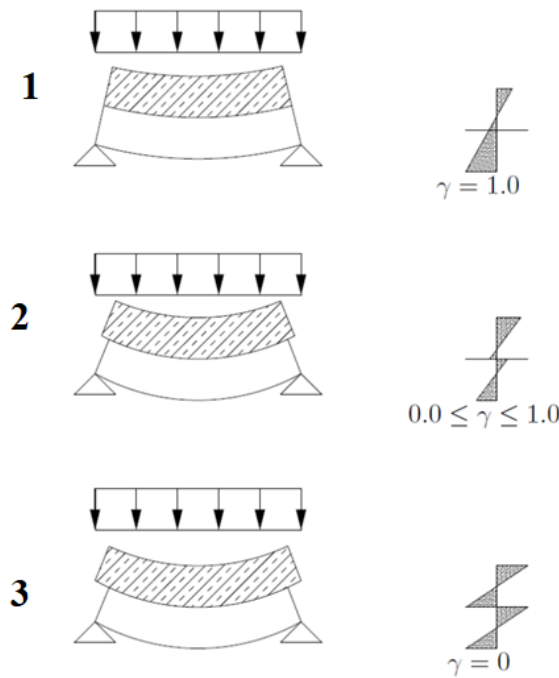


Figura 35 - Distribuição de tensões em sistemas de ligação com diferentes níveis de rigidez. Adaptado de [28]
1. Sistema rígido; 2. Sistema deformável; 3. Ausência de sistema de ligação.

Segundo o Eurocódigo 5, assume-se que o fator compósito da secção transversal de madeira tem o valor de 1, sendo apenas necessário calcular o fator compósito da secção transversal de betão.

$$\gamma_1 = \frac{1}{1 + (\pi^2 E_1 A_1 s / kL^2)} \quad (13)$$

A simbologia das equações enunciadas é a seguinte:

$(EI)_{\text{eff}}$ – Rigidez efetiva à flexão;

E_1 – Módulo de elasticidade do betão;

E_2 – Módulo de elasticidade da madeira;

I_1 – Momento de inércia da secção transversal de betão;

I_2 – Momento de inércia da secção transversal de madeira;

A_1 – Área da secção transversal de betão;

A_2 – Área da secção transversal de madeira;

a_1 – Distância entre o centroide da secção transversal de betão e o centroide da secção compósita;

a_2 – Distância entre o centroide da secção transversal de madeira e o centroide da secção compósita;

γ_1 – Fator compósito da secção transversal de betão;

b_i – Base da secção transversal do material, i ;

h_i – Altura da secção transversal do material, i .

s – Espaçamento entre ligadores;

k – Módulo de deslizamento do ligador;

L – Vão da viga.

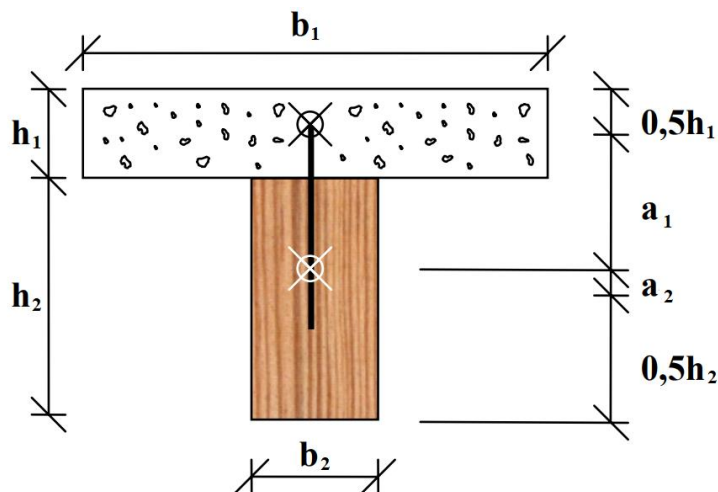


Figura 36 - Parâmetros da seção transversal do sistema composto madeira-betão. Adaptado de [26]

Segundo o anexo B do Eurocódigo 5 o valor de k varia consoante a verificação do estado limite. Nos estados limite últimos, k assume o valor de k_u , enquanto nos estados limite de utilização assume o valor de k_{ser} .

Segundo o Eurocódigo 5, k_{ser} varia consoante o tipo de ligador utilizado. Por se tratar de uma ligação madeira-betão o valor apresentado no Eurocódigo 5 deve ser multiplicado por dois, sendo este o valor final. O módulo de deslizamento k_u é calculado com a simples equação:

$$k_u = \frac{2}{3} k_{ser} \quad (14)$$

As distâncias a_1 e a_2 são obtidas com o uso das equações (15) e (16):

$$a_1 = \frac{h_1 + h_2}{2} - a_2 \quad (15)$$

$$a_2 = \frac{\gamma E_1 A_1 (h_1 + h_2)}{2\gamma E_1 A_1 + E_2 A_2} \quad (16)$$

3.3.2. ESTADOS LIMITE ÚLTIMOS

A verificação ao estado limite último é fundamental para garantir que a estrutura consegue suportar as cargas atuantes. Com a caracterização das propriedades físicas dos dois materiais, nomeadamente a resistência à compressão do betão e as resistências à tração e flexão da madeira, bem como os seus módulos de elasticidade, é possível avaliar a capacidade resistente da laje.

3.3.2.1. TENSÕES NORMAIS

O cálculo da rigidez efetiva à flexão permite obter a distribuição das tensões normais a atuar na secção, provocadas pelo momento fletor M . A tensão máxima em cada material é dada pelas seguintes equações:

$$\sigma_i = \frac{\gamma_i E_i a_i}{(EI)_{\text{eff}}} M \quad (17)$$

$$\sigma_{m,i} = \frac{0.5 E_i h_i}{(EI)_{\text{eff}}} M \quad (18)$$

Sendo σ_i a componente axial e $\sigma_{m,i}$ a componente devida à flexão das tensões normais em cada um dos materiais.

A verificação da secção transversal de uma estrutura mista madeira-betão é feita através da verificação da secção transversal de betão e da secção transversal de madeira separadamente.

A tensão na zona submetida à compressão deve ser inferior ao valor de cálculo da resistência à compressão do betão (f_{cd}) e a tensão na zona tracionada deve ser inferior ao valor de cálculo da resistência à tração do betão (f_{ctd}).

A verificação da tensão no topo (18) e na base da secção de betão (19) são apresentadas nas seguintes equações:

$$\sigma_{1,\text{topo}} = \sigma_1 + \sigma_{m,1} \leq f_{cd} \quad (19)$$

$$\sigma_{1,\text{base}} = \sigma_1 - \sigma_{m,1} \leq f_{ctd} \quad (20)$$

Como já referido nos princípios de dimensionamento, caso a equação (20) não seja cumprida, deve ser adicionada uma camada intermédia fictícia, não estrutural, que representa a fissuração do betão.

Para a verificação das tensões normais da secção transversal da madeira é necessário conhecer o valor de cálculo da resistência à tração na direção paralela às fibras, $f_{t,0,d}$ e o valor de cálculo da resistência à flexão, $f_{m,d}$ da madeira usada.

$$\frac{\sigma_2}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m2}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (21)$$

3.3.2.2. RESISTÊNCIA AO CORTE

Partindo do pressuposto que apenas a madeira suporta o esforço transversal, a tensão de corte máxima pode ser calculada da seguinte maneira:

$$\tau_{2,\text{max}} = \frac{0.5 E_2 h_2^2}{(EI)_{\text{eff}}} V \quad (22)$$

A verificação ao corte é garantida caso a tensão tangencial máxima seja menor ou igual ao valor de cálculo da resistência de corte da madeira, $f_{v,d}$.

$$\tau_{2,max} \leq f_{v,d} \quad (23)$$

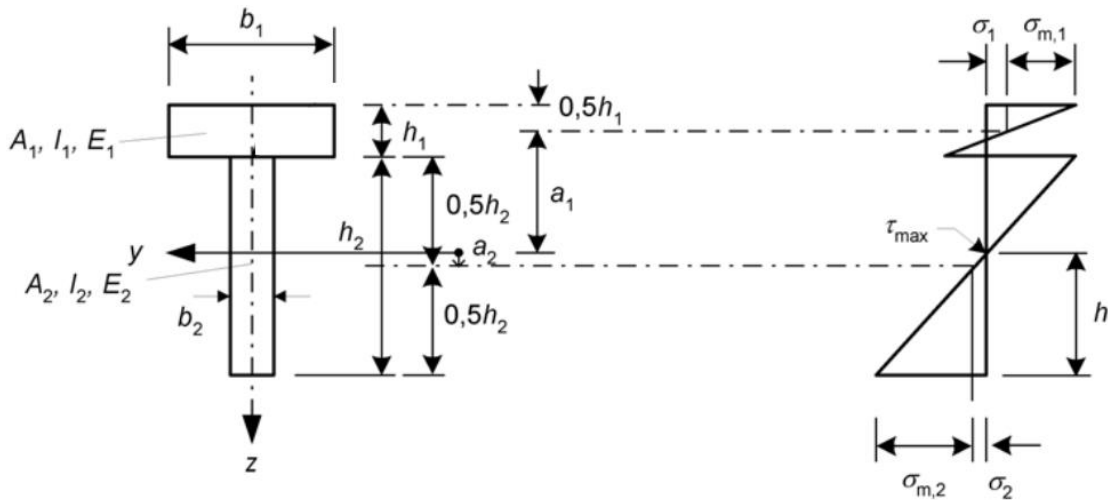


Figura 37 - Seção transversal e distribuição das tensões de flexão de um compósito madeira-betão [19]

3.3.2.3. FORÇA ATUANTE NO LIGADOR

Além das verificações nos materiais, também é necessário verificar a segurança do sistema de ligação.

O valor de cálculo da força aplicada no ligador é obtido com a fórmula apresentada na equação (24), em que V representa o valor do esforço transversal onde está localizado o ligador.

$$F_{v,Ed} = \frac{\gamma E_1 A_1 a_1 s}{(EI)_{eff}} V \quad (24)$$

Esta força deve ser inferior ao valor de cálculo da capacidade resistente da ligação ($F_{v,Rd}$). Mais à frente é demonstrado como é calculada a capacidade resistente da ligação para sistemas de ligação com recurso a entalhes.

3.3.3. ESTADOS LIMITE DE UTILIZAÇÃO

A verificação aos estados limite de utilização é importante para garantir que as estruturas mantêm a sua funcionalidade e conforto em condições de serviço. Nesta análise são calculadas as deflexões causadas pelas cargas de serviço e verificar se ultrapassam os limites aceitáveis para a utilização da estrutura.

A deflexão máxima sugerida pelo Eurocódigo 5 para vigas simplesmente apoiadas é dada em função do vão da estrutura (Tabela 18). O documento não define um valor exato que se deva adotar, apenas disponibiliza informação de um intervalo de valores que deve ser adotado, ficando para decisão do projetista considerar o valor que ache mais adequado.

Tabela 18 - Exemplos de valores limite para as deflexões de vigas [19]

	w_{inst}	$w_{net,fin}$	w_{fin}
Viga sobre dois apoios	$L/300$ a $L/500$	$L/250$ a $L/350$	$L/150$ a $L/300$

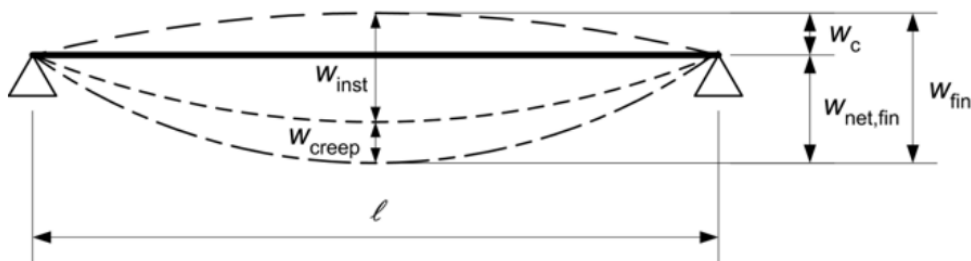


Figura 38 - Componentes da flecha [19]

Sendo:

w_{inst} – Flecha instantânea;

$w_{net,fin}$ – Flecha final efetiva;

w_{fin} – Flecha final;

w_c – Contraflecha (caso seja aplicada);

w_{creep} – Flecha devido ao efeito da fluência.

$$w_{net,fin} = w_{inst} + w_{creep} - w_c = w_{fin} - w_c \quad (25)$$

A flecha a meio vão é calculada utilizando a seguinte equação:

$$w = \frac{5qL^4}{384(EI)_{eff}} \quad (26)$$

Sendo q o valor de cálculo da combinação de ações atuante na estrutura e L o vão da laje. Como já referido nos princípios de dimensionamento, o valor de cálculo da combinação de ações varia consoante os estados limite que se pretende analisar. Além disso varia se a verificação da estrutura é a curto prazo ou a longo prazo.

A deformação final tem em conta os efeitos de deformação provocados por comportamentos a longo prazo como a fluência e a retração que são alvo de explicação mais à frente neste capítulo.

3.3.4. VERIFICAÇÕES A CURTO E LONGO PRAZO

Neste tipo de estruturas mistas o comportamento a longo prazo influencia a distribuição de tensões e a deformação devido ao diferente desempenho dos dois materiais face à fluência e mudanças de condições climáticas. Exemplificando, o betão é um material sensível a variações de temperatura, um aumento da temperatura poderá provocar uma expansão deste material e consequente migração de forças internas entre os dois materiais, provocando um aumento das tensões normais na madeira e da força atuante na ligação. A fluência também provoca uma redistribuição das tensões caso um material seja mais

suscetível a deformar-se por ação da mesma do que o outro. Desta forma, além de serem verificadas as condições acima expostas a curto prazo, ou seja, o momento em que a carga é aplicada na estrutura, também devem ser revistas a longo prazo.

As duas verificações usam as equações anteriormente referidas para os estados limite últimos e estados limite de utilização.

A verificação num ambiente a curto prazo é feita para o momento que a carga é aplicada, nomeadamente para um $t = 0$. Neste momento inicial a estrutura ainda não esteve sob o efeito de fluência, sendo assim o módulo de elasticidade a usar são os valores tabelados normalmente usados, no caso da madeira (E_{mean}) e no betão (E_{cm}) fornecidos pelos respetivos Eurocódigos e normas. O módulo de deslizamento a utilizar é o valor calculado segundo o Eurocódigo 5 e CEN/TS 19103 na verificação aos estados limite de utilização, e o valor calculado usando a equação (14) no caso da verificação aos estados limite últimos como referido anteriormente [5, 6].

Nas condições a longo prazo os módulos de elasticidade de cada material e o módulo de deslizamento têm de ser recalculados devido aos efeitos da fluência, mudanças climáticas e da retração do betão.

Segundo a Especificação Técnica CEN/TS 19103 [29], foi demonstrado que durante o período compreendido entre os primeiros três e sete anos, o betão deforma-se significativamente em comparação a madeira. Este fenómeno provoca uma alteração na relação entre a rigidez do betão e a da madeira e, sendo que a rigidez atrai forças, provoca um aumento das tensões na secção transversal da madeira e uma redução na camada de betão. Após este período, as deformações no betão devidas à fluência começam a ser bastante reduzidas. Desta forma, as tensões voltam lentamente a ser redistribuídas da madeira para o betão à medida que a madeira sofre deformações.

Posto isto, é possível concluir que o período entre os primeiros três e sete anos da estrutura é um momento crucial. Desta forma, o documento técnico CEN/TS 19103 aponta para que, além do estudo de dimensionamento para $t = \infty$, também seja tido em conta o período $t = 3 - 7a$.

As equações utilizadas são baseadas no método do módulo de elasticidade efetivo, que propõe uma redução dos módulos de elasticidade e deslizamento devido à fluência e à sorção do betão, da madeira e da ligação [6]. O documento técnico já referido anteriormente propôs que fosse adotada a metodologia usada nas estruturas mistas de betão e aço, ou seja, modificar os coeficientes de fluência dos materiais, obtidos pelos respetivos EC, por um fator ψ . O seguinte conjunto de equações são usadas para calcular os módulos de elasticidade do betão (27) e da madeira (28) e o módulo de deslizamento da ligação (29) para $t = \infty$ e $t = 3 - 7a$.

$$E_1(t) = \frac{E_1(t_0)}{1 + \psi_c(t)\varphi(t, t_0)} \quad (27)$$

Nesta equação $E_1(t_0)$ é o módulo de elasticidade do betão a curto prazo, $\psi_c(t)$ o fator de modificação do coeficiente de fluência do betão e $\varphi(t, t_0)$ é o coeficiente de fluência do betão fornecido pelo Eurocódigo 2 [25].

$$E_2(t) = \frac{E_{2,mean}}{1 + \psi_m(t)k_{def,m}} \quad (28)$$

Onde $E_{2,mean}$ é o módulo de elasticidade da madeira a curto prazo, $\psi_m(t)$ o fator de modificação da deformação por fluência da madeira e $k_{def,m}$ representa o fator de avaliação da deformação por fluência pelo Eurocódigo 5 [19].

$$k(t) = \frac{k_0}{1 + \psi_1(t)k_{\text{def},l}} \quad (29)$$

Sendo k_0 é o módulo de deslizamento do ligador a curto prazo, valor que varia consoante o estado limite analisado, como já referido. $\psi_1(t)$ é o fator de modificação da deformação por fluência da ligação e $k_{\text{def},l}$ representa o fator de avaliação da deformação por fluência que é calculado pela seguinte equação:

$$k_{\text{def},l} = 2 k_{\text{def},m} \quad (30)$$

Os valores dos fatores de modificação a usar são dados pela Tabela 19, fornecida pela especificação técnica [29]. O valor do fator de modificação no betão varia consoante o fator de fluência do betão e o fator de deformação da madeira.

Tabela 19 - Fatores de avaliação do coeficiente de fluência efetivo [35]

	Para $t=\infty$	Para $t=3-7a$
Betão com $\varphi = 3,5$:		
$k_{\text{def}} = 0,6$	$\Psi_c = 2,6 - 0,8\gamma_1^2$	$\Psi_c = 2,5 - \gamma_1^{1,1}$
$k_{\text{def}} = 0,8$	$\Psi_c = 2,3 - 0,5\gamma_1^{2,6}$	$\Psi_c = 2,2 - 0,8\gamma_1^{1,2}$
Betão com $\varphi = 2,5$:		
$k_{\text{def}} = 0,6$	$\Psi_c = 2,0 - 0,5\gamma_1^{1,9}$	$\Psi_c = 1,9 - 0,6\gamma_1^{1,1}$
$k_{\text{def}} = 0,8$	$\Psi_c = 1,8 - 0,3\gamma_1^{2,5}$	$\Psi_c = 1,7 - 0,5\gamma_1^{1,1}$
Madeira:		
Todos os casos	$\Psi_t = 1,0$	$\Psi_t = 0,5$
Ligação:		
Todos os casos	$\Psi_l = 1,0$	$\Psi_l = 0,5$

Notas: Para $t=0$, os fatores de modificação são todos 0;

Para valores de coeficientes de fluência do betão diferentes dos enunciados, fazer interpolação.

Calculados os novos módulos de elasticidade e deslizamento, o próximo passo é efetuar novamente a verificação aos estados limite últimos e estados limite de utilização.

O dimensionamento de lajes madeira-betão é resumido no seguinte diagrama.

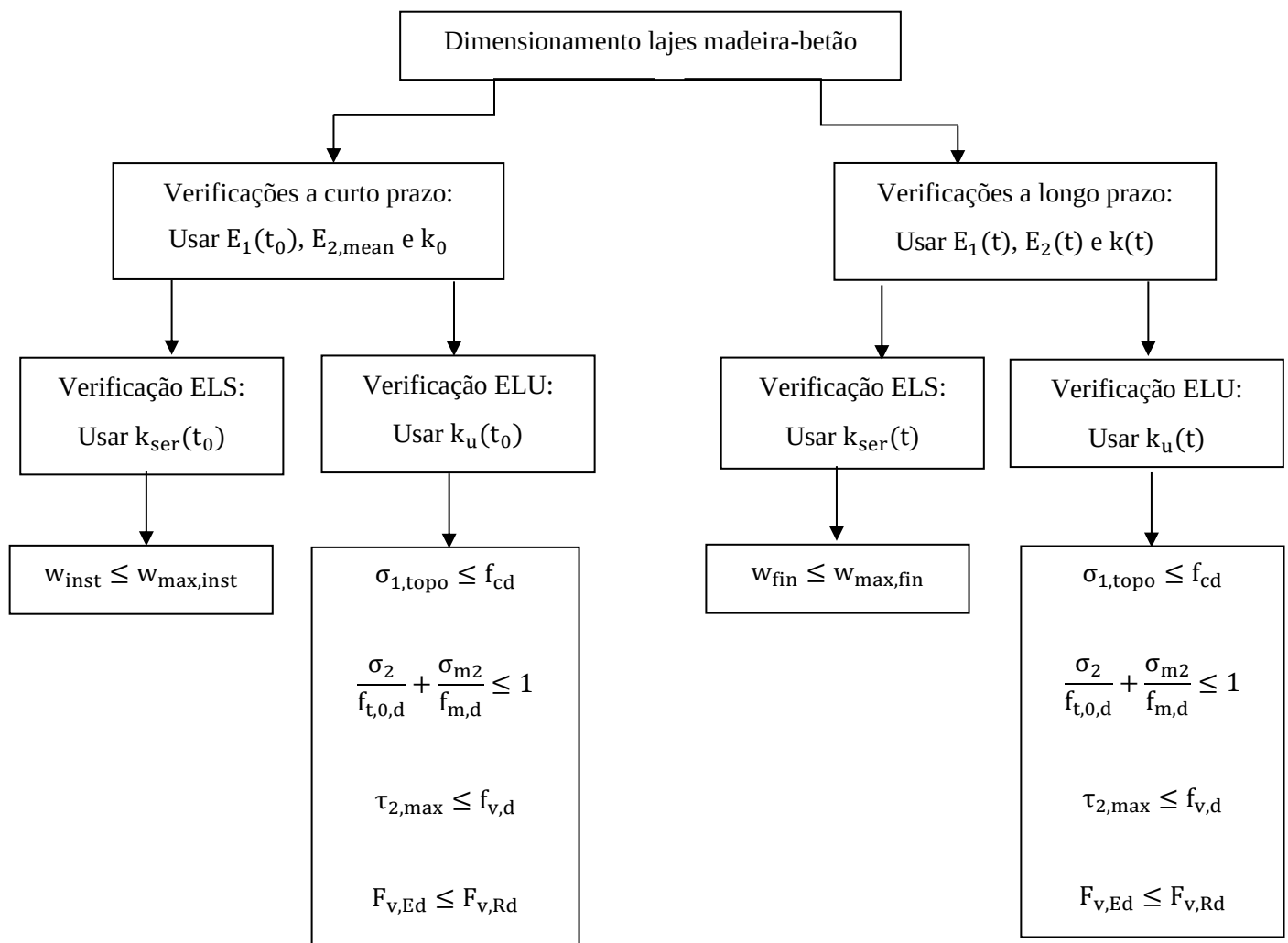


Figura 39 - Dimensionamento de lajes mistas madeira-betão

3.4. LIGAÇÕES COM ENTALHE

As ligações entalhadas são um tipo específico de conexão mecânica bastante utilizado para unir componentes de madeira e betão de forma eficiente e segura. Esta ligação consiste na abertura de um corte na madeira que é posteriormente preenchido com betão, o que proporciona uma maior resistência e rigidez à estrutura. Como já mencionado anteriormente, este tipo de ligação é das que apresenta maior rigidez e resistência.

Os entalhes normalmente utilizados são retangulares ou trapezoidais, no entanto podem ter formas triangulares ou redondas. O facto de os entalhes poderem ser pré-cortados, utilizando máquinas apropriadas para o fazer, permite uma redução do tempo de construção em obra porque as vigas já estão preparadas quando chegam ao local de construção, sendo assim uma solução rápida e económica [8].

Os possíveis modos de rotura deste tipo de ligação podem ser a rotura por corte na madeira ou no betão e o esmagamento localizado, também podendo acontecer nos dois materiais. A rotura por corte na madeira acontece junto à localização do entalhe e a melhor maneira para prevenir esta falha é deixando espaço suficiente entre os entalhes. Já no betão, esta ocorre devido a propagação de fendas provocadas normalmente pelo facto de ser um material pouco resistente à tração.

Este tipo de ligação apresenta pouca resistência na direção vertical da estrutura sendo assim suscetível ao arrancamento [20]. De forma a combater este problema e evitar os possíveis modos de rotura da estrutura, são normalmente utilizados fixadores metálicos como reforço aos entalhes (Figura 40).

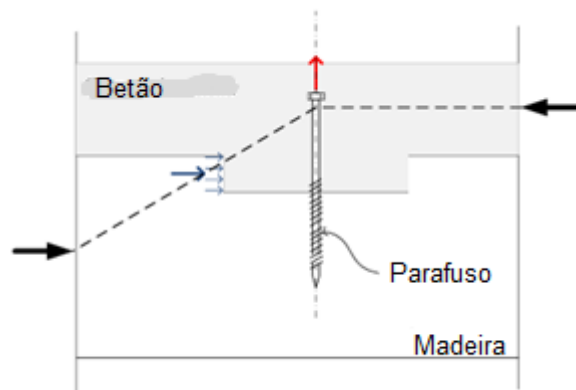


Figura 40 – Sistema de ligação com recurso a entalhes e ligador metálico para prevenir o arrancamento [36]

Aquando da utilização de entalhes em conjunto com ligadores metálicos, o uso de parafusos verticais como ligador adicional é a solução construtiva mais utilizada. Neste tipo de ligação o parafuso normalmente contribui apenas para a resistência às forças na direção vertical, garantindo que a força de elevação não provoca a separação entre a madeira e o betão, enquanto que o entalhe é o responsável pelo incremento da rigidez e da resistência ao corte [26, 36].

Além dos parafusos, podem ser usados outros ligadores metálicos como por exemplo, cavilhas ou varetas de aço. A posição destes ligadores no entalhe também pode variar (Figura 41).

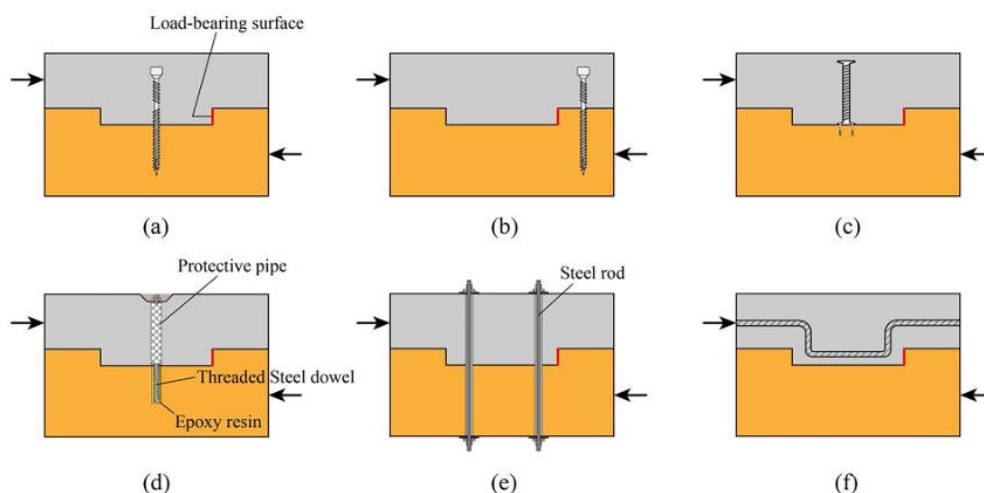


Figura 41 – Diferentes técnicas de reforço de entalhes [8]

As ligações entalhadas, quando reforçadas e projetadas corretamente, oferecem uma solução robusta e eficiente para pavimentos de madeira-betão. Elas combinam os benefícios da fabricação de precisão com as vantagens estruturais da ação composta entre a madeira e o betão. No entanto, é crucial resolver o problema de resistência na direção vertical.

O documento técnico CEN/TS 19103 apresenta restrições que devem ser aplicadas no dimensionamento de estruturas mistas madeira-betão com o uso de um sistema de ligação com entalhes. As restrições são as seguintes:

- Uso de betão de classe de resistência mínima C20/25 com grãos de diâmetro máximo de 16 milímetros.
- Uso de madeira com classe de resistência mínima C24 no caso de uso de madeira maciça de acordo com a EN 338. Classe de resistência mínima GL24 aquando da utilização de madeira lamelada colada (*glulam*) de acordo com a EN 14080.
- Profundidade do entalhe (h_n) mínima de 20 milímetros para construções com cargas baixas e de 30 milímetros para construções com cargas elevadas como pontes ou armazéns.
- Comprimento mínimo do entalhe (l_n) de 150 milímetros.
- Comprimento mínimo entre entalhes (l_s) de $12,5h_n$
- Comprimento mínimo da madeira em frente do entalhe (l_v) de $12,5h_n$
- Diâmetro do ligador metálico mínimo de 6 milímetros.
- Inclinação do entalhe limitada pelos seguintes valores:

$$80^\circ \leq \alpha \leq \min(115^\circ, 90^\circ + \Theta) \quad (31)$$

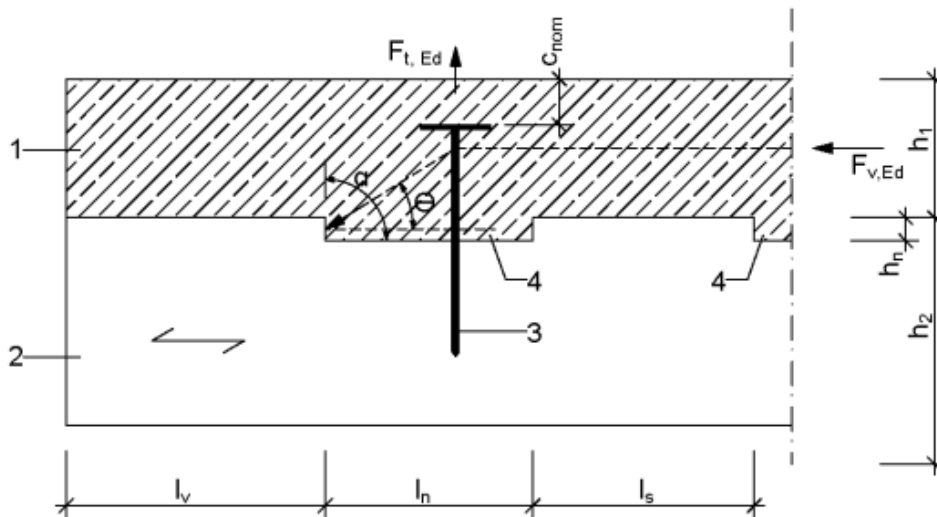


Figura 42 – Dimensões de um sistema de ligação entalhado [29]. Legenda: 1. Betão; 2. Madeira; 3. Ligador metálico; 4. Entalhe

Além das restrições mencionadas, o documento propõe que sejam adotados diferentes valores para definir o módulo de deslizamento de uma ligação com entalhe com base em dados experimentais sobre a rigidez deste tipo de ligação. Além disso, como apresenta um comportamento quase linear até a rotura, o documento propõe que não é necessário reduzir o valor do módulo de deslizamento numa análise ao ELU, ou seja, para uma ligação com entalhe, k_u assume o mesmo valor de k_{ser} .

No dimensionamento de uma ligação entalhada o valor do módulo de deslizamento a adotar é dado por:

$$k_{ser} = \begin{cases} 1000 \frac{\text{kN}}{\text{mm.m}} & \text{para } h_n = 20\text{mm} \\ 1500 \frac{\text{kN}}{\text{mm.m}} & \text{para } h_n \geq 30\text{mm} \end{cases} \quad (32)$$

Caso a profundidade do entalhe tenha um valor compreendido entre 20 e 30 milímetros, deve ser feita uma interpolação linear de maneira a obter o valor do modulo de deslizamento.

O valor de cálculo da capacidade resistente do sistema de ligação neste tipo de ligações é dado pelo menor valor calculado para os vários modos de rotura, sendo estes calculados pelas seguintes equações:

$$F_{v,Rd} = \min \begin{cases} f_{v,c,d} b_n l_n \\ f_{c,d} b_n h_n \\ f_{v,d} k_{cr} b_n l_{min} \\ f_{c,0,d} b_n h_n \end{cases} \quad (33)$$

A resistência de corte do betão $f_{v,c,d}$, é calculada pela seguinte equação:

$$f_{v,c,d} = \frac{v f_{c,d}}{\cot\theta + \tan\theta} \quad (34)$$

Em que o fator de redução v é dado por:

$$v = 0.6 \left(1 - \frac{f_{ck}}{250} \right) \quad (35)$$

Sendo:

k_{cr} - Fator de fendilhação definido pelo Eurocódigo 5;

b_n - Largura do entalhe;

l_n - Comprimento do entalhe;

l_{min} - Comprimento mínimo de corte. Tem o valor de $8h_n$;

$f_{c,d}$ - Valor de cálculo da resistência à compressão do betão;

$f_{c,0,d}$ - Valor de cálculo da resistência à compressão da madeira na direção paralela às fibras;

h_n - Profundidade do entalhe;

$f_{v,d}$ - Valor de cálculo da resistência ao corte da madeira;

l_v - Comprimento da madeira localizada em frente ao entalhe;

l_s - Comprimento da madeira entre entalhes;

θ - Inclinação da escora de compressão.

As equações presentes em (33) representam o valor de cálculo da capacidade resistente da ligação devido ao corte do betão, esmagamento do betão, corte da madeira e esmagamento da madeira, respetivamente.

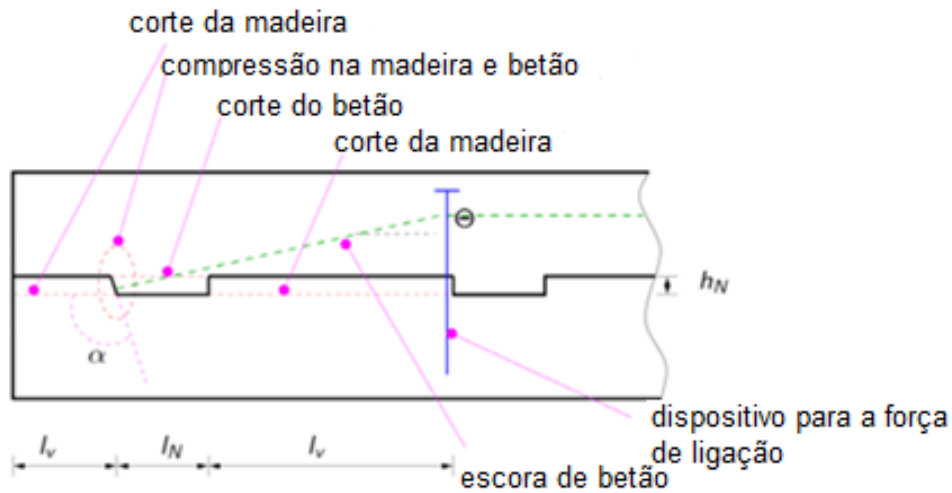


Figura 43 - Modos de rotura de uma estrutura mista madeira-betão com entalhe. Adaptado de [35]

Além dos modos de rotura mencionados, a força de elevação também tem de ser tida em conta. Segundo o documento técnico a força de elevação a considerar no dimensionamento depende da inclinação da escora de compressão. Por motivos de segurança e evitar a separação entre o betão e madeira, a força de elevação a considerar tem um valor mínimo de equivalente a 10% da força atuante no ligador.

$$F_{t,Ed} = \max \left\{ 0,10 F_{V,Ed} \right. \\ \left. F_{V,Ed} \tan \theta \right\} \quad (36)$$

A documentação apresenta também um valor mínimo da inclinação da escora a considerar, dado por:

$$\theta \geq \max \left\{ \arctan \left(\frac{h_n}{2(l_n + l_s)} \right) \right. \\ \left. \arctan \left(\frac{h_n}{l_n} \right) \right\} \quad (37)$$

4

FOLHA DE CÁLCULO DE APOIO AO DIMENSIONAMENTO

4.1. INTRODUÇÃO

O presente capítulo descreve o desenvolvimento e a estrutura de uma folha de cálculo, elaborada com recurso à ferramenta informática *Microsoft Excel*, para o apoio ao dimensionamento de lajes mistas de madeira-betão utilizando o método- γ , descrito no capítulo anterior. O objetivo principal deste programa é fornecer uma ferramenta prática e eficiente para engenheiros e projetistas, permitindo a análise e dimensionamento de lajes mistas com rapidez.

Com a introdução de alguns parâmetros, nomeadamente parâmetros geométricos e a escolha dos materiais a utilizar, de acordo com o projeto a analisar, o programa permite uma verificação instantânea da segurança da solução descrita.

O conteúdo presente no programa encontra-se dividido em 2 zonas. A primeira destina-se à inserção de dados de acordo com as necessidades do projeto e está organizada da seguinte forma:

- Geometria da laje;
- Cargas aplicadas;
- Propriedades – betão;
- Propriedades – madeira;
- Propriedades – ligação.

Nesta zona, encontram-se marcadas com a cor azul as células que precisam de ser preenchidas com dados do utilizador, enquanto, as restantes são preenchidas automaticamente com fórmulas programadas consoante os dados inseridos. Por exemplo, na primeira secção é pedido ao utilizador para inserir a altura e largura da camada de betão. O cálculo da área da camada de betão é automaticamente feito pelo programa visto que este resulta da multiplicação dos dois dados inseridos anteriormente. Desta forma é reduzido o trabalho do utilizador, tendo apenas de inserir os dados estritamente necessários para ser possível fazer uma análise da estrutura.

Na segunda zona do programa é feita a verificação de segurança da laje conforme os estados limites referidos em capítulos anteriores, para uma laje com as características inseridas na fase inicial. A segunda zona encontra-se organizada da seguinte maneira:

- Verificação a curto prazo
- Verificação a longo prazo ($t=3-7a$)
- Verificação a longo prazo ($t=\infty$)

4.2. SUBMISSÃO DE DADOS

4.2.1. GEOMETRIA DA LAJE

A primeira secção de inserção de dados é relativa a geometria da peça. É pedido ao utilizador que insira dados relativos à secção transversal da peça (altura e largura da camada de betão e das vigas de madeira), bem como o vão pretendido.

Caso o utilizador pretenda que exista uma camada intermédia entre a madeira e o betão também deve inserir os dados correspondentes a altura, largura e peso volúmico da camada adicional. Se não for pretendida uma camada intermédia, basta preencher os valores correspondentes com 0.

A área de cada material e a sua inércia são calculadas automaticamente conforme as equações (11) e (12), presentes no capítulo anterior.

A secção da geometria da laje é apresentada na Figura 44.

Geometria da laje		
Vão	5000	mm
Altura da camada de betão	60	mm
Largura da camada de betão	400	mm
Área de betão na secção transversal (mm ²)	24000	
Momento de Inércia da secção de betão (mm ⁴)	7,20E+06	
Altura das vigas de madeira	200	mm
Largura das vigas de madeira	150	mm
Área de madeira na secção transversal (mm ²)	30000	
Momento de Inércia da secção de madeira (mm ⁴)	1,00E+08	
Altura da camada intermédia	15	mm
Largura da camada intermédia	400	mm
Peso volúmico da camada intermédia	7	Kn/m ³

Figura 44 – Secção “Geometria da laje” da folha de cálculo

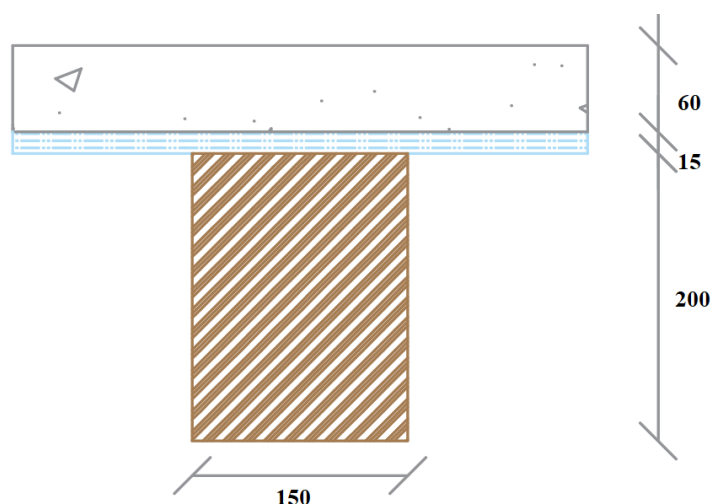


Figura 45 – Secção transversal da laje com os dados inseridos no exemplo da Figura 44

4.2.2. CARGAS APLICADAS

Na secção dedicada às cargas aplicadas na estrutura é pedido ao utilizador que insira dados relativos ao valor das cargas permanentes adicionais atuantes na estrutura. É também necessário que escolha a classe de serviço, a classe de duração e a categoria do edifício. A secção é apresentada na Figura 46.

Relativamente às cargas permanentes, o peso próprio está calculado automaticamente em Kn/m. O valor é definido em função do peso volúmico dos materiais escolhidos e da geometria da secção transversal de cada material (38). Utilizando como referência o Eurocódigo 1, o peso volúmico de cada material consoante a classe de resistência é apresentado na Tabela 20.

Deste modo, apenas é necessário que o utilizador insira o valor das cargas permanentes adicionais, como por exemplo, peso de paredes divisórias ou revestimentos.

A carga variável é dada automaticamente segundo as sobrecargas recomendadas pelo Eurocódigo 1 consoante a escolha da categoria do edifício, apresentadas em capítulos anteriores.

$$PP = h_1 b_1 \gamma_1 + h_2 b_2 \gamma_2 + h_{int} b_{int} \gamma_{int} \quad (38)$$

Tabela 20 - Peso volúmico dos materiais segundo Eurocódigo 1.

Material	Peso volúmico (Kn/m ³)
Madeira maciça	
C18	3,8
C22	4,1
C24	4,2
C27	4,5
C30	4,6
C35	4,8
Madeira lamelada colada	
GL24H	3,7
GL28H	4,0
GL32H	4,2
GL24C	3,5
GL28C	3,7
GL32C	4,0
Betão Normal	
Todas as classes	24

Cargas aplicadas	
Cargas Permanentes	
Peso próprio (Kn/m)	0,7
Carga permanente adicional	1 Kn/m ²
Cargas variáveis	
Sobrecarga (Kn/m)	1,2
Classe de serviço	1
Classe de duração	Média duração
Categoria do edifício	B
ψ ₀	0,7
ψ ₂	0,3
Fator de segurança parcial γ _g	1,35
Fator de segurança parcial γ _q	1,5
K _{def}	0,6
K _{mod}	0,8

Valor de cálculo	
ELU	Combinação Fundamental 3,3
ELS	Combinação Característica 2,3
	Combinação Quase permanente 1,5

Figura 46 - Secção “Cargas aplicadas” da folha de cálculo

As classes de serviço e duração, bem como a categoria do edifício são escolhidas dadas as respetivas listas, conforme o exemplo demonstrado pela Figura 47. Conforme já mencionado nos princípios de dimensionamento, a escolha destas opções condiciona os valores dos coeficientes de deformação e modificação k_{def} e k_{mod} , bem como os coeficientes de combinação de ações ψ_0 e ψ_2 .

Na parte inferior da secção são apresentados os valores de cálculo das diferentes combinações.

The image shows a software interface with a list of parameters on the left and a dropdown menu on the right. The parameters are: 'Classe de serviço' (set to 1), 'Classe de duração' (the dropdown menu is open), 'Categoria do edifício' (set to 0), and 'ψ0' (set to 2). The dropdown menu for 'Classe de duração' contains the following options: 'Média duração', 'Permanente', 'Longa duração', 'Média duração' (which is highlighted in blue), 'Curta duração', and 'Instantânea'.

Figura 47 - Lista disponível para a classe de duração das ações.

4.2.3. PROPRIEDADES DO BETÃO

A classe de resistência do betão e a fluência são escolhidas consoante a vontade do utilizador. A classe C20/25 é a classe de resistência mínima devido à restrição imposta às ligações entalhadas descrita no documento técnico CEN/TS 19103.

Após escolha da classe de resistência e do coeficiente de fluência do betão, são apresentadas as propriedades do betão selecionado, nomeadamente os módulos de elasticidade a curto e longo prazo, e valores de cálculo das propriedades resistentes.

Propriedades - betão	
Betão	
Classe de resistência	C25/30
Coeficiente de fluência	2,5
γ_c	1,5
α_{cc}	1
α_{ct}	1
Peso volúmico (Kn/m ³)	24
f_{ck} (Mpa)	25
f_{cd} (Mpa)	16,7
f_{ctd} (Mpa)	1,2
E_{cm} (Mpa)	31000
$E_{c,3-7}$ (Mpa)	6821
$E_{c,\infty}$ (Mpa)	6027
$\psi_{c(3-7a)}$	1,42
$\psi_{c(\infty)}$	1,66
$f_{v,c,d}$ (Mpa)	1,54

Figura 48 - Secção “Propriedades - Betão” do programa de cálculo

4.2.4. PROPRIEDADES DA MADEIRA

A secção relativa às propriedades da madeira é idêntica à do betão. O utilizador escolhe a classe de madeira a utilizar e são apresentadas as suas propriedades. O programa apresenta as opções de madeiras maciças e madeiras lameladas coladas de classe mínima de resistência C24 ou GL24 respetivamente.

Propriedades - madeira	
Madeira	
Classe de resistência	GL24H ▼
γ_m	1,25
Peso volúmico (Kn/m3)	3,7
$f_{m,k}$ (Mpa)	24
$f_{m,d}$ (Mpa)	15,4
$f_{t,0,k}$ (Mpa)	17
$f_{t,0,d}$ (Mpa)	10,6
$f_{v,k}$ (Mpa)	2,7
$f_{v,d}$ (Mpa)	1,7
$f_{c,0,k}$ (Mpa)	24
$f_{c,0,d}$ (Mpa)	15,4
K_{cr}	1,1
$E_{0,mean}$ (Mpa)	11600
$E_{m,3-7}$ (Mpa)	8923
$E_{m,\infty}$ (Mpa)	7250
$\Psi_{m(3-7a)}$	0,5
$\Psi_{m(\infty)}$	1

Figura 49 - Secção “Propriedades - Madeira” do programa de cálculo

4.2.5. PROPRIEDADES DA LIGAÇÃO

Na secção dedicada ao sistema de ligação é necessário definir qual o tipo de ligador que se pretende utilizar no dimensionamento da laje. Devido ao contexto desta dissertação, nesta folha de cálculo, apenas é possível escolher sistemas com entalhes devido a serem o principal alvo de estudo. Além disso, são um dos tipos de ligação com mais informação fornecida pelo Eurocódigo 5 e documento técnico da CEN.

Caso o utilizador pretenda um sistema de ligação com recurso a entalhes, é necessário definir os vários parâmetros geométricos associados, nomeadamente a profundidade, a largura, o comprimento e inclinação. A distância entre entalhes (s) é dada automaticamente visto que este valor é igual à soma do valor do comprimento do entalhe (l_n) com o valor do comprimento da madeira em frente do entalhe (l_s). Tal como nas secções dedicadas ao betão e a madeira, são apresentadas as propriedades do sistema de ligação.

São também apresentados ao utilizador os modos de rotura da secção segundo os princípios de dimensionamento mencionados em capítulo anteriores.

Além disso, é possível ver quais os limites de deformação da estrutura. Dado que o Eurocódigo 5 apenas apresenta um intervalo de limite razoável, na folha de cálculo admitiu-se como limites máximos as equações (42), (43) e (44). Porém, há possibilidade de o utilizador alterar consoante a sua necessidade.

$$w_{\text{inst}} \leq \frac{L}{300} \quad (39)$$

$$w_{\text{fin}} \leq \frac{L}{200} \quad (40)$$

$$w_{\text{net,fin}} \leq \frac{L}{250} \quad (41)$$

Propriedades - ligação		
Tipo de ligação	Entalhada	
Distância entre ligadores (mm)	300	
Profundidade do entalhe	20	mm
Largura do entalhe	400	mm
Comprimento do entalhe	100	mm
Comprimento de madeira em frente do entalhe	200	mm
Inclinação da escora	10	mm
Inclinação do entalhe	90	mm
Kser (N/mm)	400000	
Ku (N/mm)	400000	
K'def	1,2	
Kser,3-7 (N/mm)	224719	
Kser,∞ (N/mm)	181818	
ΨI(3-7a)	0,65	
ΨI(∞)	1	

Figura 50 - Secção “Propriedades - Ligação” do programa de cálculo

Modos de rotura e deformação máxima		
Falha (kN)		
Corte do betão	61,6	
Esmagamento do betão	133,3	
Corte da madeira	152,1	
Esmagamento da madeira	122,9	
Deformação máxima (mm)		
Contraflecha	0	mm
Instantânea	16,7	
Final	25,0	
Final efetiva	20	

Figura 51 - Modos de rotura e limite de deformação da laje entalhada

4.3. VERIFICAÇÃO DE SEGURANÇA

Após a introdução de todos os dados necessários para o dimensionamento da laje mista madeira-betão, é-lhe permitido verificar a segurança da estrutura face aos estados limite últimos e limites de utilização, de acordo com o método enunciado no capítulo anterior.

Esta zona do programa está dividida em três secções idênticas, sendo cada uma dedicada à verificação da estrutura para um valor temporal distinto, nomeadamente a curto e longo prazo, conforme mencionado várias vezes ao longo da dissertação. A verificação a longo prazo, para um período de tempo situado entre os primeiros 3 e 7 anos, não inclui a verificação aos estados limites de utilização, visto que não ser relevante para o dimensionamento.

Cada secção de verificação da segurança apresenta a configuração da Figura 52. São apresentados todos os cálculos intermédios que são realizados conforme o dimensionamento referido no capítulo 3, de forma que, seja permitido entregar ao utilizador a informação completa sobre a laje que pretende projetar.

Caso uma condição seja cumprida, de acordo com o diagrama da Figura 39 presente no capítulo anterior, a célula representativa dessa condição apresenta a cor verde, tal como se verifica no exemplo da Figura 52. Neste exemplo, todas as condições são cumpridas e desta forma, a verificação de segurança da laje é aceite.

Caso uma condição não se verifique, esta é apresentada com cor vermelha, o que significa que a segurança da estrutura não está verificada. A verificação na base da lajeta de betão é uma exceção, caso a tensão verificada na base seja superior ao valor de cálculo da resistência à tração do betão, a respetiva célula fica amarela, de forma a indicar ao utilizador que deve ter em conta a fendilhação do betão.

Verificação a curto prazo			
γ	0,82		
Rigidez efetiva à flexão (N.mm ²)	6,0E+12		
a1 (mm)	52,7		
a2 (mm)	92,3		
ELU			
Tensões Normais (Mpa)			
Betão			
σ_1	2,30		
$\sigma_{m,1}$	1,60		
$\sigma_{1,topo}$	3,90	<	16,7
$\sigma_{1,base}$	0,70	<	1,2
Madeira			
σ_2	1,84		
$\sigma_{m,2}$	1,99		
Resistência à tração			
	0,30	<	1
Verificação ao corte (Mpa)			
τ_{max}	0,32	<	1,7
Força no ligador (kN)			
F_d	13,3	<	61,6
ELS			
Deformação (mm)			
δ_{inst}	3,14	<	16,7

Figura 52 - Secção “Verificação a curto prazo” do programa de cálculo

ELU			
Tensões Normais (Mpa)			
Betão			
σ_1	9,41		
$\sigma_{m,1}$	6,53		
$\sigma_{1,topo}$	15,94	<	16,7
$\sigma_{1,base}$	2,87	<	1,2
Madeira			
σ_2	7,52		
$\sigma_{m,2}$	8,15		
Resistência à tração	1,24	<	1
Verificação ao corte (Mpa)			
τ_{max}	1,30	<	1,7
Força no ligador (kN)			
F_d	54,2	<	61,6
ELS			
Deformação (mm)			
δ_{inst}	13,38	<	16,7

Figura 53 - Exemplo de condições de segurança não cumpridas

5

COMPARAÇÃO DE SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS

5.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentado um estudo de uma solução construtivas de pavimento misto madeira-betão, pondo em prática o método- γ , detalhado no capítulo anterior. Tendo como referência o modelo CREE apresentado no capítulo 3, é feita uma avaliação de uma solução do tipo *flat slab*. Neste modelo, a secção de madeira tem a mesma largura que a camada de betão, o que permite reduzir a altura total de laje necessária, além de evitar que existam vigas de madeira salientes.

O principal objetivo é identificar as combinações ótimas de alturas de madeira e betão que resultem em uma solução estrutural eficiente e economicamente viável em cada caso de estudo. São apresentadas diferentes combinações de alturas de forma a encontrar quais permitem alcançar maiores vãos consoante a carga aplicada. São também avaliados outros fatores e demonstrada a influência que estes parâmetros têm no comportamento mecânico da estrutura.

Este estudo surge na sequência dos constrangimentos – já atrás salientados – decorrentes da solução corrente CREE. Embora o processo mais eficiente de conceção de um edifício CREE passe pelo desenvolvimento, em paralelo, da solução arquitetónica com a solução construtiva, nem sempre essa estratégia é seguida, surgindo, por vezes, situações em que um projeto-base de arquitetura é apresentado e se pretende desenvolver o projeto de execução em CREE.

Pelas características específicas do modelo CREE – com vigas de madeira aparentes com dimensão apreciável e surgindo com uma métrica relativamente apertada (é média, cerca de 1,50m) – a sua adaptação a distribuições de espaços de dimensões mais variáveis, como no caso da habitação, leva a situações esteticamente menos interessantes, com os alinhamentos de vigas desajustados dos alinhamentos de paredes. Obviamente que os grandes vãos possíveis são uma grande vantagem mas, em muitos casos, a conceção arquitetónica exige que as vigas sejam ocultadas, o que leva à necessidade de tetos falsos e ao aumento da distância piso a piso.

Assim, este capítulo explora as possibilidades de uma solução de teto liso, em que as vigas salientes são substituídas por uma camada de madeira como elemento de resistência à tração, realizando painéis de espessura constante. Serão apresentadas diversas possibilidades, de modo a poder dar uma orientação aos projetistas sobre a gama de vãos e espessuras de laje (e dos materiais) possíveis e necessários para os requisitos geométricos e de cargas que estejam em jogo.

5.2. PRINCÍPIOS DE ANÁLISE

Dado que os casos de estudo são baseados no modelo CREE, os pavimentos foram projetados conforme as dimensões utilizadas pela empresa, nomeadamente vãos entre 7,5 e 9 metros. Como sistema de ligação foram usados entalhes devido à sua elevada rigidez e por serem o recomendado para este tipo de estruturas.

Devido ao método de cálculo utilizado, admitiu-se que todas as estruturas projetadas são simplesmente apoiadas com um único vão e submetidas a uma carga uniformemente distribuída. Desta forma, os diagramas de momentos fletores e esforços transversos apresentam a configuração da Figura 54. De forma a ter em consideração o diferente comportamento do betão quando este se encontra fissurado, sempre que as tensões de tração no betão eram superiores ao valor de cálculo da resistência, era substituída a altura da camada que se encontrava fissurada por uma camada fictícia sem rigidez.

Não se considerou existência de uma camada intermédia, como por exemplo um isolamento, em nenhum estudo.

Admitiu-se que a contraflecha é nula em todos os casos de estudo. O valor da flecha final e o valor da flecha final efetiva são sempre iguais dado a contraflecha ter o valor de 0.

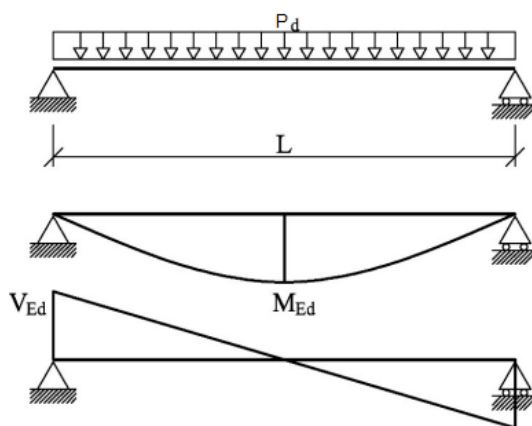


Figura 54 - Diagrama de momentos fletores e esforços transversos

Conforme já referido anteriormente, o valor de cálculo da carga uniformemente distribuída varia consoante as combinações de ações apresentadas pelas equações (2), (3) e (4) localizadas no capítulo 3, relativo aos princípios de dimensionamento de lajes mistas madeira-betão. O momento fletor máximo localiza-se a meio e é dado pela equação (42), enquanto o esforço transversal máximo é calculado pela equação (43).

$$M_{Ed} = \frac{P_d L^2}{8} \quad (42)$$

$$V_{Ed} = \frac{P_d L}{2} \quad (43)$$

5.3. CASO DE ESTUDO – MODELO FLAT SLAB

5.3.1. GEOMETRIA

O presente estudo centra-se na análise dos vãos máximos admissíveis por diferentes combinações de alturas de secção de madeira e de betão, em função das ações aplicadas na estrutura. A metodologia aplicada envolveu a variação sistemática dos valores de altura das secções de ambos os materiais, com o objetivo de determinar as combinações mais eficientes para a aplicação prática.

O estudo do modelo *flat slab* iniciou-se considerando uma altura total de laje de 220 milímetros onde foram registados quais os vãos máximos admissíveis para uma dada combinação de cargas aplicadas (peso próprio, sobrecarga e cargas permanentes adicionais), para diferentes combinações de alturas do painel de madeira e lajeta de betão. O processo repetiu-se para alturas totais de laje superiores até se alcançar vãos de cerca de 9 metros, visto ser o normalmente utilizado no modelo CREE. Foram analisadas 3 combinações diferentes para cada altura total analisada, considerando sempre que a secção de betão tinha no mínimo 50 milímetros de espessura.

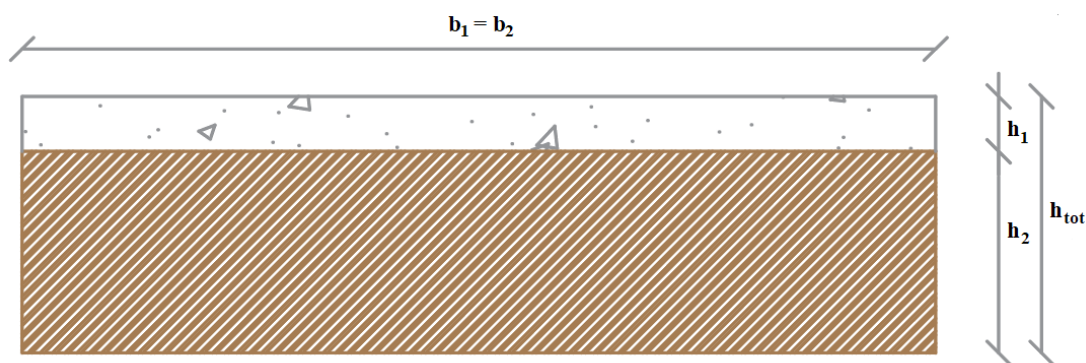


Figura 55 – Exemplo de secção transversal de um modelo *flat slab*

Por se tratar de uma *flat slab*, a largura da secção transversal da madeira (b_2) tem o mesmo valor da largura da secção transversal do betão (b_1). No modelo CREE, são normalmente utilizadas larguras entre os 2,5 e 3 metros, e dessa forma, o mesmo foi aplicado neste estudo.

Geometria da laje		
Vão	6800	mm
Altura da camada de betão	50	mm
Largura da camada de betão	2700	mm
Área de betão na secção transversal (mm ²)	135000	
Momento de Inércia da secção de betão (mm ⁴)	2,81E+07	
Altura das vigas de madeira	150	mm
Largura das vigas de madeira	2700	mm
Área de madeira na secção transversal (mm ²)	405000	
Momento de Inércia da secção de madeira (mm ⁴)	7,59E+08	
Altura da camada intermédia	0	mm
Largura da camada intermédia	0	mm
Peso volúmico da camada intermédia	0	Kn/m ³

Figura 56 - Parâmetros da geometria da laje (valores variáveis a amarelo)

5.3.2. CARGAS APLICADAS

Relativamente a cargas aplicadas, definiu-se que o projeto se inseria na categoria de utilização B, sendo assim admitida uma sobrecarga de valor 3kN/m^2 além do peso próprio da laje. Dado que o peso próprio é dado automaticamente pela folha de cálculo, a única variável relativa a cargas que foi alterada ao longo do estudo, foi o valor da carga permanente adicional.

Em relação as condições ambientais a que a estrutura estará exposta, admitiu-se a classe de serviço 1. A classe de duração escolhida foi a de media duração.

Cargas aplicadas	
Cargas Permanentes	
Peso próprio (Kn/m)	4,94
Carga permanente adicional	2 Kn/m ²
Cargas variáveis	
Sobrecarga (Kn/m)	8,1
Classe de serviço	1
Classe de duração	Média duração
Categoria do edifício	B
ψ_0	0,7
ψ_2	0,3
Fator de segurança parcial γ_g	1,35
Fator de segurança parcial γ_q	1,5
K_{def}	0,6
K_{mod}	0,8

Figura 57 - Parâmetros das cargas aplicadas (valores variáveis a amarelo)

5.3.3. MATERIAIS E SISTEMA DE LIGAÇÃO

Devido as características estruturais e aos processos de fabricação do CLT, este produto industrializado da madeira é o mais indicado para modelos *flat slab*. Ao contrário da madeira lamelada colada, o CLT é produzido sob a forma de grandes painéis com larguras que podem chegar aos 3 metros, o que facilita o processo de instalação. Além disso, a disposição cruzada das lamelas proporciona uma elevada resistência e rigidez bidirecional.

Dado que não existem normas que regulem classes de resistência para o CLT, admitiu-se que o produto industrializado tem as mesmas propriedades que as lamelas de madeira maciça que o compõe.

Para uma solução inicial, foram escolhidas lamelas de classe de resistência C24 e um betão de classe C25/30. Após obter os resultados da solução inicial, foram analisadas outras classes de resistência de maneira a demonstrar a influencia que este parâmetro tem no vão da estrutura. O coeficiente de fluência do betão adotado foi 2,5 e não foi alterado em nenhum momento.

Como já referido, como sistema de ligação utilizou-se entalhes devido a serem a ligação mais utilizada no modelo de referência. A profundidade do entalhe foi fixada em 20 milímetros, a inclinação do entalhe em 90° e a inclinação da escora em 10°.

Quando é utilizada o método- γ em sistemas de ligação entalhados, é recomendado que a distância entre entalhes não exceda 5% do valor do comprimento do vão. Desta forma, numa primeira fase o autor pensou em considerar que o comprimento do entalhe (l_n) e o comprimento da madeira em frente do entalhe (l_s) seriam ambos 2,5%. Dado que, a distância entre entalhes é a soma dos dois valores referidos, a distância fixava-se em 5% do vão. Porém, verificou-se que para alguns vãos não eram cumpridas as restrições impostas pelo documento técnico CEN/TS 19103, nomeadamente a obrigação de o comprimento do entalhe (l_n) ter o valor mínimo de 150 milímetros e de o comprimento da madeira em frente do entalhe (l_s) necessitar de cumprir a equação (44).

$$l_v \geq 12,5 h_n \quad (44)$$

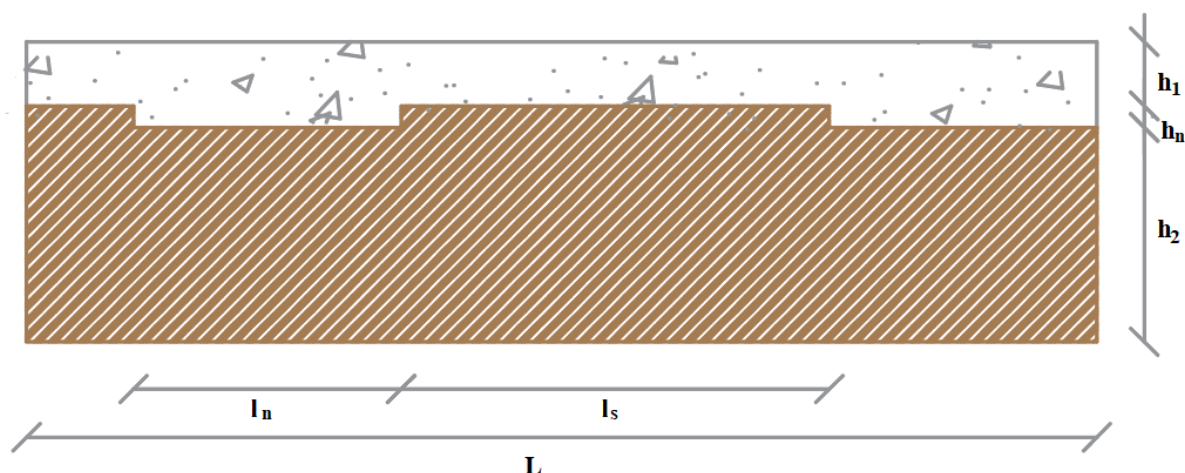


Figura 58 – Exemplo de secção longitudinal de um modelo *flat slab*

Sendo que a profundidade do entalhe (h_n) teve o valor de 20 milímetros durante todo o processo, o valor de l_v mínimo para o estudo seria 250 milímetros. Desta forma, optou-se por adotar que os valores de l_n e l_v seriam os valores mínimos enunciados e mantiveram-se inalteráveis durante o estudo inteiro.

Numa análise inicial, admitiu-se que o valor da largura do entalhe (b_n) apresenta o mesmo valor que a largura da secção transversal. Tal como a classe de resistência da madeira e a classe de resistência de betão, este parâmetro foi posteriormente alterado de forma a verificar a sua influência no vão da estrutura.

Por motivos de simplificação não foi analisado o comportamento do ligador metálico nos entalhes. Admitiu-se que deve ser escolhido posteriormente conforme a necessidade.

Propriedades - ligação		
Tipo de ligação	Entalhada ▼	
Distância entre ligadores (mm)	400	
Profundidade do entalhe	20	mm
Largura do entalhe	2700	mm
Comprimento do entalhe	150	mm
Comprimento de madeira em frente do entalhe	250	mm
Inclinação da escora	10	mm
Inclinação do entalhe	90	mm

Figura 59 - Parâmetros do sistema de ligação (valores variáveis a amarelo)

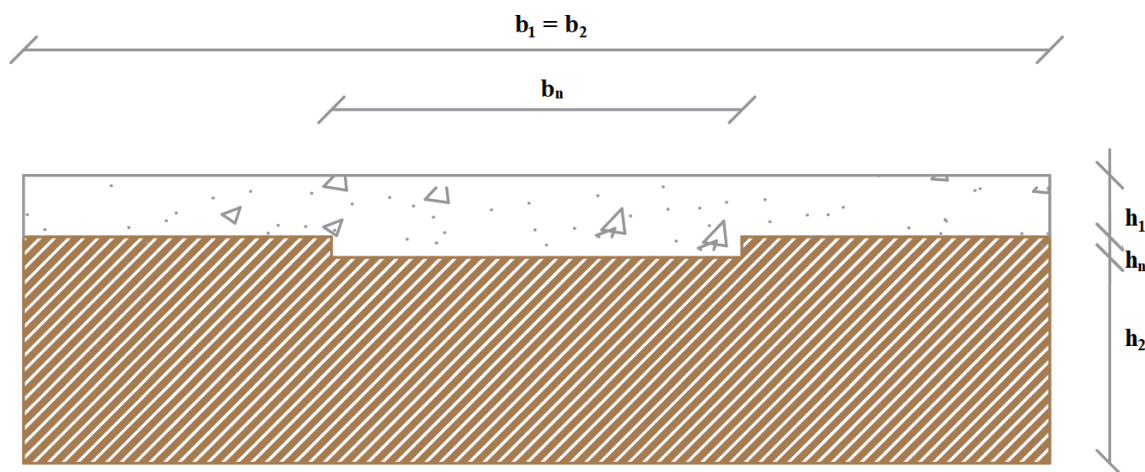


Figura 60 – Exemplo de secção transversal a meio vão de um modelo flat slab

5.3.4. RESULTADOS OBTIDOS

De forma a ter uma comparação que tivesse em conta a diferença de peso volúmico entre a madeira e o betão, os gráficos apresentados ao longo deste capítulo mostram informação sobre quais os vãos máximos admitidos para cada altura de laje em função das cargas aplicadas excluindo o peso próprio, ou seja, apenas a sobrecarga de 3 kN/m² definida pela categoria do edifício e a carga permanente adicional.

Para cada valor de espessura total de laje, foram registados os vãos máximos admissíveis para 3 combinações diferentes de espessuras de madeira e betão e verificou-se que, a combinação em que a espessura de betão tem o valor do mínimo exigido pelas normas (50 milímetros), é a combinação que permite maiores vãos para um dado valor de espessura total de laje. Um aumento da altura da camada de betão e consequente diminuição da de madeira diminui a capacidade resistente da laje.

Os resultados obtidos não diferem com a variação da largura da estrutura.

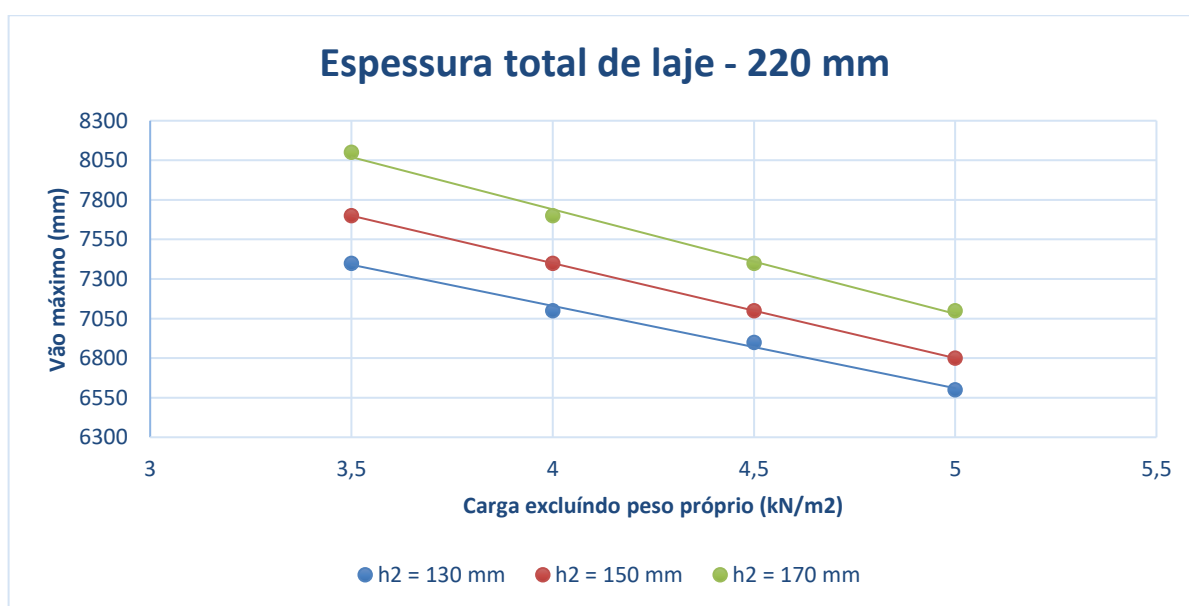
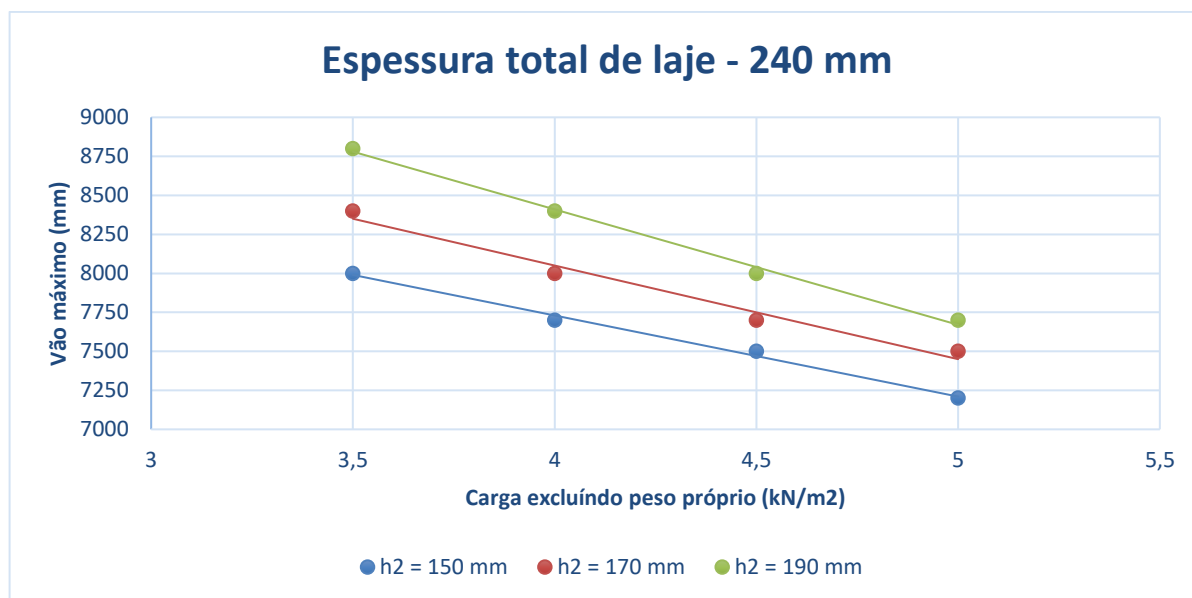
Figura 61 - Vão em função da carga aplicada numa laje *flat slab* de espessura total 220 milímetros

Tabela 21 - Vão em função da carga aplicada numa laje *flat slab* de espessura total 220 milímetros

h ₁ (mm)	h ₂ (mm)	Carga sem PP (kN/m2)	Vão máximo (mm)	Critério limitador	Critério limitador sem deflexão	
50	170	3,5	8100	Flecha final	Betão curto prazo	
		4	7700			
		4,5	7400			
		5	7100			
70	150	3,5	7700		Madeira 3-7 anos	
		4	7400			
		4,5	7100			
		5	6800			
90*	130	3,5	7400			
		4	7100			
		4,5	6900			
		5	6600			
*Fendilhação na base do betão de cerca de 1 milímetro						

Com os resultados da Figura 61 é visível que a solução constituída por um painel de madeira com 170 milímetros e uma camada de betão com 50 milímetros de espessura é a que permite um maior vão para um dado valor de carga aplicada. O aumento da espessura de betão e consequente diminuição da espessura de madeira reduz a capacidade da laje. Tal acontece devido ao facto de o critério limitador, ou seja, a primeira condição que deixa de ser verificada, ser a flecha máxima final em todos os casos. Como o peso volúmico do betão é muito superior ao da madeira, ao substituir 20 milímetros de altura de madeira por 20 milímetros de betão, o peso próprio da estrutura aumenta e consequentemente a deflexão para um dado valor de cargas adicionais.

Os gráficos relativos a espessuras totais de laje de 240 e 260 milímetros são idênticos ao gráfico de uma laje com 220 milímetros. Dado que o critério de limitação continua a ser a flecha final, um aumento da espessura de betão e consequente diminuição do painel de madeira, resulta em maiores deformações. Um aumento da espessura de betão em relação à espessura de madeira é apenas vantajoso caso o critério de limitação seja o comportamento do betão.

Figura 62 - Vão em função da carga aplicada numa laje *flat slab* de espessura total 240 milímetrosTabela 22 - Vão em função da carga aplicada numa laje *flat slab* de espessura total 240 milímetros

h_1 (mm)	h_2 (mm)	Carga sem PP (kN/m²)	Vão máximo (mm)	Critério limitador	Critério limitador sem deflexão
50	190	3,5	8800	Betão curto prazo	
		4	8400		
		4,5	8000		
		5	7700		
70	170	3,5	8400	Flecha final	
		4	8000		
		4,5	7700		
		5	7500		
90	150	3,5	8000	Madeira 3-7 anos	
		4	7700		
		4,5	7500		
		5	7200		

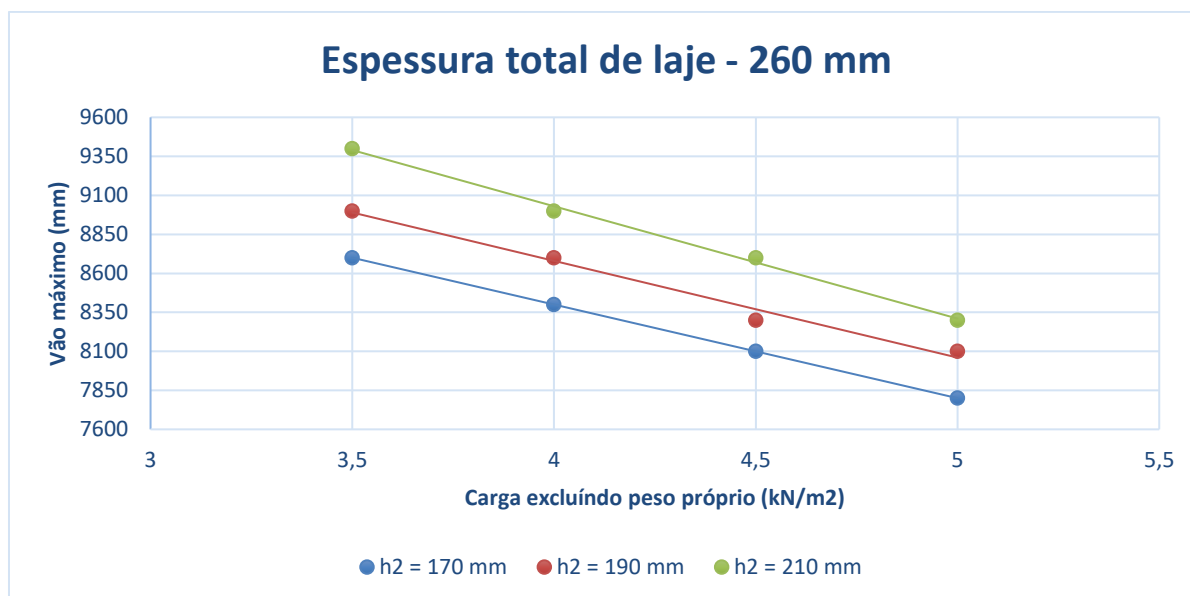


Figura 63 - Vão em função da carga aplicada numa laje *flat slab* de espessura total 260 milímetros

Tabela 23 - Vão em função da carga aplicada numa laje *flat slab* de espessura total 260 milímetros

h_1 (mm)	h_2 (mm)	Carga sem PP (kN/m²)	Vão máximo (mm)	Critério limitador	Critério limitador sem deflexão
50	210	3,5	9400	Flecha final	Betão curto prazo
		4	9000		
		4,5	8700		
		5	8300		
70	190	3,5	9000	Flecha final	Madeira 3-7 anos
		4	8700		
		4,5	8300		
		5	8100		
90	170	3,5	8700	Flecha final	Madeira 3-7 anos
		4	8400		
		4,5	8100		
		5	7800		

Com a análise dos 3 gráficos, é possível verificar que um aumento da espessura total da laje proporciona um aumento do vão máximo. Para um valor de carga adicional de 4 kN/m^2 , o vão máximo admitido por uma laje de 220 milímetros é cerca de 7,7 metros, para uma laje de 240 é 8,4 metros e para 260 o valor do vão é 9 metros.

A Figura 61 apresenta um gráfico do vão máximo em função da espessura da laje. É possível verificar que o aumento é linear, um aumento de 20 milímetros de espessura total proporciona um aumento de cerca de 0,7 metros no vão máximo admissível.

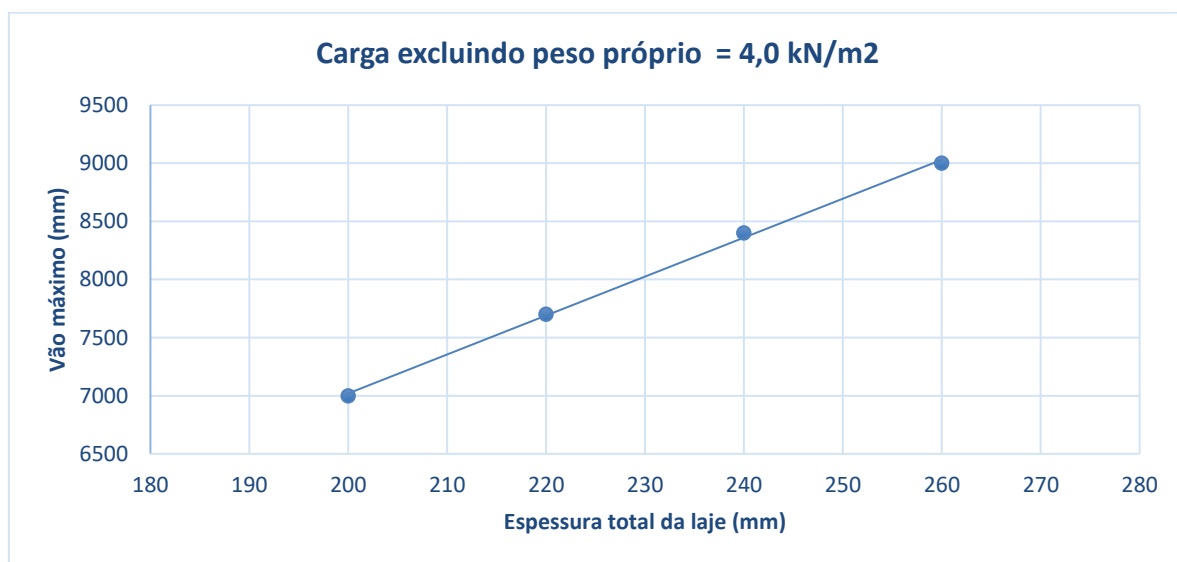


Figura 64 - Vão máximo em função da espessura total de uma laje mista madeira-betão

5.3.5. INFLUÊNCIA DA ALTERAÇÃO DE PARÂMETROS DE DIMENSIONAMENTO

Alguns parâmetros de dimensionamento foram alvo de estudo de forma a avaliar a sua influência no valor do vão máximo admissível. O objeto de estudo foi a laje de espessura total 220 milímetros, sendo 50 relativos à camada de betão e os restantes à madeira, para um valor de carga excluindo o peso próprio de 4 kN/m^2 (Figura 61 e Tabela 21).

Os parâmetros de dimensionamento analisados foram:

- Classe de resistência da madeira
- Classe de resistência do betão
- Largura do entalhe

De acordo com a Tabela 21, o vão máximo admissível para uma laje com as características mencionadas é de 7,7 metros, considerando madeira da classe C24, betão C25/30 e largura do entalhe igual à largura do compósito.

5.3.5.1. Classe de resistência da madeira

De forma a estudar a influência da classe de resistência da madeira, todos os parâmetros mencionados foram fixados, com exceção da classe de madeira. Foram registados os vãos máximos admissíveis para cada classe.

Tabela 24 - Variação do vão máximo em função da classe de madeira utilizada

Classe de madeira	Vão máximo (mm)	Critério limitador
C24	7700	Flecha final
C27	7800	
C30	7800	

Com os resultados da Tabela 24 é possível constatar que o aumento da classe de resistência pouco influencia o vão máximo admissível para a laje mista em questão. Tal acontece devido ao critério limitador ser a flecha final. Um aumento da classe de resistência da madeira poderia ser vantajoso caso o critério limitador fosse a madeira, como tal não acontece, esse aumento não é justificável.

5.3.5.2. Classe de resistência do betão

O estudo da classe de resistência do betão foi idêntico ao da madeira. Tal como a classe de madeira, um aumento da classe de betão não é justificável devido ao critério limitador.

Tabela 25 - Variação do vão máximo em função da classe de betão utilizada

Classe de betão	Vão máximo (mm)	Critério limitador
C25/30	7700	Flecha final
C30/37	7800	
C35/45	7800	
C40/50	7800	

5.3.5.3. Largura do entalhe

Tal como referido anteriormente neste capítulo, o estudo inicial foi elaborado adotando um valor de largura do entalhe igual à largura total da estrutura. De forma a avaliar a influência que este parâmetro tem no vão admissível, fixou-se todos os parâmetros de dimensionamento e fez-se variar o valor da largura do entalhe. O valor do parâmetro é dado em função da largura total da laje.

Os resultados da Tabela 26 mostram que quando o critério limitador é a força na ligação, um aumento da largura no entalhe é vantajoso e permite aumentar o vão admissível. É possível verificar que para valores acima de 40% da largura total, o aumento da largura do entalhe é quase irrelevante.

É então possível concluir que para o caso analisado, a largura do entalhe deve ser no mínimo 40% da largura total, de forma a incrementar ao máximo a capacidade resistente da laje mista madeira-betão.

Tabela 26 - Variação do vão máximo em função da largura do entalhe

Largura do entalhe	Vão máximo (mm)	Critério limitador
0,10 b_{tot}	3800	Força na ligação
0,20 b_{tot}	5200	
0,30 b_{tot}	7100	
0,40 b_{tot}	7600	
0,50 b_{tot}	7600	
0,60 b_{tot}	7600	Flecha final
0,70 b_{tot}	7700	
0,80 b_{tot}	7700	
0,90 b_{tot}	7700	
b_{tot}	7700	

5.4. COMPARAÇÃO COM MODELO STANDARD

De forma a comparar o modelo *flat slab*, previamente desenvolvido, com o modelo de laje normalmente utilizado no sistema LCT da CREE, procedeu-se ao estudo de uma laje em que a secção de madeira é composta por vigas. Tal como no estudo de um modelo *flat slab*, foram analisadas diferentes combinações de espessuras (madeira e betão) de forma a encontrar a combinação que permite alcançar um maior vão. Além disso, também foi analisado o valor do vão máximo em função da espessura total de laje.

A nível económico foi feita uma comparação direta dos custos associados aos materiais, de um painel de laje de dimensões 2,7x8,1m com recurso aos diferentes modelos.

5.4.1. ANÁLISE ESTRUTURAL

5.4.1.1. Resultados obtidos – Modelo Standard

O estudo de um modelo composto por vigas de madeira sob uma camada de betão foi feito segundo os mesmos princípios do estudo do modelo *flat slab*. Naturalmente, o valor da largura da secção de madeira em relação à largura da secção de betão é diferente devido ao modelo implicar essa condição. No entanto, de forma a ter uma comparação adequada, foram mantidos os mesmos parâmetros relativos às cargas aplicadas e propriedades do sistema de ligação.

Ao contrário do modelo *flat slab*, o uso de CLT não é adequado para um modelo composto por vigas. Desta forma, a solução inicial foi projetada com o uso de madeira lamelada colada (*Glulam*) de classe GL24H visto ser o tipo de madeira utilizada no sistema CREE. Posteriormente foi analisada a influência da alteração da classe de resistência e o uso de vigas de madeira maciça em vez de *Glulam*.

Como exemplo de objeto de estudo de um modelo típico, considerou-se uma estrutura com uma secção transversal com as dimensões apresentadas na Figura 65. Ao contrário do modelo *flat slab* em que a largura da secção da madeira e de betão têm o mesmo valor, neste modelo considerou-se que a secção

da madeira totaliza uma largura de 500 milímetros enquanto a camada de betão apresenta uma largura de 1350 milímetros. Sendo que, o valor da largura da secção de betão representa o espaçamento entre vigas.

Naturalmente, quanto menor for o espaçamento entre vigas considerado ou quanto maior for a largura da secção de madeira admitida, maior será a capacidade resistente da laje.

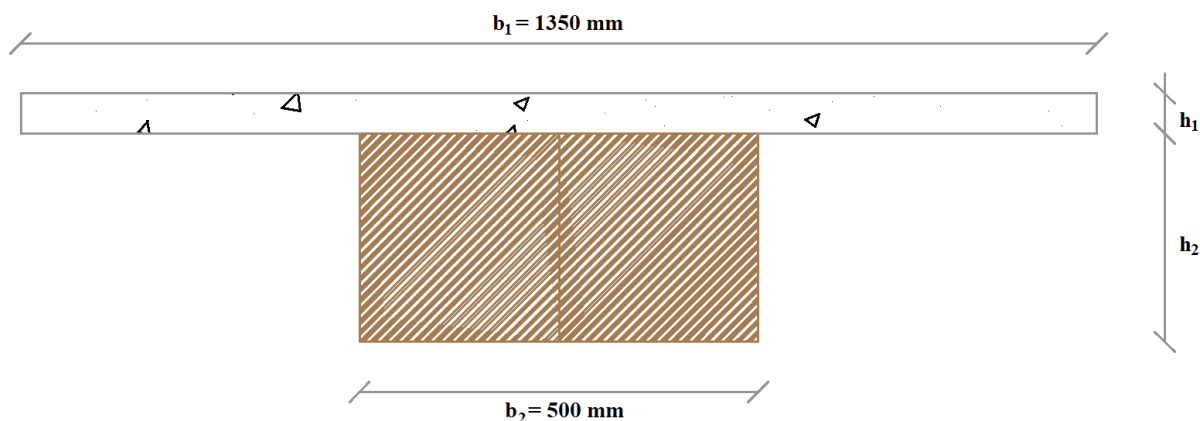


Figura 65 - Exemplo de secção transversal de um modelo composto por vigas

A altura total de laje inicialmente analisada teve a espessura total de 260 milímetros. Tal como no estudo do modelo *flat slab*, o maior vão admissível para um certo valor de espessura total de laje foi dado pela combinação em que o valor da espessura de betão era o mínimo exigido pelas normas. Como enunciado anteriormente, tal acontece devido ao critério limitador ser a flecha máxima.

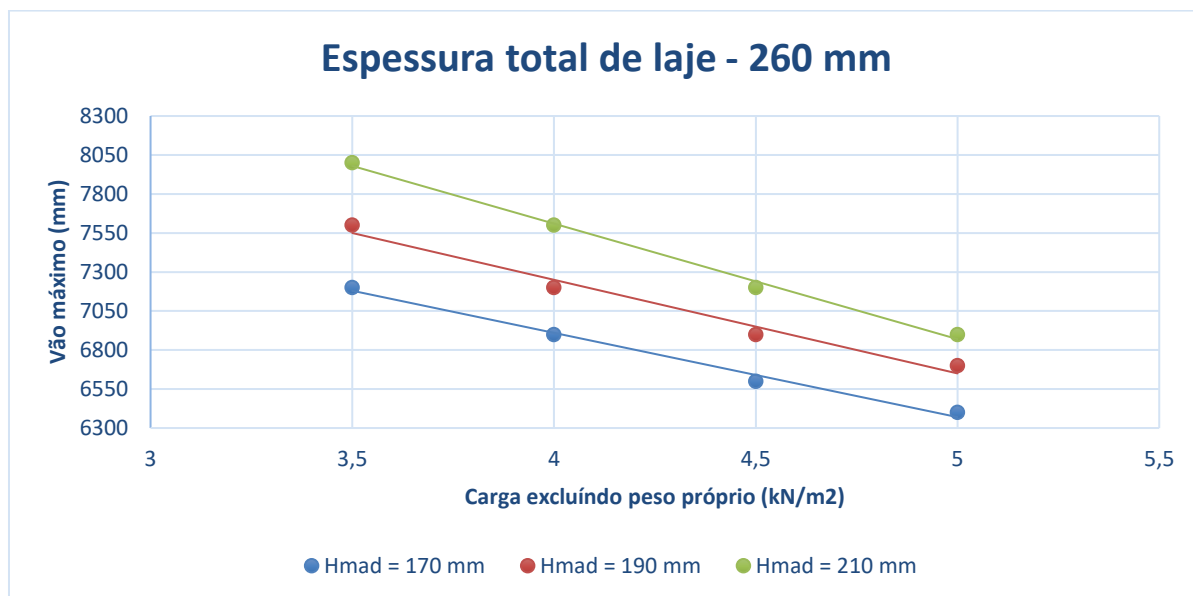


Figura 66 - Vão em função da carga aplicada numa laje típica madeira-betão de espessura total 260 milímetros

Tabela 27 - Vão em função da carga aplicada numa laje standard madeira-betão de espessura total 260 milímetros

h ₁ (mm)	h ₂ (mm)	Carga sem PP (kN/m2)	Vão máximo (mm)	Critério limitador	Critério limitador sem deflexão
50	210	3,5	8000	Flecha final	Madeira 3-7 anos
		4	7600		
		4,5	7200		
		5	6900		
70	190	3,5	7600		
		4	7200		
		4,5	6900		
		5	6700		
90	170	3,5	7200		
		4	6900		
		4,5	6600		
		5	6400		
*Fendilhação na base do betão de cerca de 15 milímetros					

A Figura 67 apresenta a variação do vão máximo em função da espessura total da laje de um modelo composto por vigas para um valor de carga adicional (excluindo peso próprio) de 4 kN/m². Identicamente ao modelo *flat slab* analisado é possível verificar que o aumento é linear.

A grande diferença entre os dois modelos consiste no valor mínimo necessário de espessura total de laje para se conseguir alcançar um certo vão. Uma laje de espessura 260 milímetros configurada com o modelo standard analisado permite alcançar um vão de 7,6 metros, enquanto que, a mesma espessura de laje total, mas com a configuração *flat slab*, permite vãos de 9 metros.

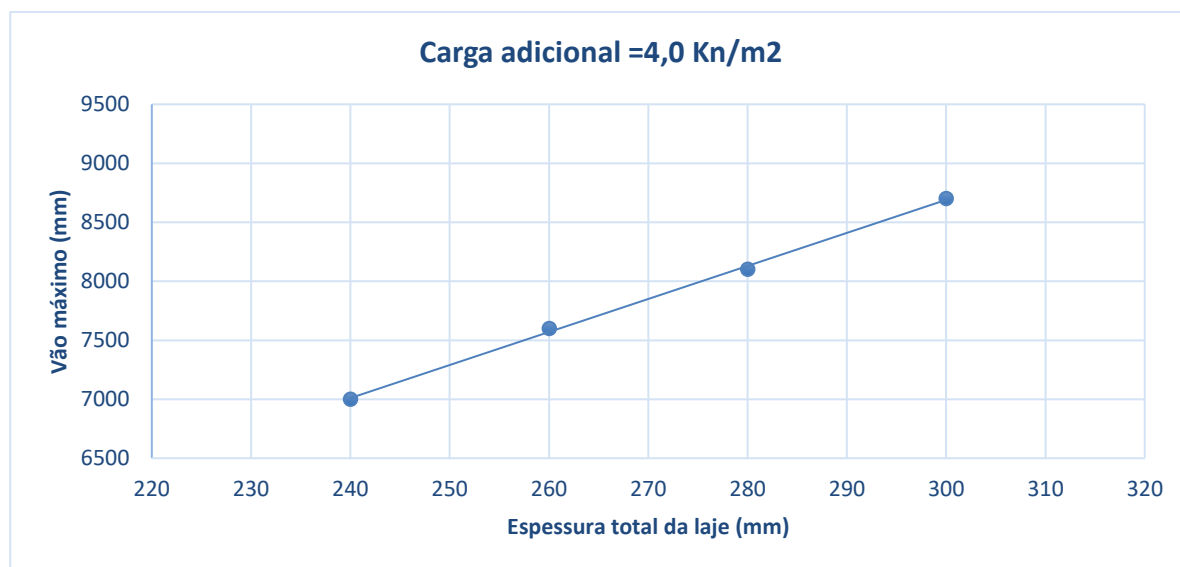


Figura 67 - Vão máximo em função da espessura total de uma laje standard madeira-betão

5.4.1.2. Influência da alteração de parâmetros de dimensionamento – Modelo Standard

O estudo da influência dos parâmetros realizado para o modelo standard foi em tudo semelhante ao estudo do modelo anterior. Fixando todos os parâmetros com exceção do parâmetro a analisar, foram registados os vãos máximos admissíveis para cada alteração do parâmetro.

A Tabela 28 demonstra que, o aumento da classe de resistência da madeira lamelada colada é pouco vantajoso devido ao critério limitador. Além disso, é possível verificar que o uso de madeira maciça em vez de madeira lamelada colada diminui a capacidade resistente da laje.

Tabela 28 - Variação do vão máximo em função da classe de madeira utilizada

Classe de madeira	Vão máximo (mm)	Critério limitador
Madeira lamelada colada (<i>Glulam</i>)		
GL24H	8100	Flecha final
GL28H	8300	
GL32H	8400	
Madeira maciça		
C24	8000	Madeira 3-7 anos
C27	8100	Flecha final
C30	8100	

Tal como no primeiro estudo, o aumento da classe de resistência do betão pouco influencia o vão máximo admissível da laje.

Tabela 29 - Variação do vão máximo em função da classe de betão utilizada

Classe de betão	Vão máximo (mm)	Critério limitador
C25/30	8100	Flecha final
C30/37	8200	
C35/45	8200	
C40/50	8200	

A largura do entalhe em função da largura total da secção de madeira num sistema composto por vigas, apresenta maior influência no vão máximo que num sistema *flat slab*. Pela Tabela 30 podemos verificar que apenas quando a largura do entalhe é superior a 90% da largura total da secção de madeira, é que o critério limitador deixa de ser a força na ligação, enquanto no modelo *flat slab*, tal acontece para valores superiores a 40%.

Tabela 30 - Variação do vão máximo em função da largura do entalhe

Largura do entalhe	Vão máximo (mm)	Critério limitador
0,10 b_{tot}	2900	Força na ligação
0,20 b_{tot}	3400	
0,30 b_{tot}	3900	
0,40 b_{tot}	4700	
0,50 b_{tot}	5300	
0,60 b_{tot}	6100	
0,70 b_{tot}	7100	
0,80 b_{tot}	7800	
0,90 b_{tot}	8100	Flecha final
b_{tot}	8100	

5.4.2. ANÁLISE ECONÓMICA

Como já referido, o modelo *flat slab* apresenta vantagens estruturais e arquitetónicas em relação ao modelo típico utilizado no sistema LCT da CREE. A utilização de um painel contínuo ao longo da largura da laje permite a ausência de vigas salientes, conferindo um teto em madeira liso que permite uma maior altura útil do piso devido à redução da espessura total de laje. No entanto, a quantidade de madeira requerida num sistema *flat slab* é consideravelmente superior à necessária para um modelo composto por vigas, o que implica um aumento dos custos.

A Tabela 31 apresenta os custos associados aos materiais utilizados numa solução construtiva que tem como objetivo alcançar vãos de cerca de 8,1 metros, nos dois diferentes modelos, com base no gerador de preços *CYPE* [37].

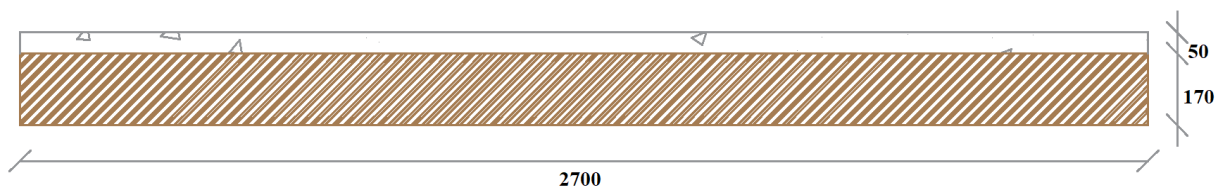


Figura 68 - Solução 2,7x8,1m do modelo *flat slab*

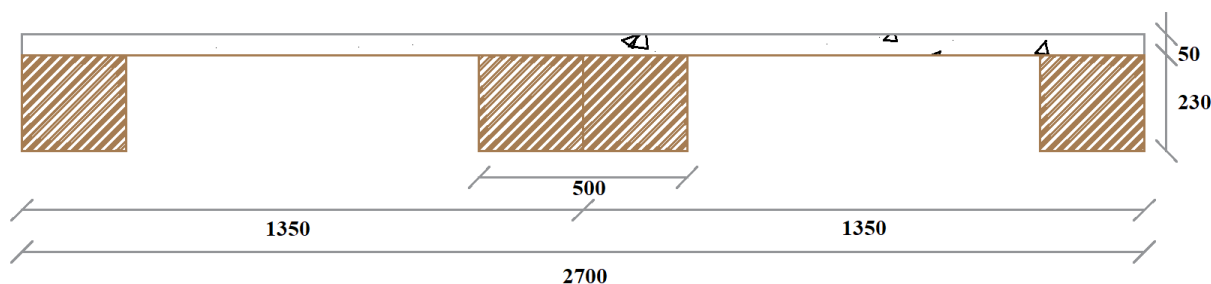


Figura 69 - Solução 2,7x8,1m do modelo composto por vigas

Apesar da espessura total de laje necessária ser inferior no modelo *flat slab* e do custo por metro cúbico de um painel CLT composto por lamelas de classe C24 ser inferior ao custo de vigas de madeira lamelada colada de classe GL24H, o custo total dos materiais de um painel 2,7x8,1m da solução, consideravelmente superior ao do modelo base da CREE.

Tabela 31 - Custo dos materiais de uma solução *flat slab* e de uma solução típica

	Modelo <i>flat slab</i> (CLT - C24)	Modelo com vigas (<i>Glulam</i> - GL24H)
Espessura total da laje	230 mm	280 mm
Vão máximo admissível	8,2 metros	8,1 metros
Volume de betão	1,1 m ³	1,1 m ³
Volume de madeira	3,9 m ³	1,9 m ³
Custo de betão	83,1 €/m ³	83,1 €/m ³
Custo de madeira	682,9 €/m ³	914,8 €/m ³
Custo total	2755 €	1704 €

Sendo assim, cada modelo apresenta as suas vantagens e desvantagens. Ao passo que o modelo *flat slab* corrige alguns problemas associados ao modelo nervurado, a correção implica um aumento no consumo de recursos. O modelo *flat slab* surge como uma variante útil em casos específicos em que a estética do edifício tem de ser preservada ou em necessidades de reduzidas espessuras de laje. Em casos em que a conceção arquitetónica seja posta em segundo plano no projeto em questão, a solução base da CREE mostra ser eficiente devido a ser a mais económica.

6

CONCLUSÃO

6.1. CONCLUSÕES

Com a conclusão do presente trabalho é possível constatar que os objetivos iniciais, propostos na introdução da dissertação, foram desenvolvidos com sucesso. Apesar das limitações impostas pelo método utilizado, foi possível criar uma folha de dimensionamento automática que permite fazer a verificação instantânea aos estados limite de lajes mista madeira-betão com sistemas de ligação semi-rígidos, e desta forma, conseguir analisar o desempenho de um modelo *flat slab*, que apresenta ser uma solução construtiva vantajosa em algumas distribuições de espaço.

A revisão bibliográfica permitiu entender a função de cada elemento e a importância que o sistema de ligação apresenta numa estrutura mista madeira-betão. Além de impedir o deslizamento entre os dois materiais, têm a função de transmitir esforços de corte. Os sistemas de ligação são caracterizados pelo seu módulo de deslizamento que quantifica a rigidez do ligador, e pela capacidade de carga máxima. Os sistemas de ligação com recursos a entalhes feitos na secção de madeira revelaram ser um dos sistemas de ligação mais eficientes e práticos no dimensionamento de estruturas madeira-betão.

A especificação técnica CEN/TS 19103 publicada em 2022 que aborda princípios e regras de dimensionamento de estruturas mistas madeira-betão, permitiu um avanço significativo na conceção de estruturas deste tipo, visto que, até à publicação deste documento, era apenas utilizado o Eurocódigo 5 que apresenta pouca informação sobre compósitos mistos madeira-betão.

Apesar da simplicidade do método de cálculo apresentado pelo Eurocódigo 5 em relações a outros métodos com recurso a programas informáticos, este método apresenta ser útil no dimensionamento de estruturas simples de madeira-betão. Seguindo este método, foi criada a folha de calculo necessária para cumprir o objetivo principal da dissertação. Com este auxiliar de dimensionamento foi possível fazer numerosas iterações da verificação de segurança de lajes mistas, e registar quais os vãos máximos admitidos por diferentes combinações geométricas de secções de madeira e betão.

Além das vantagens a nível arquitetónico, o modelo *flat slab* desenvolvido demonstrou vantagens sobre o modelo base da CREE ao nível de capacidade estrutural. Para um dado valor de espessura total de laje, uma solução com uma secção de madeira lisa permite alcançar vãos consideravelmente superiores a sistemas compostos por vigas de madeira sob uma camada de betão. No entanto, este modelo implica que o volume de madeira utilizado seja mais do dobro em comparação com o modelo nervurado, o que consequentemente causa um aumento dos custos de produção. No entanto, embora muito dependente da solução arquitetónica em causa, a solução *flat slab* evita o sobrecurso de tecto falso que, frequentemente, é necessária nos casos de vigas salientes, o que leva a alturas de edificação mais elevadas.

O desenvolvimento de um modelo *flat slab* não surge como uma substituição do modelo base da CREE, mas sim como uma variante alternativa que poderá ser mais indicada dependendo da categoria de utilização do edifício que se pretende dimensionar, nomeadamente em edifícios de habitação devido a corrigir os problemas arquitetónicos associados as lajes compostas por vigas salientes.

A influência de alguns parâmetros foi analisada para os dois modelos. Em ambos os modelos um aumento da classe de resistência de madeira ou da classe de betão não representou vantagens significativas na capacidade estrutural da laje mista. Os limites de deflexão impostos pelo Eurocódigo 5 demonstraram ser bastante severos no dimensionamento deste tipo de estruturas, tendo sido em todos os casos estudados, o critério limitador. Dado que se considerou a contraflecha nula, o valor limite de deflexão final ficou ainda mais severo.

6.2. TRABALHOS FUTUROS

Devido à limitação do estudo e à falta de informação mais detalhada, que não foi possível obter da parte dos fabricantes e construtores, algumas áreas de investigação interessantes e com certa relevância não foram abordadas, mas que podem ser alvo de investigação em trabalhos futuros.

Na presente dissertação apenas foi utilizado o método- γ definido pelo Eurocódigo 5 para o cálculo de os esforços internos e deformações de lajes mistas madeira-betão. Um estudo interessante e com relevância poderá ser a análise por outros métodos com recurso a programas informáticos e posterior comparação de resultados, onde são registadas as diferenças.

Os sistemas de ligação devem ser continuamente estudados de forma a que sejam alvo de constante evolução. Os documentos indicados para o dimensionamento de lajes mistas madeira-betão apenas apresentam informação relevante para alguns sistemas de ligação com ligadores metálicos e com entalhes.

No dimensionamento de edifícios com lajes *flat slab*, também é importante estudar a ligação com os pilares do edifício, visto ser um processo complexo devido à configuração estrutural.

A avaliação do comportamento deste tipo de estruturas face ao fogo e sismos também deve ser alvo de estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] F. Pacheco-Torgal and S. Jalali, "Construção Sustentável: o caso dos materiais de construção," 2007.
- [2] L. Huang, G. Krigsvoll, F. Johansen, Y. Liu, and X. Zhang, "Carbon emission of global construction sector," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, pp. 1906-1916, 2018.
- [3] J. Abed, S. Rayburg, J. Rodwell, and M. Neave, "A Review of the Performance and Benefits of Mass Timber as an Alternative to Concrete and Steel for Improving the Sustainability of Structures," *Sustainability*, vol. 14, no. 9, p. 5570, 2022.
- [4] G. Casais, "Industrialização e construção off-site," 2022.
- [5] A. Ceccotti, "Composite concrete-timber structures," *Progress in structural engineering and materials*, vol. 4, no. 3, pp. 264-275, 2002.
- [6] M. Fragiaco and E. Lukaszewska, "Development of prefabricated timber-concrete composite floor systems," *Proceedings of the institution of civil engineers-structures and buildings*, vol. 164, no. 2, pp. 117-129, 2011.
- [7] U. Kuhlmann and J. Schänzlin, "A timber-concrete composite slab system for use in tall buildings," *Structural engineering international*, vol. 18, no. 2, pp. 174-178, 2008.
- [8] L. Zhang, J. Zhou, and Y. H. Chui, "Development of high-performance timber-concrete composite floors with reinforced notched connections," in *Structures*, 2022, vol. 39: Elsevier, pp. 945-957.
- [9] M. Sandanayake, W. Lokuge, G. Zhang, S. Setunge, and Q. Thushar, "Greenhouse gas emissions during timber and concrete building construction—A scenario based comparative case study," *Sustainable cities and society*, vol. 38, pp. 91-97, 2018.
- [10] A. K. Moore and N. L. Owen, "Infrared spectroscopic studies of solid wood," *Applied Spectroscopy Reviews*, vol. 36, no. 1, pp. 65-86, 2001.
- [11] B. Bartolucci, A. De Rosa, C. Bertolin, F. Berto, F. Penta, and A. M. Siani, "Mechanical properties of the most common European woods: a literature review," *Frattura e Integrità Strutturale*, vol. 14, no. 54, pp. 249-274, 2020.
- [12] D. E. Kretschmann, "Mechanical properties of wood," *Environments*, vol. 5, p. 34, 2010.
- [13] *EN 338, Structural timber - Strength classes*, 2003.
- [14] *EN 384, Structural timber - Determination of characteristic values of mechanical properties and density*, 2016.
- [15] *EN 1194, Estruturas de madeira. Madeira lamelada-colada. Classes de resistência e determinação dos valores característicos*, 2002.
- [16] C. Ong, "Glue-laminated timber (Glulam)," *Wood composites*, pp. 123-140, 2015.
- [17] T. Y. Zhiqiang Wang, "Cross-Laminated Timber: A Review on Its Characteristics and an Introduction to Chinese Practices," 2001.
- [18] T. Scalet, "Cross laminated timber as sustainable construction technology for the future," 2015.
- [19] *EN 1995-1-1, Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings*, 2004.
- [20] A. S. Yusoh, P. M. Tahir, M. K. A. Uyup, S. H. Lee, H. Husain, and M. O. Khaidzir, "Effect of wood species, clamping pressure and glue spread rate on the bonding properties of cross-laminated timber (CLT) manufactured from tropical hardwoods," *Construction and Building Materials*, vol. 273, p. 121721, 2021.
- [21] A. A. P. da Costa, "Construção de edifícios com cross laminated timber (CLT)," Universidade do Porto (Portugal), 2013.
- [22] F. G. Dias, "Construir em altura com CLT: o UT system aplicado a um exemplo," Universidade do Minho (Portugal), 2017.
- [23] E. Steinberg, R. Selle, and T. Faust, "Connectors for timber-lightweight concrete composite structures," *Journal of structural engineering*, vol. 129, no. 11, pp. 1538-1545, 2003.

- [24] L. F. de Carvalho Jorge, "Estruturas mistas madeira-betão com a utilização de betões de agregados leves," Universidade de Coimbra, 2005.
- [25] *EN 1992, Eurocódigo 2: Projecto de estruturas de betão - Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios*, 2004.
- [26] A. M. P. G. Dias, "Mechanical behaviour of timber-concrete joints," 2005.
- [27] L. Collins, "Timber-concrete composite: an alternative composite floor system," 2020.
- [28] A. Dias, J. Schänzlin, and P. Dietsch, "Design of timber-concrete composite structures," Aachen: Shaker Verlag GmbH, 2018.
- [29] *CEN/TS 19103, Eurocode 5: Design of Timber Structures - Structural design of timber-concrete composite structures - Common rules and rules for buildings*, 2021.
- [30] *EN 26891, Timber structures - Joints made with mechanical fasteners - General principles for the determination of strength and deformation characteristics*, 1991.
- [31] C. GmbH, "LCT System - Planning Manual," 2018.
- [32] *NP EN 1990, Eurocódigo 0: Bases para o projeto de estruturas*, 2009.
- [33] P. CACHIM and M. MORAIS, "Estruturas de betão—Bases de Cálculo," *Publindústria, Edições Técnicas*, pp. 1-282, 2013.
- [34] *NP EN 1991, Eurocódigo 1: Acções em estruturas - Parte 1-1: Acções gerais - Pesos volúmicos, pesos próprios, sobrecargas em edifícios*, 2009.
- [35] J. Schänzlin and A. Dias, "Design of Timber-Concrete-Composite Structures," in *Proceedings of the 4th International Conference on Timber Bridges, Biel/Bienne, Switzerland*, 2022, pp. 9-12.
- [36] Y. Jiang and R. Crocetti, "CLT-concrete composite floors with notched shear connectors," *Construction and Building Materials*, vol. 195, pp. 127-139, 2019.
- [37] S. A. CYPE Ingenieros. "Gerador de Preços. Portugal." (accessed 15/07, 2024).