

RECUPERAÇÃO DE PAVIMENTOS ANTIGOS EM MADEIRA COM LAJES MISTAS MADEIRA-BETÃO

LUÍS MANUEL RIBEIRO CARDOSO

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

Orientador: Professor Doutor José Manuel Marques Amorim de Araújo Faria

JUNHO DE 2010

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2009/2010

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@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

Fax +351-22-508 1440

✉ 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 Integrado em Engenharia Civil - 2009/2010 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2010*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo 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 electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

À minha família

AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação não seria possível sem a participação directa ou indirecta de várias pessoas. Expresso assim a minha palavra de agradecimento a todas elas e em particular:

Ao meu orientador , Prof. José Amorim Faria, a quem agradeço especialmente por ter despertado o gosto pela matéria, pela partilha de conhecimentos, e pela ajuda na realização desta dissertação bem como a confiança que depositou em mim.

À empresa SOPSEC, Sociedade de Prestação de Serviços de Engenharia Civil, S.A., por me ter disponibilizado informação e conhecimento para a elaboração deste trabalho.

À minha família, Pais e irmã, por sempre me terem apoiado,

Aos meus colegas de faculdade, em especial ao Hélder Martins, bem como ao João Almeida, Nuno Joel Ferreira, Pedro Fonte, Arménio Miranda, Nuno Antunes, Fernando Pinto e a muitos outros que ficaram por complementar mas não são menos importantes.

Aos amigos Ana Catarina Paula, Diana Torres, Cristina Morais, Tânia Santos, Ricardo Melo e Castro e a todos os outros que me acompanharam na faculdade.

Por fim, um obrigado muito especial para a Catarina Costa por toda a ajuda que me deu.

RESUMO

Actualmente a palavra sustentabilidade tem um peso muito importante no sector da construção civil. A necessidade de procura de soluções viáveis direcciona os projectistas para o estudo de soluções que permitam, no caso da reabilitação, recorrer a materiais existentes quando estes se encontram em boas condições. A solução apresentada nesta dissertação é a reabilitação de pavimentos antigos recorrendo a sistemas mistos madeira-betão.

O conceito de pavimento misto madeira-betão passa pela introdução de uma camada de betão sobre o antigo pavimento de madeira, desde que este se apresente em boas condições. Como vantagem pode-se referir o aumento da capacidade de carga do pavimento bem como a melhoria do comportamento do pavimento ao fogo ou o isolamento acústico e térmico.

A execução deste tipo de pavimento não se refere apenas à colocação de uma camada de betão sobre as vigas de madeira, sendo necessário projectar e realizar correctamente um sistema de ligação que permita a adequada transferência de esforços entre materiais e não aplicando apenas carga devida ao peso próprio do betão, situação essa que ocorre quando não se prevê nenhum tipo de sistema de ligação.

Para tal foram estudados diversos sistemas de ligação, focando-se o estudo principalmente nas características tecnológicas dos ligadores e nas características mecânicas dos mesmos. A pesquisa dividiu-se em duas vertentes, pesquisa bibliográfica e pesquisa de mercado, o que originou a distinção entre sistemas de ligação tradicionais e sistemas de ligação comerciais.

Para se garantir a segurança dos pavimentos mistos madeira-betão efectuou-se um estudo ao nível do dimensionamento, o que permitiu a criação de uma folha de cálculo. O desenvolvimento da folha de cálculo possibilitou uma melhor compreensão dos sistemas mistos, uma vez que, devido à variabilidade dos parâmetros, se torna difícil o estudo optimizado sem recurso a sistemas de cálculo automático.

Para se perceber o comportamento dos pavimentos mistos, foram efectuadas diversas simulações num caso real, que permitiram perceber qual a influência dos diversos parâmetros no resultado final. Foram estudados parâmetros fundamentais no comportamento tais como a espessura do betão, as secções das vigas de madeira, os vãos e os diferentes tipos de betão.

PALAVRAS-CHAVE: reabilitação, madeira-betão, pavimentos mistos, sistema de ligação, folha de cálculo.

ABSTRACT

Nowadays the word sustainability has a major role in the construction industry. In the rehabilitation field, the need to find viable solutions lead the designers to study alternatives that allow the use of existing materials when they are in good condition. The solution presented in this thesis is the rehabilitation of ancient floors using timber-concrete systems.

The concept of timber-concrete composites floors involves the addition of a concrete layer over the old timber floors, as long as it presents in good condition. The increase of load capacity of the floor and the improvement of its performance to fire, acoustic and thermal behaviour, can be presented as an advantage.

Running this type of flooring is not only about adding a layer of concrete over the wooden beams, but also considering a connection system that allows adequate mechanical behavior of the composite structure. In this way not only load due to self weight of concrete is applied, situation which occurs when there is not any kind of connection system.

To such purpose, various connection systems were studied, focusing on their technological and mechanical characteristics. The research was divided into two parts, bibliographic research and market research, which led to the distinction between traditional and commercial connectors.

To ensure the safety of timber-concrete composite structures, a study was conducted on the designing of this type of structure which culminated on the creation of a worksheet. Such sheet facilitates the understanding of timber-concrete behavior, as it would be difficult to analyze the system without using automatic calculations, due the variability of parameters.

To understand the behavior of composite floors, several simulations were carried out on a real case, allowing the comprehension of the influence of various parameters on the final result such as the concrete thickness, timber beams sections, spans and type of concrete.

KEYWORDS: Rehabilitation, timber-concrete, composite floors, connection systems, worksheet.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES	1
1.2. OBJECTIVOS	3
1.3. METODOLOGIA E BASES DE ESTUDO	3
1.4. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	4
2. TECNOLOGIA DOS SISTEMAS MISTOS MADEIRA-BETÃO	7
2.1. INTRODUÇÃO	7
2.2. METODOLOGIA DE MATERIAIS E COMPONENTES	8
2.2.1. BETÃO	8
2.2.2. MADEIRA	9
2.2.3. SISTEMA DE LIGAÇÃO	13
2.3. ENQUADRAMENTO HISTÓRICO - ELEMENTOS CONSTRUTIVOS DOS PAVIMENTOS ANTIGOS	13
2.3.1. VIGAMENTO E APOIO NAS PAREDES RESISTENTES	14
2.3.2. FERROLHOS	14
2.3.3. FRECHAL	14
2.3.4. ESPAÇAMENTOS ENTRE VIGAS	15
2.3.5. SECÇÕES	15
2.3.6. TARUGOS	16
2.3.7. CADEIAS	16
2.3.8. SOALHO	17
2.4. ELEMENTOS CONSTRUTIVOS DAS LAJES MISTAS MADEIRA-BETÃO	18
2.4.1. TIPOLOGIA DOS PAVIMENTOS MISTOS MADEIRA-BETÃO	18
2.4.2. PORMENORES CONSTRUTIVOS	21
2.5. PROCESSO CONSTRUTIVO	23
2.5.1. ANÁLISE DAS CONDIÇÕES EXISTENTES	23
2.5.2. REFORÇO DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS	25
2.5.3. COFRAGEM	26
2.5.4. ESCORAMENTO	26
2.5.5. TRATAMENTO DAS MADEIRAS	27
2.5.6. ISOLAMENTOS	28
2.5.7. IMPERMEABILIZAÇÃO	28

2.5.8. SISTEMA DE LIGAÇÃO	29
2.5.9. COLOCAÇÃO DA ARMADURA.....	30
2.5.10. BETONAGEM	30
2.5.11. RECOMENDAÇÕES.....	31
2.6. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO	32
2.6.1. RESISTÊNCIA MECÂNICA E DE ESTABILIDADE	32
2.6.2. SEGURANÇA EM CASO DE INCÊNDIO	32
2.6.3. HIGIENE, SAÚDE E AMBIENTE.....	33
2.6.4. SEGURANÇA NA UTILIZAÇÃO.....	33
2.6.5. PROTEÇÃO CONTRA RUÍDO	34
2.6.6. ECONOMIA DE ENERGIA E ISOLAMENTO TÉRMICO.....	34
2.7. RESISTÊNCIA AO FOGO E CONFORTO ACÚSTICO	34
2.8. NORMAS APLICÁVEIS - AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO ESTRUTURAL	35
2.8.1. LIGADORES.....	35
2.8.2. SISTEMA ESTRUTURAL COMPLETO/MADEIRA.....	36
3. SISTEMAS DE LIGAÇÃO	37
3.1. INTRODUÇÃO	37
3.2. CARACTERIZAÇÃO DA LIGAÇÃO.....	37
3.2.1. MODO DE LIGAÇÃO	38
3.2.2. RIGIDEZ DA LIGAÇÃO	39
3.2.3. GEOMETRIA DA ZONA DE LIGAÇÃO	41
3.2.4. DISPOSIÇÃO DO LIGADOR.....	42
3.3. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO	43
3.4. LIGADORES TRADICIONAIS - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	45
3.5. MÓDULO DE DESLIZAMENTO	47
3.5.1. INTRODUÇÃO	47
3.5.2. COMPORTAMENTO MECÂNICO DE LIGAÇÕES MADEIRA-LIGADOR METÁLICO.....	48
3.5.3. VALORES EXPERIMENTAIS DE KSER (OBTENÇÃO DOS VALORES)	49
3.5.4. DEFINIÇÃO NO EC5.....	52
3.5.5. MÓDULO DE DESLIZAMENTO DE DIVERSOS LIGADORES	54
3.6. PESQUISA DE MERCADO	56
3.6.1. INTRODUÇÃO	56
3.6.2. SISTEMAS DE LIGAÇÃO.....	56
3.6.3. PROPRIEDADES MECÂNICAS OBTIDAS EXPERIMENTALMENTE.....	62
3.6.4. VALORES COMERCIAIS	69
4. MODELO DE CÁLCULO	73
4.1. INTRODUÇÃO	73

4.2. BASES DE PROJECTO	74
4.2.1. PRINCÍPIOS E REGRAS BASE PARA O DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL	75
4.2.2. VALORES DE CÁLCULO	78
4.2.3. PROPRIEDADES DOS MATERIAIS	83
4.2.4. PROPRIEDADES DAS LIGAÇÕES	88
4.2.5. PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS	93
4.3. MODELO DE CÁLCULO - ESTUDO TEÓRICO	94
4.3.1. HIPÓTESES DE CÁLCULO	94
4.3.2. LIGADORES	95
4.3.3. CARGAS APLICADAS	96
4.3.4. TENSÕES INICIAIS	96
4.3.5. DEFORMAÇÃO	100
4.3.6. ESFORÇO RASANTE	100
4.3.7. TENSÕES FINAIS E DEFORMAÇÕES FINAIS	100
4.4. MODELO DE CÁLCULO - MÉTODO SIMPLIFICADO	103
4.4.1. INTRODUÇÃO	103
4.4.2. RIGIDEZ EFECTIVA À FLEXÃO	104
4.4.3. VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA	105
4.4.4. DISTRIBUIÇÃO DAS TENSÕES NORMAIS	106
4.4.5. VERIFICAÇÃO DOS MATERIAIS	106
4.4.6. ESTADO-LIMITE ÚLTIMO	107
4.4.7. ESTADO-LIMITE DE UTILIZAÇÃO	108
4.4.8. CÁLCULO DA CARGA MÁXIMA ADMISSÍVEL	110
4.5. PROGRAMA DE CÁLCULO	113
4.5.1. ENTRADA DE DADOS	114
4.5.2. SAÍDA DE RESULTADOS	118
5. CASO DE ESTUDO	123
5.1. INTRODUÇÃO	123
5.2. APRESENTAÇÃO DETALHADA DO EDIFÍCIO ESTUDADO	123
5.2.1. APRESENTAÇÃO GERAL	123
5.2.2. PAVIMENTO EXISTENTE EM MADEIRA	125
5.2.3. ARQUITECTURA	125
5.3. PAVIMENTOS MISTOS MADEIRA-BETÃO – CONDIÇÕES INICIAIS	126
5.3.1. DADOS GEOMÉTRICOS	126
5.3.2. CARGAS APLICADAS	127
5.3.3. PROPRIEDADES DOS MATERIAIS	127
5.4. ESTUDO EFECTUADO	127
5.5. INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE DIMENSIONAMENTO	128
5.5.1. ESPESSURA DE BETÃO	128

5.5.2. DIÂMETRO DO LIGADOR	130
5.5.3. ESPAÇAMENTO ENTRE LIGADORES	132
5.5.4. SISTEMA DE LIGAÇÃO	133
5.5.5. CLASSE DO BETÃO (BETÃO NORMAL).....	133
5.5.6. CLASSE DA MADEIRA	134
5.5.7. QUANTIFICAÇÃO DA SOBRECARGA MÁXIMA	134
5.5.8. EFEITO DA LIMITAÇÃO DA DEFORMAÇÃO.....	135
5.6. UTILIZAÇÃO DE BETÃO LEVE	137
5.7. GANHO EM RELAÇÃO AO PAVIMENTO NÃO REFORÇADO	139
5.8. VERIFICAÇÃO SIMPLES DE SEGURANÇA	142
5.8.1. PAVIMENTOS EM ZONAS CORRENTES.....	142
5.8.2. PAVIMENTOS EM ZONAS ESPECIAIS.....	144
5.9. VALORES DE REFERÊNCIA.....	145
5.10. PROPOSTA DE INTERVENÇÃO - PORMENORES CONSTRUTIVOS	148
5.10.1. PAVIMENTOS EM ZONAS CORRENTES.....	148
5.10.2. PAVIMENTOS EM ZONAS ESPECIAIS.....	149
5.10.3. LIGAÇÃO ENTRE PAVIMENTO EM ZONA CORRENTE E PAVIMENTO EM ZONA ESPECIAL.....	150
5.10.4. LIGAÇÃO ÀS PAREDES DE ALVENARIA RESISTENTE.....	150
5.10.5. LIGAÇÃO A PORTAS	151
5.11. SÍNTESE DAS PRINCIPAIS CONCLUSÕES.....	151
 6. Conclusão	 153
6.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	153
6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	154
 Referências Bibliográficas	 157

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

Fig. 2.1 - Atribuição de classes de resistência de madeiras em serviço [4]	10
Fig. 2.2 - Possível solução madeira-betão com respectivos ligadores [14]	13
Fig. 2.3 - Vigas encastradas em paredes de alvenaria. Edifício do largo de São Domingos, Porto [3]	14
Fig. 2.4 - Ferrolhos com ligação à face exterior da parede de alvenaria [16]	14
Fig. 2.5 - Vigas apoiadas em frechal. Palácio de Belomonte, Porto [3]	15
Fig. 2.6 - Colocação de vigas transversais para diminuição de vão, Casa do Infante, Porto [3]	15
Fig. 2.7 - Troncos falqueados [3]	16
Fig. 2.8 - Tarugamento simples em vigamento de secção rectangular. Edifício do Largo de São Domingos, Porto [3]	16
Fig. 2.9 - Esquema de cadeia.	17
Fig. 2.10 - Soalho constituído por madeiras de diferentes espécies. Escola Secundária Rodrigues de Freitas, Porto [18]	17
Fig. 2.11 - Tipologia típica de um pavimento misto madeira-betão.	18
Fig. 2.12 - Pavimento misto madeira-betão com vigas secundárias	19
Fig. 2.13 - Tipologia típica de um pavimento misto madeira-betão em zonas especiais	19
Fig. 2.14 - Pavimento de soalho tradicional	20
Fig. 2.15 - Pavimento misto madeira-betão	20
Fig. 2.16 - Ligação da laje de betão à parede (corte)	20
Fig. 2.17 - Ligação da laje de betão à parede (planta)	21
Fig. 2.18 - Ferrolhos aplicados em sistemas mistos madeira-betão	22
Fig. 2.19 - Frechais aplicados em pavimentos mistos madeira-betão	23
Fig. 2.20 - Inspecção base realizada ao sistema estrutural de um pavimento antigo	24
Fig. 2.21 - Avaliação do estado de conservação de pavimento antigo [77]	25
Fig. 2.22 - Reforço de apoios através da introdução de chapas e peças de madeira [2]	25
Fig. 2.23 - Reforço no perímetro da laje mista [77]	25
Fig. 2.24 - Transmissão de esforços para a parede estrutural [77]	26
Fig. 2.25 - Escoramento do pavimento [19]	27
Fig. 2.26 - Tratamento da madeira [20]	27
Fig. 2.27 - Isolamento colocado na parte superior do soalho de madeira	28
Fig. 2.28 - Colocação da tela impermeabilizante [21]	28
Fig. 2.29 - Furação para posterior colocação dos ligadores [77]	29

Fig 2.30 - Disposição de ligadores [77]	30
Fig. 2.31 - Rede electrossoldada [77].....	30
Fig. 2.32 -Betonagem da lâmina de betão	31
Fig. 2.33 - Resistência acústica de diferentes tipos de pavimentos (Adaptado de [24])	35

CAPÍTULO 3

Fig. 3.1 - Caracterização da ligação.....	38
Fig. 3.2 - Modo de ligação	38
Fig. 3.3 - Ligação pontual [6]	39
Fig. 3.4 - Ligação contínua [6]	39
Fig. 3.5 - Rigidez da ligação	39
Fig. 3.6 - Esforços por ligadores [20].....	40
Fig. 3.7 - Curva força x deslizamento [26].....	40
Fig. 3.8 - Deformação e distribuição de tensões de ligação semi-rígida e rígida [28]	41
Fig. 3.9 - Cavidades na madeira	41
Fig. 3.10 - Placas de madeira coladas nos elementos estruturais de madeira.....	41
Fig. 3.11 - Cavidade com paredes inclinadas	42
Fig. 3.12 - Cavidade com paredes verticais	42
Fig. 3.13 - Ligação mista de ligador associado a cavidade.....	42
Fig. 3.14 - Ligadores dispostos paralelamente [9]	42
Fig. 3.15 - Ligadores cruzados [9]	43
Fig. 3.16 - Esforços actuantes na cavidade realizada na madeira	44
Fig. 3.17: Esmagamento na madeira	44
Fig. 3.18 - Esforços de corte, flexão e corte e axial em sistemas mistos	45
Fig. 3.19 - Exemplos de sistemas de ligação para sistemas mistos madeira-betão. [2]	46
Fig. 3.20 - Comportamento de diferentes tipos de ligação, curvas carga x deslizamento	47
Fig. 3.21 - Tipo de ligações e respectivos modelos gráficos força x deslizamento	47
Fig 3.22 - Módulo de deslizamento para ligadores verticais (Barras de aço, pregos e parafusos) [30] 48	
Fig. 3.23 - Efeito cavilha (Teoria de Johansen).....	49
Fig. 3.24 - Efeito da tensão (Teoria de Johansen)	49
Fig. 3.25 - Comportamento da carga aplicada [58]	50
Fig. 3.26 - Rigidez da ligação madeira-betão aparafusada usando diferentes valores de F_{est} e com o módulo de deslizamento calculado como indicado no Eurocódigo 5 [6].....	51

Fig. 3.27 - Curvas carga-deslizamento e rigidez das ligações com aumento constante de carga após o patamar[6]	52
Fig. 3.28 - Comparação dos resultados experimentais do módulo de deslizamento e os valores propostos por o Eurocódigo 5, por Turrini e Ceccotti [32]	54
Fig. 3.29 - Estudo comparativo do módulo de deslizamento [7]	55
Fig. 3.30 - Sistemas pontuais	56
Fig. 3.31 - Sistemas contínuos	57
Fig. 3.32 - Comportamento típico para os diferentes tipos de ligação [6]	65
Fig. 3.33 - Parafusos cruzados a 45° [35]	65
Fig. 3.34 - Chapas metálicas [35]	65
Fig. 3.35 - Sistema de ligação misto de cavilhas associadas a cavidades [35]	66
Fig.3.36 - Diagrama carga-deslizamento relativo a parafusos sem camada intermédia, chapas metálicas e cavilhas associadas a cavidades [35]	67
Fig. 3.37 - Cavidades e parafusos antes da colocação do betão [36]	67
Fig. 3.38 - Vista lateral de uma cavidade [36]	67
Fig. 3.39 - Ligador Tecnaria "Base Connector" [77]	69
Fig. 3.40 - Ligador Tecnaria "Maxi Connector" [77]	70

CAPÍTULO 4

Fig. 4.1 - Secção transversal da viga	74
Fig. 4.2 - Componentes da flecha	82
Fig. 4.3 - Esmagamento do betão	89
Fig. 4.4 - Rotura do ligador por corte	90
Fig. 4.5 - Esmagamento da madeira	90
Fig. 4.6 - Parâmetros para a determinação da largura efectiva do banzo (Adaptado: [55])	94
Fig. 4.7 - Carga aplicada	96
Fig. 4.8 - Secção transversal em equilíbrio. Os esforços distribuídos nas secções parciais equilibram o momento actuante exterior	96
Fig. 4.9 - Secção de equilíbrio e diagrama de deformações resultante	98
Fig. 4.10 - Secção transversal, diagrama de tensões	99
Fig. 4.11 - Diagrama tensão-deformação da madeira à tracção e à compressão paralela à fibra (Adaptado de [7])	101
Fig.4.12 - Diagrama de tensões da madeira	101
Fig.4.13 - Secção transversal à esquerda e distribuição de tensões normais devidas à flexão à direita	103

Fig. 4.14 - Metodologia englobando tábuas de soalho (definição de r)	105
Fig. 4.15 - Componentes da flecha [53]	109
Fig. 4.16 - Esquema representativo das limitações impostas.....	110
Fig. 4.17 - Funções principais do programa de cálculo.....	113
Fig. 4.18 - Janela principal do programa de cálculo.....	114
Fig. 4.19 - Cofragem vertical	115
Fig. 4.20 - Zona do programa de cálculo relativa à geometria do sistema misto.....	115
Fig. 4.21 - Zona do programa de cálculo relativa às acções aplicadas	116
Fig. 4.22 - Zona do programa de cálculo relativa às propriedades dos materiais	116
Fig. 4.23 - Propriedades do betão seleccionado	117
Fig. 4.24 - Propriedades da madeira seleccionada	117
Fig. 4.25 - Programa de cálculo considerando ligador comercial	117
Fig. 4.26 - Programa de cálculo considerando ligador tradicional	117
Fig. 4.27 - Tipo de ligador possível de seleccionar no programa de cálculo	118
Fig. 4.28 - Propriedades do ligador seleccionado	118
Fig. 4.29 - Janela principal de saída de dados.....	119
Fig. 4.30 - Forma de actuação para verificação de segurança	119
Fig. 4.31 - Descrição das verificações efectuadas	120
Fig. 4.32 - Forma de actuação para quantificação das sobrecargas	120
Fig. 4.33 - Saída de dados relativa à quantificação da sobrecarga admissível	121

CAPÍTULO 5

Fig. 5.1 - Planta de arquitectura do 1º piso	124
Fig. 5.2 - Alçado norte e sul do edifício	124
Fig. 5.3 - Alçado Nascente e poente do edifício.....	125
Fig. 5.4 - Corte no sentido nascente poente do edifício.....	126
Fig. 5.5 - Corte no sentido norte sul do edifício.....	126
Fig. 5.6 - Carga máxima possível de aplicar de acordo com a espessura de betão	129
Fig. 5.7 - Carga máxima possível de aplicar de acordo com o diâmetro do ligador	130
Fig. 5.8 - Parâmetro correspondente à variação da rigidez garantida apenas pelo betão e a rigidez conferida por os dois materiais.....	131
Fig. 5.9 - Carga máxima possível de aplicar de acordo com o espaçamento do ligador	132
Fig. 5.10 - Sobrecarga máxima admissível no pavimento	135

Fig. 5.11 - Comparação entre carga aceites admitindo a deformação como limitação e não admitindo a deformação como limitação	136
Fig. 5.12 - Comparação do comportamento de um sistema misto madeira-betão usando betão normal e betão leve admitindo a limitação da flecha	138
Fig. 5.13 - Comparação do comportamento de um sistema misto madeira-betão usando betão normal e betão leve não admitindo a limitação da flecha	138
Fig. 5.14 - Efeito do vão para vários tipos de pavimento	141
Fig. 5.15 - Cargas aplicadas em zonas correntes.....	142
Fig. 5.16 - Verificações realizadas ao pavimento relativo às zonas correntes	143
Fig. 5.17 - Verificação para o Estado-limite último em zonas correntes.....	143
Fig. 5.18 - Verificação para o Estado-limite de deformação em zonas correntes	143
Fig. 5.19 - Cargas aplicadas em zonas especiais por metro de viga	144
Fig. 5.20 - Verificação do Estado-limite último em zonas especiais	144
Fig. 5.21 - Verificação para o Estado-limite de deformação em zonas especiais	145
Fig. 5.22 - Pormenor construtivo do pavimento em zonas correntes.	149
Fig. 5.23 - Pormenor construtivo do pavimento em zonas especiais.	150
Fig. 5.24 - Pormenor construtivo do pavimento em zonas especiais.	150
Fig. 5.25 - Pormenor construtivo da ligação do pavimento às paredes estruturais.....	151
Fig. 5.26 - Pormenor construtivo da ligação à parede junto a uma porta exterior.....	151

ÍNDICE DE TABELAS

CAPÍTULO 2

Tabela: 2.1 - Classes de resistência a usar no cálculo de estruturas de madeira portuguesa existentes (Adaptado de [4])	11
Tabela 2.2 - Madeiras comuns em pavimentos antigos	12

CAPÍTULO 3

Tabela 3.1 - Módulo de deslizamento para diferentes valores de F_{est} [6]	51
Tabela 3.2 - Valores de K_{ser} para ligadores (em N/mm) no caso de ligações madeira-madeira e madeira-placas de derivados de madeira [53]	53
Tabela 3.3 - Expressões de k_{ser} propostas por diferentes investigadores	54
Tabela 3.4 - Relação proposta por Ceccotti para o valor de k_{ser} , quando existe camada intermédia	55
Tabela 3.5 - Ligadores tradicionais	58
Tabela 3.6 - Ligadores comerciais	61
Tabela 3.7 - Força máxima e módulo de deslizamento de diferentes tipos de ligação (Adaptado: de [6])	63
Tabela 3.8 - Módulo de deslizamento, força máxima dos ligadores e módulo de deslizamento máximo [35]	66
Tabela 3.9 - Carga máxima e módulo de deslizamento nos diferentes tipos de ligação [36]	68
Tabela 3.10 - Dados relativos a ensaios distinguindo espécie de madeiras (Adaptado de [37])	68
Tabela 3.11 - Valores admissíveis para ligadores Tecnaria "Base Connector" [77]	69
Tabela 3.12 - Valores nos estados limites para ligadores Tecnaria "Base Connector" [77]	70
Tabela 3.13 - Valores admissíveis para ligadores Tecnaria "Maxi Connector" [77]	70
Tabela 3.14 - Valores nos estados limites para ligadores Tecnaria "Base Connector" [77]	71

CAPÍTULO 4

Tabela 4.1 - Duração das acções	75
Tabela 4.2 - Valores γ_F , factor de segurança parcial (Adaptado de [63])	76
Tabela 4.3 - Valores recomendados dos coeficientes ψ para edifícios (Adaptado de [63])	76
Tabela 4.4 - Categorias de utilização (Adaptado de [64])	77
Tabela 4.5 - Sobrecargas em edifícios (Adaptado de [64])	78
Tabela 4.6 - Coeficientes parciais recomendados para as propriedades dos materiais (Adaptado de [61])	80
Tabela 4.7 - Valores de k_{mod} (Adaptado de [53])	81

Tabela 4.8 - Valores de k_{def} (Adaptado de [53])	81
Tabela 4.9 - Exemplos de valores limites para as flechas de vigas.....	82
Tabela 4.10 - Propriedades físicas e mecânicas de madeira maciça para estruturas (resinosas).....	83
Tabela 4.11 - Propriedades físicas e mecânicas de madeira maciça para estruturas (folhosas).....	84
Tabela 4.12 - Propriedades mecânicas de madeira lamelada colada [64]	85
Tabela 4.13 - Características de resistência e de deformação do betão	86
Tabela 4.14 - Classes de resistência do betão leve.....	86
Tabela 4.15 - Classes de massa volúmica e correspondentes valores de cálculo do betão leve [54] .	87
Tabela 4.16 - Coeficiente para a determinação da resistência à tracção, η_1	87
Tabela 4.17 - Factor de conversão para o cálculo do módulo de elasticidade, η_E	87
Tabela 4.18 - Valores de K_{ser}	88
Tabela 4.19 - Momento de cedência plástica e resistência ao esmagamento localizado da madeira para cavilhas e pregos.....	92
Tabela 4.20 - Tensões na secção da estrutura mista	99

CAPÍTULO 5

Tabela 5.1 - Carga máxima possível de aplicar de acordo com a espessura de betão	129
Tabela 5.2 - Carga máxima possível de aplicar de acordo com a espessura de betão	130
Tabela 5.3 - Variação dos parâmetros que influenciam a diminuição da carga máxima devido ao diâmetro do ligador	131
Tabela 5.4 - Carga máxima possível de aplicar de acordo com a espessura de betão	132
Tabela 5.5 – Carga máxima associada à variação do tipo de ligação	133
Tabela 5.6 – Variação da carga máxima com a classe de betão.....	134
Tabela 5.7 - Variação da carga máxima com a classe da madeira	134
Tabela 5.8 - Valores da carga máxima aceitável admitindo a deformação como limitação e não admitindo a deformação como limitação	136
Tabela 5.9 - Características dos betões leves	137
Tabela 5.10 - Características dos betões normais.....	137
Tabela 5.11 - Comparação do comportamento de um sistema misto madeira-betão usando betão normal e betão leve com diferentes classes de massa volúmica	139
Tabela 5.12 - Valores de cálculo da resistência.....	140
Tabela 5.13 - Cargas permanentes aplicadas em zonas correntes.....	142
Tabela 5.14 - Sobrecarga máxima usando um betão C25/30.....	146
Tabela 5.15 - Sobrecarga máxima usando um betão LC20/22 de classe de massa volúmica 1.6	147

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

$G_{k,j}$ - valor característico da acção permanente, j;

$Q_{k,i}$ - valor característico da acção variável, i;

$\gamma_{G,i}$ - factor de segurança parcial da acção permanente, i;

$\gamma_{Q,i}$ - factor de segurança parcial da acção variável, i;

$\psi_{0,i}$ - coeficiente de redução para a determinação do valor raro da acção variável, i;

$\psi_{2,i}$ - coeficiente de redução para a determinação do valor quase-permanente da acção variável, i;

E_{mean} - valor médio do módulo de elasticidade;

G_{mean} - valor médio do módulo de distorção;

k_{ser} - módulo de deslizamento;

k_{def} - factor para avaliação da deformação devida à fluência e que tem em conta a classe de serviço pertinente;

ψ_2 - coeficiente para o valor quase-permanente da acção;

X_k - valor característico de uma propriedade de resistência;

γ_M - coeficiente parcial do material;

k_{mod} - factor de modificação que tem em conta o efeito da duração das acções e do teor em água;

f_{ck} - Valor característico da tensão de rotura do betão à compressão aos 28 dias de idade;

$f_{ck,cubo}$ - Valor característico da tensão de rotura do betão à compressão de um cubo aos 28 dias de idade;

f_{cm} - Valor médio da tensão de rotura do betão à compressão;

f_{ctm} - Valor médio da tensão de rotura do betão à tracção simples;

ρ_m - valor médio da massa volúmica;

d - diâmetro do ligador;

d_c - diâmetro nominal definido na EN 13271 [65];

f_u - valor da tensão de rotura à tracção do fio de aço;

$M_{y,Rd}$ - valor característico do momento de cedência plástica;

$f_{h,2,d}$ - resistência ao esmagamento da madeira;

$M_{y,Rk}$ - valor característico do momento de cedência plástica;

$f_{u,k}$ - valor característico da tensão resistente à tracção do ligador;

$f_{h,0,k}$ - valor característico da resistência ao esmagamento localizado paralela ao fio;

α - ângulo entre o esforço e o fio;

L - vão equivalente da viga;

e - espaçamento entre vigas;

b_i - base dos materiais, betão e madeira;

h_i - altura dos materiais, betão e madeira;

$s_{\min}$ - espaçamento mínimo entre os ligadores;

$s_{\max}$ - espaçamento máximo entre os ligadores;

s_{eq} - espaçamento equivalente entre os ligadores;

$b_{ef,B}$ - Largura efectiva do banzo de betão;

b_M - Largura da viga de madeira;

$b_{ef,B1}$, $b_{ef,B2}$ - Largura efectiva do banzo parcial do betão;

k_α - módulo de deslizamento. No caso de Estados-limite de serviço considerar k_{ser} e no caso de Estados-limites últimos, considerar k_u ;

$E_B A_B$ - factor de rigidez do betão;

$\sigma_{c,topo}$ - tensão actuante de cálculo na fibra de topo;

σ_B - tensão normal devido ao esforço axial;

$\sigma_{m,B}$ - tensão normal devido à flexão;

$\sigma_{B,base}$ - tensão actuante de cálculo na fibra de base;

$E_{B,fin}$ - Módulo de elasticidade do betão, a longo prazo;

$E_{M,fin}$ - Módulo de elasticidade da madeira, a longo prazo;

w_c - contraflecha (caso aplicada);

w_{inst} - flecha instantânea;

w_{creep} - flecha devida à fluência;

$w_{net,fin}$ - flecha aparente final;

1

INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

As palavras sustentabilidade e reciclagem nunca foram tanto divulgadas como actualmente. O sector da construção civil, em particular, promove o estudo de componentes e métodos que permitam criar/usar produtos seguros para o ambiente assim como criar/usar formas de construção que possibilitem a preservação do ambiente.

O uso da madeira na construção tornou-se de novo objecto de estudo, não apenas pela sua capacidade resistente, mas pela sua durabilidade comprovada (quando aplicada e utilizada correctamente), bem como a sua capacidade de reciclagem. A capacidade de reciclagem é talvez a característica mais importante das anteriormente referidas uma vez que a necessidade de reutilizar é cada vez maior.

Actualmente procede-se à reabilitação de edifícios que já não cumprem, ou apenas não cumprem da forma mais eficaz, as novas exigências de desempenho. O aumento das cargas aplicadas nas estruturas constitui um exemplo disso, uma vez que o aumento obriga ao aumento da capacidade resistente global da estrutura.

Com o aparecimento de exigências de desempenho mais difíceis de garantir com os tradicionais pavimentos de madeira, foi necessário adoptar sistemas que continuassem a utilizar o material madeira. Um exemplo disso associa-se aos sistemas mistos madeira-betão onde se complementou à madeira, as características do betão. O uso desta técnica permite aplicar sobre vigamentos de madeira antiga o betão possibilitando assim a reciclagem da madeira antiga e trazendo vantagens aos níveis económicos e de desempenho.

Na actualidade, é muito frequente proceder à substituição de estruturas de madeira por construções de aço ou de betão, ou mesmo por um misto dos dois materiais. Ao optar-se por este tipo de soluções poderemos estar a perder o valor arquitectónico e patrimonial da habitação. Mas o recurso ao uso da madeira não nos impede de criar soluções de carácter estrutural, nomeadamente o uso de soluções mistas madeira-betão. Não há por isso razões para desrespeitarmos os princípios básicos das intervenções em construções antigas, retirando os materiais originais bem como desprezando a concepção original, simplesmente ao retirar os elementos de madeira da estrutura.

Contudo, o recurso a esta solução de reabilitação deve ser estudado de forma a tirar o máximo partido das suas capacidades. Não havendo o devido cuidado na execução deste tipo de solução, a criação de uma laje de betão sobre as vigas de madeira pode trazer apenas um incremento de carga provocado pelo peso próprio do sistema. Para acautelar essa execução incorrecta, é necessário recorrer a um sistema de ligação que permita tirar o melhor partido dos dois materiais. A não existência do sistema de ligação implica que os materiais trabalhem independentemente, o que não traz vantagens a nível

global uma vez que o aumento da capacidade resistente do conjunto é mínima, podendo o peso próprio do betão aplicado anular e até agravar a capacidade global do sistema. A única vantagem que este tipo de procedimento pode apresentar é relativa à redistribuição de cargas entre as vigas, bem como ao aumento da resistência acústica e porventura térmica.

A correcta execução de um sistema misto madeira-betão consiste em utilizar o betão como reforço do pavimento introduzindo entre o betão e a madeira um sistema de ligação, sistema esse que tenha a capacidade de transferir adequadamente os esforços entre os dois materiais. A introdução do betão faz com que este passe a trabalhar à compressão em toda a sua secção enquanto a madeira trabalha à tracção.

Os ligadores, também conhecidos por conectores, são elementos que, consoante o tipo de ligação, têm uma maior ou menor influência na distribuição de esforços. Diferentes tipos de ligadores podem levar ao esmagamento da madeira quando estes transmitem os esforços rasantes, originando um deslizamento relativo entre a madeira e o betão o que vai influenciar a distribuição dos esforços.

Há que ter em atenção que a madeira, no caso de ser reutilizada, já experimentou ciclos de carregamento e descarregamento o que originou o seu estado actual, como movimentos diferidos no tempo. O betão é um material novo, logo deve-se considerar no cálculo a sua fluência, factor influente no seu comportamento.

O conceito de utilização de estruturas mistas não é novo. Há relatos de estruturas mistas de antes da Primeira Guerra Mundial, na Inglaterra. Em 1914, a empresa *Redpath Brown and Company* iniciou uma série de ensaios de estruturas mistas para pisos. No Canadá há registos de ensaios em 1912 com o sistema já desenvolvido e com métodos de dimensionamento estabelecidos. Entre 1922 e 1939 foram construídos muitos edifícios e pontes empregando-se esse sistema. A partir de então, a técnica tem sofrido uma grande evolução [1].

Este sistema construtivo utiliza-se na Europa não só como solução para incrementar a capacidade de carga dos pavimentos de madeira já existentes, como também em obra nova. A capacidade de carga pode chegar, com facilidade, a duplicar a capacidade do pavimento sem a capa de betão. A rigidez à flexão, em teoria, pode triplicar ou quadruplicar. O isolamento acústico e o problema das vibrações são melhorados, devido ao aumento da massa do sistema. [2].

Actualmente na Europa, a Itália é um dos países em que este sistema construtivo é um caso de sucesso visto que o mercado de materiais, nomeadamente o de ligadores, é bastante vasto. É de referir que a tipologia de construção neste país favorece a aplicabilidade destes sistemas.

Uma vez que os pavimentos na construção antiga são maioritariamente constituídos por madeira, este sistema vem permitir uma actualização das práticas construtivas, conseguindo um melhoramento da qualidade de vida dos utentes. No entanto, a facilidade de projectar em betão, devido à existência de propriedades e regulamentação bem definida, impede que novas práticas construtivas ganhem importância. O caso de Portugal exemplifica bem isso, uma vez que se optou sempre por soluções novas completas em betão, apenas se recorrendo a soluções mistas madeira-betão em casos muito pontuais. Este facto é visível pela pequena dimensão do mercado nacional nesta área.

A preservação das estruturas de madeira é um assunto em estudo pois a sua deterioração é importante na manutenção do património histórico mas também por uma questão de segurança a nível estrutural. Muitos são os exemplos, como igrejas ou habitações, onde é visível este fenómeno.

1.2.OBJECTIVOS

A necessidade de conhecer e aplicar novas técnicas, motiva a procura pelo conhecimento de forma a dar um contributo para que estas se possam aplicar em total segurança. Como tal, o objectivo do presente trabalho centra-se na tentativa de dar uma contribuição para o maior conhecimento de uma técnica, que apesar de já ter uma grande história, não se encontra vulgarizada em Portugal.

Os objectivos principais propostos para este trabalho incluem assim:

- esclarecer a forma de execução de um pavimento misto madeira-betão, descrevendo os materiais a usar, tanto a madeira como material antigo, como o betão;
- discriminar os elementos constituintes dos pavimentos simples de madeira de forma a perceber melhor o seu funcionamento e adequando os seus elementos para a nova solução estrutural;
- caracterizar os sistemas de ligação quanto ao modo, rigidez, geometria e disposição dos ligadores, assim como, identificar o princípio de funcionamento dos sistemas;
- auxiliar a compreensão do comportamento mecânico das ligações em pavimentos mistos madeira-betão;
- dar a conhecer os diversos sistemas de ligação existentes no mercado, classificando-os de forma a ser possível identificar o grupo no qual se encontram inseridos;
- apresentar modelos de cálculo relativos a sistemas misto madeira-betão que permitam verificar a segurança dos mesmos;
- criar um programa informático que permita automatizar o processo de cálculo dos sistemas mistos madeira-betão e permita conhecer a melhor solução, comparando com diversas soluções de pavimentos;
- identificar, através do programa informático, valores máximos admissíveis de sobrecarga, para diferentes tipos de pavimentos (caso de estudo);
- descrever a solução que melhores resultados apresente, num caso de estudo, onde se pretende implementar uma solução que recorra a pavimentos mistos madeira-betão;
- apresentar, ainda que genericamente, soluções de desenho que poderão ser adoptadas, do ponto de vista da Física das construções.

1.3.METODOLOGIA E BASES DE ESTUDO

O desenvolvimento deste trabalho dividiu-se fundamentalmente em três fases distintas, focando-se a primeira fase no estudo das tecnologias dos sistemas mistos madeira-betão e a segunda no estudo de processos de cálculo também dedicados aos sistemas mistos madeira-betão. Por último, na terceira fase estudou-se o comportamento dos sistemas mistos madeira-betão bem como as suas limitações.

A primeira fase, focada na tecnologia do sistema misto madeira-betão, baseou-se na pesquisa bibliográfica de documentos relacionados com os temas *Reabilitação de edifícios*, *Estruturas de madeira*, *Sistemas construtivos tradicionais*, *Sistemas construtivos de madeira-betão*, e mais especificamente *lajes mistas madeira-betão*. Nesta fase merecem destaque especial as teses de mestrado de Tiago Dias [3] na caracterização construtiva dos pavimentos de madeira antigos e a tese de mestrado de Jerónimo Botelho Júnior [4] na inspecção e diagnóstico de estruturas de madeira. O livro *Projecto de estruturas de madeira*[5] de João Negrão e José Amorim Faria ajudou a

compreender a madeira como material, realçando os seus parâmetros mecânicos bem como dando um contributo importante nas propriedades das ligações.

A pesquisa bibliográfica, na segunda fase, baseou-se principalmente numa pesquisa de mercado, estudando os tipos de ligação comerciais, bem como em trabalhos desenvolvidos no âmbito de sistemas de ligação. De referir a tese de doutoramento de Alfredo Dias[6] que deu um contributo importante no estudo dos sistemas de ligação.

A terceira fase, mais assente no comportamento mecânico do sistema, focou-se no estudo desenvolvido por Ario Ceccotti e descrito no STEP2[2], tendo este estudo sido adaptado de forma a respeitar as novas limitações impostas pelo Eurocódigo 5[53]. O livro de João Negrão e de José Amorim Faria, anteriormente referido, permitiu adaptar melhor o método de cálculo à normalização existente. Nesta fase foi ainda estudado o modelo teórico proposto por *José Luís Pardo Ros* na sua tese de doutoramento *Estructuras Mixtas de Hormigón - Madera Aplicadas a la Rehabilitación de Forjados*[7]. Numa tentativa de perceber o funcionamento de um sistema misto madeira-betão, analisou-se um caso concreto de um edifício que será alvo de uma intervenção de reabilitação, estudando, na medida do possível, a melhor solução de pavimento estrutural, focalizando o estudo para os pavimentos mistos madeira-betão.

1.4. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A tese está organizada em seis capítulos, incluindo no capítulo 1 a introdução, onde se faz uma breve apresentação do trabalho, do seu âmbito e organização, assim como das bases em que se fundamenta.

O capítulo 2 é dedicado aos materiais constituintes de um pavimento misto madeira-betão, procurando, no caso do material madeira, estudar uma solução que englobe a madeira antiga. Na reabilitação é necessário conhecer o funcionamento das estruturas existentes, estando uma parte deste capítulo dedicado à caracterização construtiva de edifícios antigos. O processo construtivo dos sistemas mistos madeira-betão também é abordado neste capítulo, exemplificando formas e métodos de execução.

No capítulo 3 é abordado de uma forma mais aprofundada o sistema de ligação, caracterizando os tipos de ligação, de acordo com os parâmetros mais importantes pretendidos nas lajes mistas madeira-betão. Neste capítulo são ainda apresentados os diferentes tipos de sistema de ligação existentes, tanto na bibliografia como os que foi possível obter na consulta de mercado efectuada. Os diferentes tipos de ligação encontram-se divididos em sistemas tradicionais e em sistemas comerciais, consoante a fonte bibliográfica ou de mercado consultada.

O capítulo 4 diz respeito a métodos de cálculo propostos para o sistema misto apresentado nos capítulos anteriores. No capítulo é explicado um estudo teórico referido na bibliografia e é adaptado o método simplificado proposto por Ario Ceccotti[3], descrito também no Eurocódigo 5[53], que permitiu implementar uma folha de cálculo elaborada no formato *EXCEL*. A apresentação da folha de cálculo, bem como as capacidades desta, encontram-se também definidas neste capítulo.

O capítulo 5 refere-se a um caso de estudo e nele se estuda uma solução possível de ser implementada. Numa fase inicial do capítulo estuda-se a influência dos diversos parâmetros que influenciam o comportamento do sistema misto, bem como a sobrecarga máxima possível de aplicar no pavimento de forma a este se manter em segurança. A segunda fase do capítulo passa pela verificação da segurança do pavimento misto madeira-betão quando este se encontra sujeito às cargas impostas pelos revestimentos de piso, pelas divisórias e pelas sobrecargas previstas de acordo com o uso que se pretende para o espaço.

No capítulo 6, finalmente, apresenta-se a conclusão da dissertação, incluindo uma apreciação geral acerca do tema de estudo e do trabalho realizado, bem como algumas propostas de desenvolvimentos futuros.

2

TECNOLOGIA DOS SISTEMAS MISTOS MADEIRA-BETÃO

2.1. INTRODUÇÃO

A necessidade de respeitar exigências impostas por os utilizadores, obrigam à alteração do sistema estrutural, sendo o pavimento um dos elementos com mais necessidades. As causas que geralmente obrigam a este tipo de intervenção são a degradação da madeira que se traduz numa diminuição da secção resistente, a alteração do uso do próprio edifício que pode equivaler a um aumento das cargas de serviço, ou a existência de deformações elevadas no pavimento antigo que reduzem a funcionalidade e imagem de segurança dos pavimentos em questão. Outro motivo que obriga a uma intervenção é por questões normativas podendo ser, por exemplo, segurança contra fogo ou isolamento acústico ou isolamento térmico [7].

Se admitirmos que é viável a reabilitação do pavimento utilizando as vigas de madeira existentes devemos determinar as suas características através de ensaios. É de referir que como material heterogéneo a madeira obriga a realizar vários ensaios em localizações diferentes o que no caso de construções antigas é difícil, obrigando assim a utilizar nos cálculos coeficientes de segurança bastante conservadores.

Para além dos aspectos mencionados, os pavimentos devem ter a capacidade de trabalhar como elemento de ligação entre elementos horizontais e verticais possibilitando uma melhor redistribuição de cargas bem como os pavimentos devem ter a capacidade de redistribuir as cargas pontuais verticais a que estão sujeitos.

Uma má solução que se assemelha à solução estudada é a colocação de uma fina camada de betão ligeiramente armada sem qualquer tipo de ligação à madeira. Este método faz com que o betão e a madeira trabalhem de forma independente o que implica, sempre, uma redução da capacidade resistente do pavimento. De referir que a colocação da camada de betão aumenta o peso próprio do conjunto o que poderá anular o aumento da capacidade resistente. A única vantagem deste tipo de solução é a capacidade da camada de betão redistribuir as cargas aplicadas pelas diversas vigas de madeira.

A espessura do betão é também um factor importante neste tipo de solução. Para não se aumentar excessivamente o peso próprio da solução, o que diminuiria o seu campo de aplicação, a espessura da camada de betão é reduzida o que não dá a liberdade de colocação das armaduras como se tem numa laje corrente. Poderá recorrer-se à colocação de uma rede armada apenas para tratar o efeito de fendilhação, não a considerando nos diagramas de cálculo.

Uma parte considerável das acções de reabilitação realizadas em Portugal abdica dos sistemas estruturais em madeira alterando-os para sistemas descaracterizadores do edifício. Contudo a sua alteração não se deve apenas ao estado de conservação mas também ao não cumprimento das novas exigências de desempenho dos utentes destacando-se a segurança e o conforto acústico.

2.2.METODOLOGIA DE MATERIAIS E COMPONENTES

Os pavimentos mistos madeira-betão, são basicamente constituídos por três elementos: a laje de betão, a viga de madeira e o sistema de ligação.

2.2.1. BETÃO

O betão usado em sistemas mistos é geralmente betão normal não apresentando propriedades de alta resistência ou outras características, como por exemplo o betão leve, e deve ser acompanhado com uma armadura construtiva, embora esta não seja obrigatória. Esta armadura, geralmente colocada ao nível médio da secção de betão, destina-se essencialmente a prevenir a fendilhação por retracção. Assim a armadura construtiva, que pode ser uma malha electrossoldada, é desprezável na sua contribuição para a resistência e rigidez da laje, não sendo considerada nos modelos de cálculo dos pavimentos[8].

O betão como material estrutural tem duas desvantagens importantes quando se pretende implementar em reabilitação.

A primeira desvantagem refere-se à sua massa volúmica visto que o peso próprio das estruturas de betão representam uma parcela importante quando comparada com as restantes cargas aplicadas. A implementação deste material num sistema misto permite a redução deste de forma a garantir pesos próprios adequados a estruturas antigas.

A segunda desvantagem não é problema apenas para reabilitação mas sim uma desvantagem base do betão em si. O aspecto negativo prende-se com a sua baixa relação entre a resistência à tracção e a resistência à compressão, acarretando dificuldades em obter um aproveitamento óptimo de toda a secção. A reabilitação que recorre a lajes mistas madeira-betão ou até aço-betão vem de certa forma eliminar esta desvantagem visto que o betão apenas funciona à compressão garantindo uma eficiência praticamente total da sua secção.

Uma forma de reduzir o primeiro problema é recorrer a betão de agregados leves no sentido de desenvolver uma estrutura mais ligeira garantindo o desempenho estrutural desejado.

Na reabilitação pode-se optar pela utilização de betão de massa volúmica inferior minorando assim as cargas aplicadas na estrutura. Este tipo de betão é designado por betão leve e segundo a norma EN 206 [54], a definição de betão leve indica que a massa volúmica deste, após secagem em estufa, está compreendida entre 800 Kg/m^3 e 2000 Kg/m^3 e que é produzido com agregados que são, pelo menos em parte, agregados leves. A norma estabelece classes de massa volúmica variando entre 1,0 e 2,0.

O interesse no uso deste tipo de betão em estruturas mistas madeira-betão, prende-se com o facto de possuir valores menores de massa volúmica, comparativamente com o betão normal, mas também devido às suas propriedades de isolamento acústico, bem como o seu comportamento face à acção do fogo.

O isolamento que o material apresenta face aos sons aéreos relaciona-se directamente com a massa volúmica que apresenta. No entanto, relativamente ao isolamento de sons de impacto, o

comportamento dos betões leves é superior, uma vez que a estrutura porosa dos agregados leves amortece as vibrações, conseguindo um isolamento efectivo. Relativamente ao comportamento ao fogo, os betões leves estruturais são em geral mais resistentes do que a generalidade dos betões, devido à acção combinada de três factores importantes: menor condutibilidade térmica, menor coeficiente de dilatação térmica e grande estabilidade dos agregados para temperaturas até 1200° [9].

Em relação ao uso de betão em sistemas que englobam materiais que podem ser influenciados pela presença deste, há a possibilidade de reduzir essa influência com a introdução no betão de adjuvantes, ou seja, de aditivos que permitam por exemplo reduzir a quantidade de água de preparação do betão.

Para o dimensionamento são apresentadas no capítulo 4 as classes de resistência do betão de acordo com o Eurocódigo 2[55]. As classes de resistência são designadas como Cxx/yy ou LCxx/yy onde xx se refere ao valor característico da tensão de rotura do betão à compressão aos 28 dias de idade em provetes cilíndricos, f_{ck} , e yy é o valor característico da tensão de rotura à compressão aos 28 dias de idade em provetes cúbicos, $f_{ck,cubo}$.

2.2.2. MADEIRA

Na reabilitação há a necessidade de classificar a madeira estrutural antiga e tal não pode seguir os procedimentos descritos nas normas de madeira nova, madeira esta que é classificada antes da colocação em obra por processos mecânicos, realizados em instalações adequadas.

O facto das peças de madeira a ensaiar estarem colocadas em obra e eventualmente estarem inseridas em construções com elevado valor patrimonial reveste o processo de classificação de algumas particularidades que impedem, por um lado, a avaliação de alguns defeitos usados na caracterização da madeira nova e, por outro lado, impossibilitam a aplicação de métodos destrutivos de avaliação mecânica[10].

2.2.2.1. Classes de resistência

As classes de resistência da madeira foram criadas para definir níveis de confiança associados a materiais de base a usar em estruturas de madeira. A madeira passa assim a ser tratada da mesma forma que o betão, apresentado anteriormente, conferindo-lhe menos riscos e simplificando o processo de dimensionamento, discriminando apenas a classe de madeira pretendida.

A norma EN338 [56] propõe um conjunto de classes de resistência aplicáveis a todas as madeiras, tanto folhosas como resinosas, estando estas representadas no capítulo 4 onde também são definidos os valores numéricos das principais propriedades físicas e mecânicas dos elementos de madeira com interesse no campo de dimensionamento estrutural.

As classes de resistência mecânica definidas na norma EN338 [56] encontram-se divididas em C14, C16, C18, C20, C22, C24, C27, C30, C35, C40, C45 e C50, para as madeiras resinosas, e D30, D35, D40, D50, D60, e D70 para as madeiras folhosas. A letra C provém de *Coniferous* (resinosas em inglês) e o número indica o valor da resistência característica à flexão na direcção do fio. A letra D refere-se a *Deciduous* (folhosas em inglês) indicando também o número o valor da resistência característica à flexão na direcção do fio [5].

No caso de se pretender reabilitar usando novos elementos estruturais horizontais é possível optar por derivados de madeira em vez de madeira maciça. Um exemplo de derivado de madeira válido para fins estruturais, é a madeira lamelada colada que consiste na união, por colagem em fábrica, de peças

individuais de madeira maciça, designadas por lamelas, de várias dimensões que depois de ligadas entre si formam uma peça única.

Este tipo de derivado de madeira permite criar peças de maiores comprimentos e de maiores secções, e dessa forma evitar o problema das peças estruturais de madeira maciças que são limitadas em termos de secção e comprimento.

Em termos comerciais, a madeira lamelada colada pode ser classificada como homogénea ou combinada. A classificação de homogénea é dada a peças constituídas por lamelas com a mesma classe de resistência e a mesma espécie ou combinação de espécies. A madeira lamelada colada combinada é constituída por lamelas com classes de resistência diferentes ou a espécies, ou combinação de espécies diferentes.

2.2.2.2. Propriedades físicas e mecânicas de peças de madeira aplicadas em estruturas existentes

Há casos de ensaios em que é necessário aceder às faces de topo dos elementos de madeira o que se torna difícil uma vez que normalmente os topos se encontram no interior das paredes.

Em seguida é apresentada uma metodologia que auxilia a classificação de madeira antiga tendo em atenção a sua localização na construção e o seu valor histórico preservando as suas características iniciais.

O método é designado como método simplificado baseado na EN338 [56] e tem como base o ponto 6.2.2 da norma EN338 [56]. A norma propõe, de forma simplificada, atribuir classes de resistência a madeira estrutural antiga, contornando as dificuldades anteriormente apresentadas, apoiando-se no pressuposto de que é admissível atribuir uma classe de resistência a uma dada população de madeiras, desde que a sua resistência à flexão na direcção paralela às fibras ($f_{m,k}$), a sua massa volúmica (ρ_m) bem como o módulo de elasticidade médio na direcção paralela às fibras ($E_{0,m}$) sejam superiores aos indicados na classe respectiva de madeira nova.

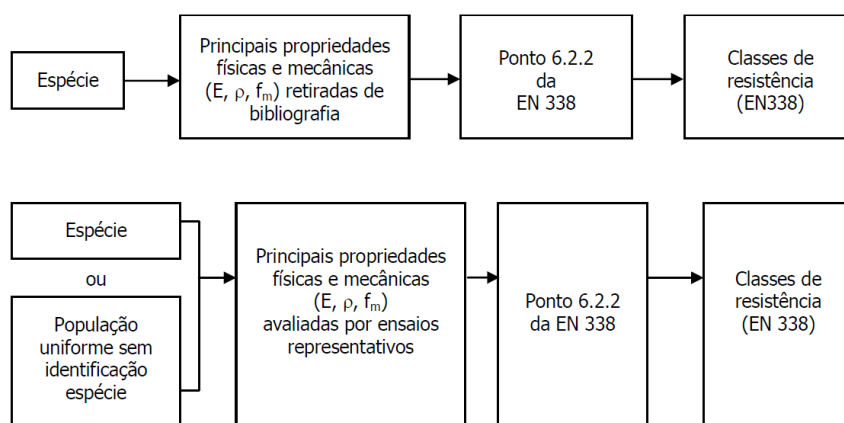


Fig. 2.1 - Atribuição de classes de resistência de madeiras em serviço [4]

Para uma correcta atribuição de classes de madeira é fundamental conseguir identificar a espécie, o que indica conhecimentos das características visuais das madeiras, como por exemplo, a cor, a largura dos veios de Verão e de Inverno, a dureza superficial, as diferenças entre o borne e o cerne, entre

outros, bem como pode haver a necessidade de retirar uma amostra para avaliação laboratorial. A massa volúmica é sempre um indicador fundamental na validação final de uma dada avaliação.

O sistema tem por base a atribuição de uma classe de resistência a uma dada população de madeiras que apresenta singularidades como a espécie ou grupo de espécies, qualidade e origem, permitindo então o agrupamento de espécies com propriedades mecânicas idênticas. Para que esta atribuição se concretize é necessário que, conforme indica o ponto 6.2.2 da norma EN338 [56], os valores característicos da resistência à flexão e da massa volúmica sejam iguais ou superiores aos valores da classe correspondente e também que o valor característico médio do módulo de elasticidade em flexão na direcção do fio seja igual ou superior a 95% do valor para essa dada classe de resistência [4].

A tabela seguinte identifica as classes, atribuídas de acordo com o método descrito, para as principais madeiras nacionais usadas em estruturas. O Pinho Bravo não é referido na tabela por a norma NP4305 [57] admitir a classe C18, desde que este apresente defeitos que permitam enquadrá-lo na classe de qualidade E.

A tabela 2.1 não pode ser usada directamente para classificar madeira antiga já que este se trata de um problema muito mais complexo pois envolve defeitos, combinação de defeitos, anomalias causadas pelas ligações e ataques de xilófagos, activos ou não, e muitos outros problemas associados ao uso e à validação, certificação de integridade e qualidade das peças.

Tabela: 2.1 - Classes de resistência a usar no cálculo de estruturas de madeira portuguesa existentes¹
(Adaptado de [4])

Identificação da madeira	Designação botânica	$f_{m,k}$ (Valores médios) (MPa)	$E_{0,m}$ (GPa)	ρ_m (kg/m ³)	Classe EN 338 [56]
Carvalho	Quercus faginea, Lam.	122	11	800	D40
Castanho	Castanea savita, Mill	97	10	540	D30
Eucalipto	Eucaliptus globulus, Labill	137	12	765	D40
Choupo Branco	Populus Alba, L.	80	11	450	C24

2.2.2.3. Madeiras comuns em pavimentos antigos

Como no passado apenas se recorria a madeira serrada ou madeira em elementos redondos (toros), estes eram obtidos de madeira maciça de troncos de árvore de várias espécies, das quais se destacam as correntemente utilizadas em estruturas de edifícios antigos (ver tabela 2.2).

¹ Os valores das principais propriedades mecânicas foram retiradas da publicação de Albino Carvalho [11], à excepção do módulo de elasticidade, o qual foi deduzido de forma conservadora da consulta de "Le guide des essences de bois" [12].

Tabela 2.2 - Madeiras comuns em pavimentos antigos

Identificação da madeira	Designação botânica	Espécie	Descrição
Carvalho	Quercus Robur	Folhosa	Madeira dura, relativamente fácil de trabalhar. Tem resistência e durabilidade bastante elevada e apenas apresenta a desvantagem de ter uma massa volúmica elevada
Castanho	Castanea sativa, Mill	Folhosa	Madeira dura. Tem massa volúmica relativamente baixa, elevada durabilidade e é relativamente boa de trabalhar. Madeira susceptível a ataques de caruncho
Pinho Bravo	Pinus Pinaster	Resinosa	Também conhecida como Pinho nacional ou Pinho da terra. Madeira moderadamente dura e pesada. A grande vantagem desta é a sua trabalhabilidade e é boa para vigamentos. O seu uso em Portugal é relativamente grande e encontra-se em abundância. Contudo, apresenta muitos nós e, por esse facto, fendilha facilmente. Outro factor negativo é ser bastante susceptível a ataques bióticos, exigindo rigorosos tratamentos
Pinho Manso	Pinus Pinea	Resinosa	Madeira semelhante ao Pinho Bravo diferenciando-se pelo facto de apresentar menos nós e ser uma madeira esteticamente mais regular. É considerada uma das melhores madeiras para vigamentos e soalhos

Os exemplos apresentados na tabela 2.2 são meramente indicativos de tipos de madeira usualmente usados em pavimentos não invalidando o facto de se encontrarem outros tipos de madeira em pavimentos antigos.

2.2.2.4. Comportamento ao fogo da madeira

A madeira quando usada como único material de construção não apresenta uma boa reacção ao fogo ainda que a sua resistência perante o fogo seja bastante melhor. Entende-se como resistência ao fogo o período de tempo perante o qual uma estrutura mantém intactas as características relevantes associadas à resistência (estabilidade, passagem de fumos, isolamento térmico), quando exposta a uma fonte de calor.

Com a acção do fogo a segurança deixa de estar garantida, não pela diminuição das propriedades mecânicas devidas à temperatura mas sim por uma diminuição da secção estrutural "activa" da peça de madeira. No caso da madeira se encontrar em contacto com o fogo a sua superfície exterior entra facilmente em combustão, mas logo se cria uma capa carbonizada que é seis vezes mais isolante que a própria madeira, atrasando o processo e permitindo que a madeira no interior da peça não seja afectada pela acção do fogo[13].

2.2.3. SISTEMA DE LIGAÇÃO

Como já foi anteriormente referido o betão é eficaz quando sujeito à compressão e, como a madeira apresenta um comportamento muito bom à tracção, é necessário introduzir nos sistemas mistos madeira-betão um terceiro elemento que possa transmitir os esforços adequadamente formando uma ligação adequada entre as duas camadas e reduzindo ou anulando os deslocamentos relativos entre os dois materiais. Esse terceiro elemento é designado por sistema de ligação e é usualmente composto por ligadores, metálicos ou não.

O sistema de ligação é o elemento fulcral numa solução de laje mista madeira-betão, isto porque o comportamento global é definido em grande parte pelo comportamento do sistema de ligação. A sua eficácia pode variar de nula a praticamente total.

A classificação de eficácia nula é dada a pavimentos onde o sistema estrutural engloba apenas o material madeira, tendo o betão apenas o efeito negativo do seu peso próprio se tornar uma sobrecarga. Isto acontece quando não há nenhum sistema de ligação entre o betão e a madeira.

Como eficácia total entende-se um sistema em que se considera apenas um material, material esse obtido por uma homogeneização perfeita da madeira com o betão. A eficácia total é praticamente garantida quando se recorre a colas.

Na figura seguinte encontra-se representado um sistema genérico que recorre a um elemento metálico como sistema de ligação.

No capítulo 3 é apresentado um estudo mais aprofundado nesta matéria.

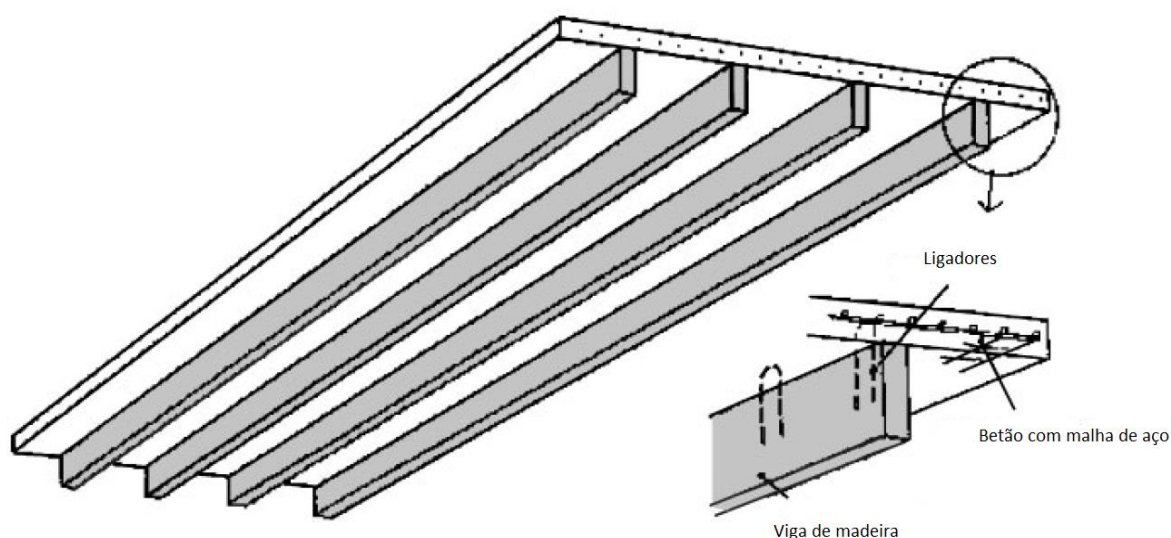


Fig. 2.2 - Possível solução madeira-betão com respectivos ligadores [14]

2.3. ENQUADRAMENTO HISTÓRICO - ELEMENTOS CONSTRUTIVOS DOS PAVIMENTOS ANTIGOS

Os pavimentos de madeira são normalmente constituídos pelo vigamento e pelo soalho, apresentando elementos secundários entre os quais se destacam os tarugos e as cadeias.



Fig. 2.3 - Vigas encastradas em paredes de alvenaria. Edifício do largo de São Domingos, Porto [3]

2.3.1. VIGAMENTO E APOIO NAS PAREDES RESISTENTES

O vigamento consiste essencialmente no conjunto de vigas ou barrotezinhos dispostos paralelamente e executados em simples troncos de madeira ou em madeira serrada de secção rectangular. As extremidades das vigas de madeira são normalmente apoiadas ou encastradas nas paredes de alvenaria resistente. Usualmente o apoio da viga é de $2/3$ de espessura da parede, podendo em alguns casos ser igual à espessura [15].

2.3.2. FERROLHOS

Para garantir uma boa transferência de esforços entre o vigamento e o sistema estrutural vertical eram utilizados ferrolhos, ferrolhos esses que, numa das extremidades, eram aparafusados ou pregados nas vigas de madeira sendo a outra extremidade fixa na parede resistente.

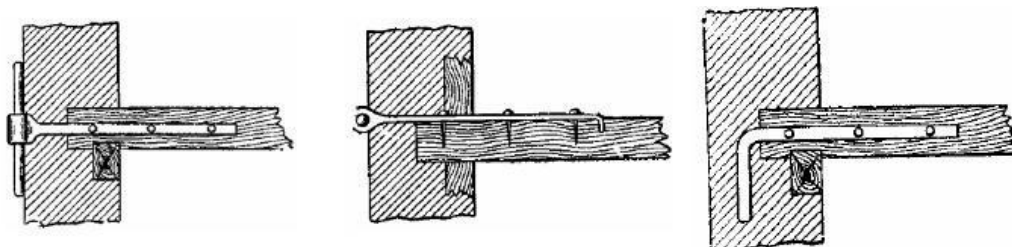


Fig. 2.4 - Ferrolhos com ligação à face exterior da parede de alvenaria [16]

A finalidade destes elementos metálicos não é exclusivamente a maior solidez conferida ao pavimento, diminuindo deformações e vibrações, mas também a de garantir a estabilidade das paredes de alvenaria dos edifícios, normalmente de vários metros de altura e com pouco travamento na direcção fora do seu plano [3].

2.3.3. FRECHAL

Nas estruturas antigas quando o vigamento era descarregado em paredes que não ofereciam segurança estrutural era criada uma viga, frechal, contínua à parede onde passavam a estar apoiadas as vigas de madeira. Esta solução permitia a distribuição uniforme de cargas e evitava as deformações pontuais nas paredes.



Fig. 2.5 - Vigas apoiadas em frechal. Palácio de Belomonte, Porto [3]

2.3.4. ESPAÇAMENTOS ENTRE VIGAS

Relativamente a espaçamentos entre vigas, a bibliografia apenas sugere que tanto a secção como os espaçamentos devem ser proporcionais ao vão e às cargas aplicadas não especificando quanto ao tipo de madeira a utilizar. Os espaçamentos normalmente encontrados variam entre 0,40m e 0,70m de eixo a eixo, sendo que as últimas vigas são frequentemente colocadas junto das paredes. No caso de o pavimento incluir revestimento inferior dos tectos, o espaçamento livre face a face é de 0,30m para melhor colocação do fasquiado [16].

Quando o vão dos pavimentos aumentava significativamente, era usual a colocação no sentido perpendicular das vigas sob o vigamento existente. A partir do século XIX, nos vãos superiores a 7 metros, são utilizadas vigas metálicas para reforço desses mesmos pavimentos, ou então como alternativa aos vigamentos de madeira [17].



Fig. 2.6 - Colocação de vigas transversais para diminuição de vão, Casa do Infante, Porto [3]

2.3.5. SECÇÕES

As secções das vigas normalmente aplicadas em edifícios eram idênticas aos troncos de madeira mas falqueados nas faces. Por vezes eram falqueados em duas faces opostas para melhor colocação dos soalhos e dos tectos, embora frequentemente apareçam vigas falqueadas nas quatro faces, principalmente junto às fachadas dos edifícios [15].

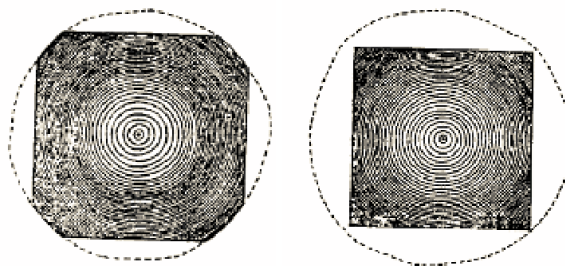


Fig. 2.7 - Troncos falqueados [3]

Os elementos estruturais empregues em pavimentos têm normalmente dimensões que variam entre 0,10m e 0,30m de diâmetro de secção e apresentam um comprimento de 4,0 a 7,0m. A partir do século XX surgiram as vigas de secção rectangular com larguras entre 0.07m e 0.12m e alturas entre 0.18 e 0.25m. Este tipo de vigas raramente apresentavam espaçamentos de face a face inferiores a 0.50m.

2.3.6. TARUGOS

O uso de vigas de madeira como sistema estrutural impõe alguns condicionalismos devido às dimensões das peças de madeira. Um dos factores negativos é a esbelteza das vigas estando estas sujeitas ao fenómeno de bambeamento. Para evitar este fenómeno utilizam-se tarugos, que consistem em pequenas vigas, colocadas entre as vigas principais, de comprimento igual ao espaçamento livre entre estas a uma distância média entre si de 1,5 a 2,0m. Em pavimentos onde foram empregues secções circulares em vigas, normalmente os tarugos apresentam a mesma forma de secção variando apenas nas dimensões.



Fig. 2.8 - Tarugamento simples em vigamento de secção rectangular. Edifício do Largo de São Domingos, Porto[3]

2.3.7. CADEIAS

Nos pavimentos onde existem pontos singulares, espaços onde não é possível manter a forma de execução do pavimento, é necessário alterar a configuração das peças estruturais. Como pontos singulares identificam-se as caixas de escadas ou as chaminés, onde, para além de ser necessário

interromper o pavimento, é necessário evitar a proximidade do calor irradiante que pode carbonizar a madeira. Para resolver este problema é necessário criar cadeias que auxiliem a transmissão das cargas para os restantes elementos estruturais.

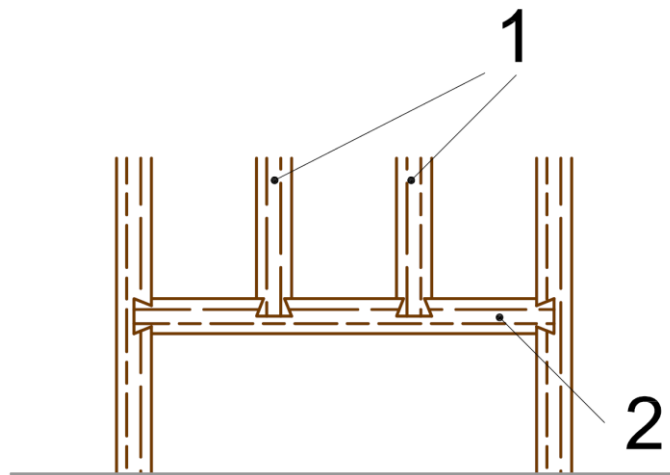


Fig. 2.9 - Esquema de cadeia. Legenda: 1. Vigas de pavimento; 2. Cadeia.

2.3.8. SOALHO

O revestimento dos pavimentos, na maior parte dos casos é efectuado por soalho, podendo definir-se soalho como um conjunto de tábuas, usualmente de espessura variável entre 2,2 e os 5,0cm com larguras entre os 12,0cm e os 30,0cm atingindo comprimentos de 10,0m. As espécies mais utilizadas na construção deste componente do pavimento eram o pinho nacional, o pinho manso, a casquinha e o castanho.



Fig. 2.10 - Soalho constituído por madeiras de diferentes espécies. Escola Secundária Rodrigues de Freitas, Porto [18]

Quando os soalhos ficavam gastos, o que acontecia quando se usavam madeiras mais brandas, era costume aplicar-lhe um forro perpendicular, normalmente com as mesmas dimensões das tábuas de soalho e com espessura de 1,5cm [3].

2.4.ELEMENTOS CONSTRUTIVOS DAS LAJES MISTAS MADEIRA-BETÃO

2.4.1. TIPOLOGIA DOS PAVIMENTOS MISTOS MADEIRA-BETÃO

Com a crescente necessidade de cumprir exigências de segurança e conforto, pode-se optar por uma reabilitação que não recorra apenas à substituição dos elementos do pavimento, mas que direcione para uma reabilitação que mantenha, dentro das possibilidades, materiais que permitam a interacção com elementos novos. Esta forma de reabilitação coincide com o conceito de sistema misto madeira-betão já que este permite manter a estrutura de madeira, aumentando os parâmetros mecânicos do conjunto através da adição de um novo material, o betão.

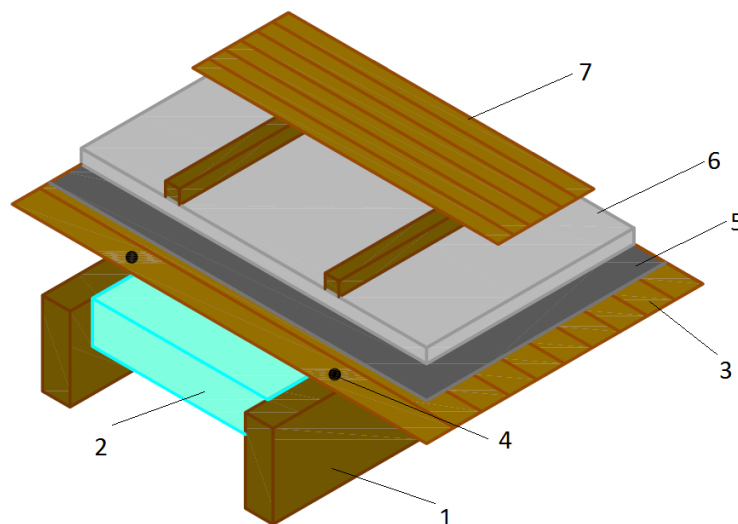


Fig. 2.11 -Tipologia típica de um pavimento misto madeira-betão. Legenda: 1. Viga de madeira; 2. Isolamento; 3. Soalho/cofragem; 4. Ligador; 5. Membrana impermeabilizante; 6. Laje de betão; 7. Revestimento de piso.

O pavimento misto madeira-betão pode ser executado de duas formas relativamente às vigas de madeira. A primeira forma refere-se a pavimentos onde as tábuas de soalho (cofragem) são fixadas directamente às vigas principais, definindo como vigas principais as vigas que apoiam directamente num elemento estrutural que não faz parte do pavimento. A outra forma de execução refere-se à utilização de vigas secundárias, vigas estas que são apoiadas nas vigas principais sendo nas vigas secundárias que se fixa o soalho.

Nas figuras 2.11 e 2.12 encontram-se representados os elementos principais de um sistema misto madeira-betão no qual se identificam as vigas, as varas, o isolamento, o ripado, o soalho e o forro inferior ao pavimento.

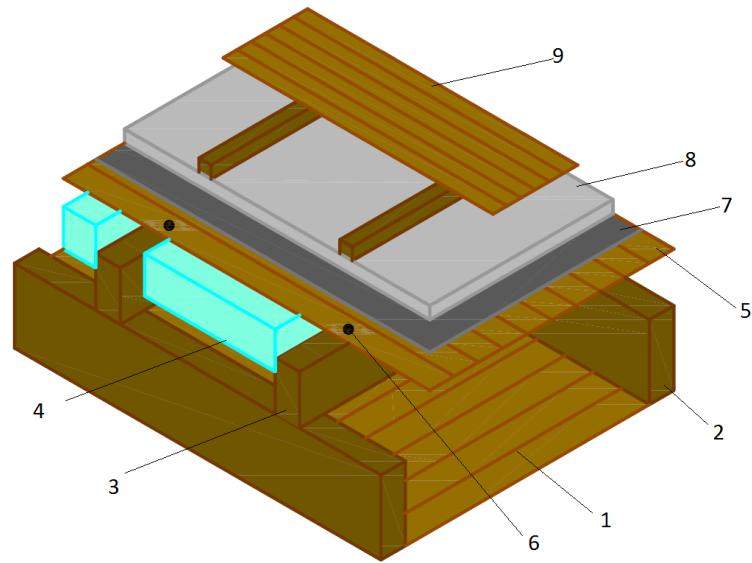


Fig. 2.12 - Pavimento misto madeira-betão com vigas secundárias. Legenda: 1. Revestimento de tecto; 2. Vigas de madeira principais; 3. Vigas de madeira secundárias; 4. Isolamento; 5. Soalho/cofragem; 6. Ligadores; 7. Membrana impermeabilizante; 8. Laje de betão; 9. Revestimento de piso.

A alteração do uso de pavimentos tradicionais leva a que novas necessidades de desempenho sejam garantidas pelos pavimentos como é o caso de estanquidade em zonas onde há movimentação de água. As casas de banho e cozinhas são espaços que obrigam a este tipo de preocupação, visto o seu uso ser muito mais agressivo para os pavimentos. Na figura seguinte representa-se uma solução tipo para pavimentos sob instalações sanitárias e cozinhas, que é em tudo análoga à da figura 2.12 e reflecte uma das grandes vantagens deste tipo de sistemas: a sua maior adaptabilidade a diversos tipos de revestimento de piso e funções.

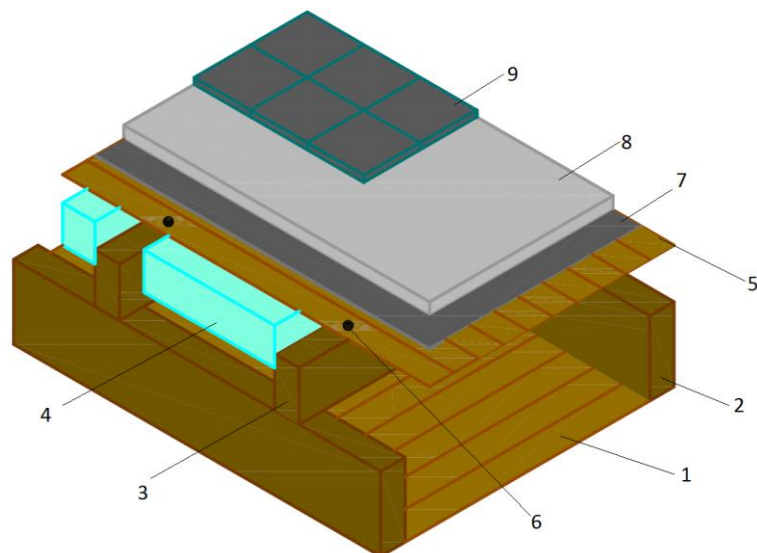


Fig. 2.13 - Tipologia típica de um pavimento misto madeira-betão em zonas especiais. Legenda: 1. Revestimento de tecto; 2. Vigas de madeira principais; 3. Vigas de madeira secundárias; 4. Isolamento; 5. Soalho/cofragem; 6. Ligadores; 7. Membrana impermeabilizante; 8. Laje de betão; 9. Mosaico cerâmico ou equivalente.

A laje de betão, apesar de pequena espessura, permite ao sistema adquirir duas importantes propriedades, a da capacidade de repartição transversal de cargas e a capacidade resistente a acções no seu plano [9].

A capacidade de transmissão de esforços permite uma melhoria acentuada em relação ao comportamento dos pavimentos quando sujeitos a cargas verticais não uniformes, como cargas concentradas. Conforme indica a figura 2.14, um dos grandes inconvenientes dos pavimentos de soalho era a sua falta de capacidade de repartição de esforços o que é notório, em soalhos mais ligeiros, com desempenho ineficiente até mesmo apenas à simples movimentação de pessoas.



Fig. 2.14 - Pavimento de soalho tradicional

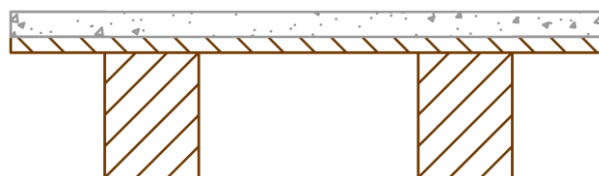


Fig. 2.15 - Pavimento misto madeira-betão

A capacidade resistente a acções no plano horizontal permite à camada de betão auxiliar a madeira na transmissão de esforços aos restantes elementos estruturais. A transmissão é garantida pela inserção de armadura na laje e em roços abertos nas paredes.

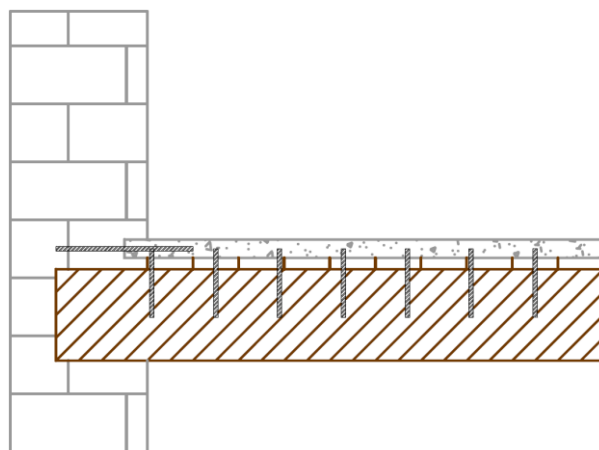


Fig. 2.16 -Ligação da laje de betão à parede (corte)

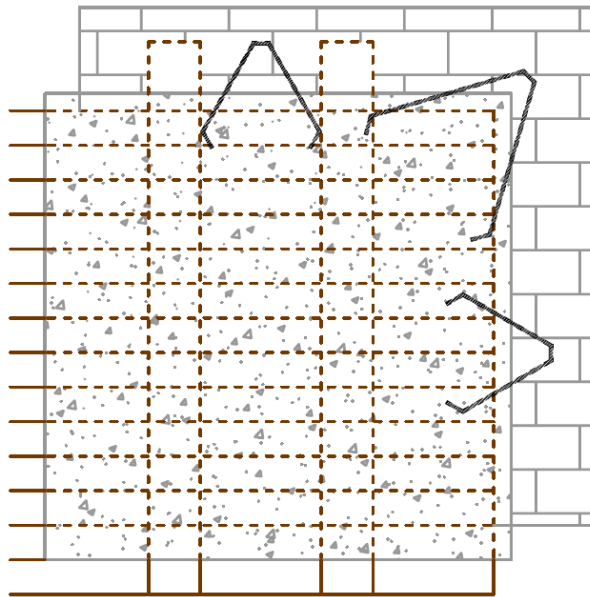


Fig. 2.17 - Ligação da laje de betão à parede (planta)

2.4.2. PORMENORES CONSTRUTIVOS

Analogamente aos pavimentos antigos, os novos sistemas de pavimentos, têm a necessidade de transmitir adequadamente as cargas para os restantes elementos construtivos sem que ponham em causa a estabilidade destes. Para isso foram instalados sistemas que auxiliam a transmissão de cargas tanto nos elementos verticais estruturais como nos elementos horizontais estruturais. Como exemplo, nos pavimentos antigos foram criados ferrolhos, bem como frechais, já atrás definidos.

Nos pavimentos novos são geralmente adaptados os antigos sistemas de forma a ser garantido um bom comportamento às cargas aplicadas, já que actualmente as cargas são bastante superiores às previstas e geralmente aplicadas no passado.

2.4.2.1. Ferrolhos

Os ferrolhos podem ser executados de diversas formas conforme indica a figura seguinte (2.18).

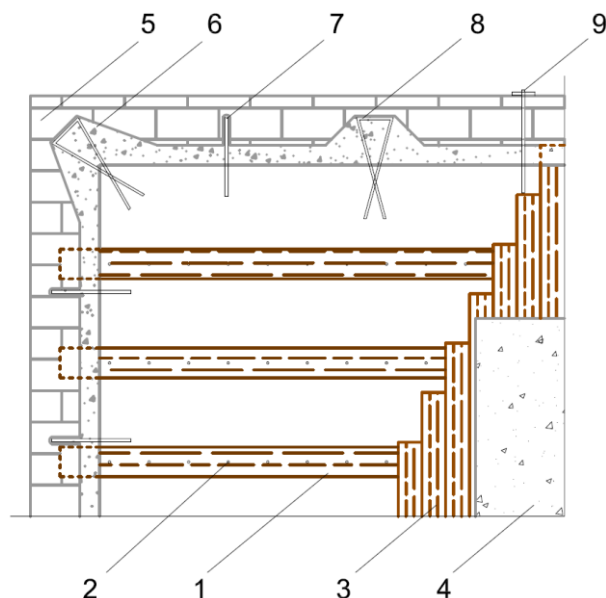


Fig. 2.18 - Ferrolhos aplicados em sistemas mistos madeira-betão. Legenda: 1. Vigas de madeira; 2. Ligadores; 3. Soalho de madeira (cofragem); 4. Laje de betão; 5. Parede estrutural; 6. Betão de fixação (Betão da laje); 7. Ferrolho simples; 8. Ferrolho em X; 9. Ferrolho de fixação no exterior

Os ferrolhos podem ser classificados, tal como nos pavimentos simples de madeira, como sendo ferrolhos que ocupam toda a extensão da parede bem como ferrolhos que apenas ocupam parte da parede ou ainda ferrolhos que formam um ângulo com a horizontal dentro da parede garantindo assim maior comprimento de influência. Tal como nos pavimentos simples de madeira, a solução que passa por atravessar toda a parede deve ter especial cuidado visto o elemento de ligação estar sujeito às condições climáticas o que poderá reduzir, e muito, o seu tempo de vida útil.

2.4.2.2. Frechais

Os frechais são elementos que permitem a distribuição mais uniforme das cargas transmitidas pelo pavimento garantindo assim a eliminação de pontos críticos provocados pela aplicação por parte das vigas de cargas pontuais.

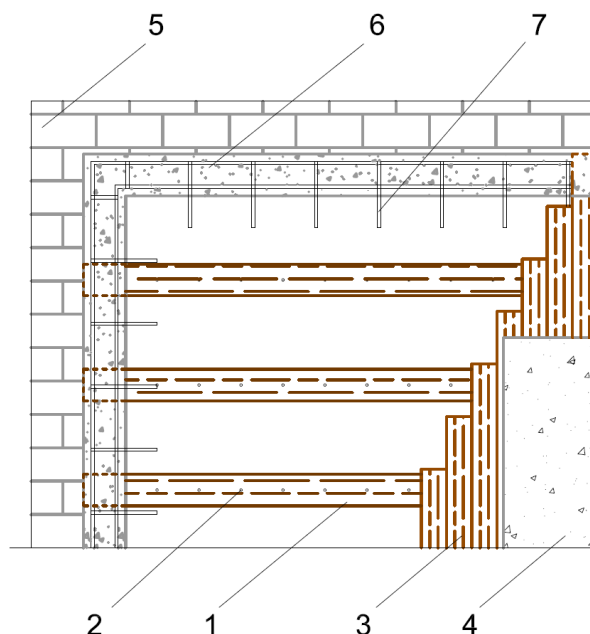


Fig. 2.19 - Frechais aplicados em pavimentos mistos madeira-betão. Legenda: 1. Vigas de madeira; 2. Ligadores; 3. Soalho de madeira (cofragem); 4. Laje de betão; 5. Parede estrutural; 6. Freichal (Viga em betão armado); 7. Ferrolho

O uso de frechais permite não só manter como sistema estrutural as paredes bem como perante o redesenho de um novo sistema estrutural que recorra a pilares onde descarregam os frechais. O material de execução dos frechais pode variar consoante o projectista podendo-se recorrer, para além do betão armado, a vigas em aço.

2.5.PROCESSO CONSTRUTIVO

O processo construtivo de um pavimento misto madeira-betão é de certa forma um processo específico de cada caso, variando consoante diversos factores como o sistema de ligação aplicado ou a remoção do soalho existente. Em seguida apresenta-se apenas um modelo base de um processo construtivo que tem por base o sistema de ligação que recorre a cavilhas.

2.5.1. ANÁLISE DAS CONDIÇÕES EXISTENTES

Neste tipo de reabilitação, o modo de actuação varia consoante o estado do sistema base de madeira. A intervenção deve ter como base a inspecção de todo o sistema estrutural existente, identificando os casos críticos de forma a estes poderem ser eventualmente reparados ou substituídos.

Num sistema estrutural de madeira são vários os pontos críticos, sendo de destacar [19]:

- Uniões entre elementos nas samblagens entre peças, onde é frequente haver encaixes e rebaixos onde se poderá acumular água e, conseqüentemente, ocorrer o início da degradação;
- Topos das peças expostos às diferentes condições climáticas;
- Extremos de elementos;
- Peças em contacto com o solo ou com a humidade;

- Elementos exteriores ao edifício;
- Topos de peças, por exemplo as vigas, apoiadas em paredes;
- Topos de peças junto a zonas de risco, como por exemplo junto a fachadas, remates de pavimentos e cobertura, zonas de lavagem ou de criação de condensações e/ou pouco ventiladas;
- Meio-vão de peças longas, como vigas.

A inspecção tem como finalidade avaliar a capacidade resistente das secções existentes, focando-se no estado de conservação das vigas de madeira, bem como, na espécie de madeira utilizada, assim como nas dimensões efectivas de todas as vigas.

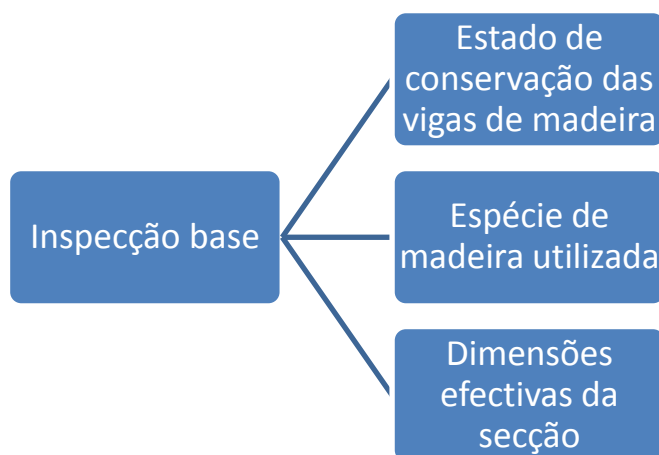


Fig. 2.20 - Inspeção base realizada ao sistema estrutural de um pavimento antigo

O estado de conservação das vigas de madeira deve ter como base os aspectos estruturais e não estruturais. Nos aspectos estruturais incluem-se as deformações excessivas e a existência de roturas. Aspectos não estruturais incluem degradação biológica e degradação por variação do teor de água, por exemplo.

A espécie de madeira utilizada é definida por uma inspecção visual anotando os defeitos encontrados nas peças de madeira tentando atribuir propriedades mecânicas às peças, se possível recorrendo a classe de resistência.

As dimensões efectivas da secção é caracterizada como sendo toda a secção que se pode considerar apta para componente estrutural do sistema. A consideração conjunta da classe atribuída à madeira com a dimensão efectiva permite proceder ao dimensionamento da estrutura [9].



Fig. 2.21 - Avaliação do estado de conservação de pavimento antigo [77]

2.5.2. REFORÇO DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS

Na inspecção anteriormente descrita podem ser identificados pontos onde se deve proceder ao reforço estrutural, tanto ao nível das vigas de madeira como aos apoios destas nas paredes de madeira.

As anomalias normalmente encontradas neste tipo de estruturas podem ser definidas como sendo relativas tanto ao material como à estrutura. No que se refere a anomalias do material, podem-se definir problemas associados ao crescimento, como é o caso de nós e, problemas provocados durante o processo de secagem e laboração bem como patologias resultantes de ataques biológicos. Em relação aos problemas relacionados com a estrutura, é de referir a intervenção humana que altera o uso para o qual a estrutura foi projectada, majorando, por exemplo, as sobrecargas aplicadas.

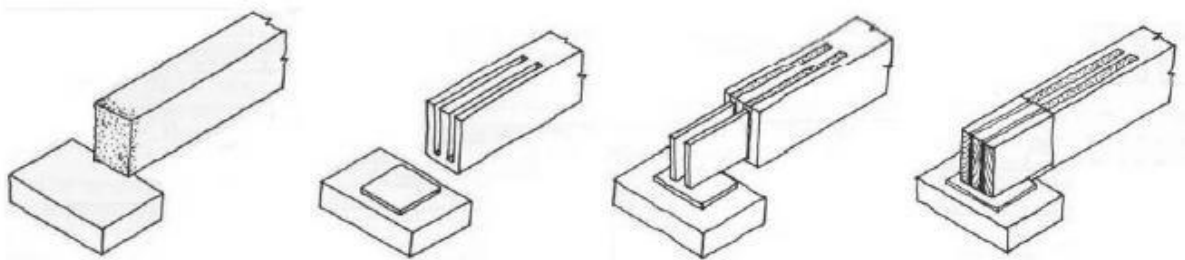


Fig. 2.22 - Reforço de apoios através da introdução de chapas e peças de madeira [2]

No caso de se justificar, pode ser construído um reforço no perímetro da laje mista, sendo particularmente importante no caso da reabilitação se localizar em zona sísmica.



Fig. 2.23 - Reforço no perímetro da laje mista [77]

Como já referido anteriormente, pode ser necessário consolidar a ligação da laje de betão à parede estrutural utilizando para isso varões de aço que sejam fixados na parede e posteriormente embebidos no betão.



Fig. 2.24 - Transmissão de esforços para a parede estrutural [77]

A substituição de vigas de madeira pode ser uma solução possível, no caso das condições encontradas não corresponderem aos requisitos mínimos pretendidos, podendo a troca passar pela aplicação de vigas de madeira maciça nova ou vigas de derivados de madeira. A escolha deve basear-se na capacidade resistente pretendida e basear-se na secção da viga, havendo o cuidado de escolher um elemento com capacidade resistente e secção proporcional aos elementos originais. A capacidade resistente semelhante às outras vigas do sistema estrutural permite uma correcta elaboração do pavimento, o que se não acontecer, pode levar à fissuração do pavimento e possível rotura deste, provocada pelas diferentes deformações das vigas. A escolha da secção deve também ter em conta o aspecto visual do pavimento, ou seja, deve manter-se, se possível, a secção da peça original para que não haja uma dissonância arquitectónica.

2.5.3. COFRAGEM

2.5.3.1. Levantamento do soalho existente

O levantamento do soalho existente só se executa no caso de não se pretender o seu aproveitamento para cofragem perdida. O soalho deve garantir a resistência quando sujeito à betonagem da laje. Durante a execução da laje de betão, é necessário haver movimentação de máquinas sobre o soalho bem como de pessoas, aumentando a sobrecarga aplicada. Se necessário deve-se recorrer ao escoramento do pavimento.

2.5.3.2. Cofragem

No caso de não se recorrer ao uso do soalho antigo para cofragem é necessário recorrer a cofragem existente no mercado que garanta a correcta execução do pavimento misto madeira-betão.

2.5.4. ESCORAMENTO

O escoramento deve ser realizado de forma a garantir a segurança da estrutura durante a execução dos trabalhos bem como deve garantir as flechas das vigas de madeira para que, durante a realização da obra, não se modifique a flecha inicialmente prevista. Se necessário, com o recurso ao escoramento, pode-se atribuir uma contra-flecha.



Fig. 2.25 - Escoramento do pavimento [19]

2.5.5. TRATAMENTO DAS MADEIRAS

A madeira como material que altera as suas propriedades quando se encontra em contacto com a água deve ser alvo de impermeabilização e tratamento químico apropriados, para que se possa posteriormente colocar o betão fresco e não haver transferência da água nem passagem de goma do betão para o soalho e zonas inferiores a este.



Fig. 2.26 - Tratamento da madeira [20]

2.5.6. ISOLAMENTOS

Nas reabilitações correntes introduzem-se sistemas de isolamento acústico e isolamento térmico, procedimentos obviamente opcionais no sistema misto madeira-betão.

O isolamento é geralmente colocado por cima do soalho, ficando sobreposto pela camada de betão. Se o pavimento prever a colocação de um tecto falso no piso inferior do pavimento, o isolamento pode ser colocado por baixo, sendo assim fixado à parte inferior do soalho. O isolamento colocado na parte superior do pavimento não fica sujeito a quebras, tendo assim um melhor comportamento.

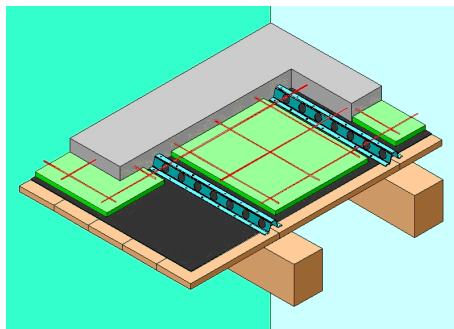


Fig. 2.27 - Isolamento colocado na parte superior do soalho de madeira

Relativamente ao isolamento térmico este é importante devido ao valor elevado de condutibilidade térmica que o betão apresenta pois, sendo este o material principal na constituição do pavimento, é o que mais influencia termicamente os espaços divididos pelo pavimento.

2.5.7. IMPERMEABILIZAÇÃO

A impermeabilização pode ser efectuada recorrendo a uma pintura adequada para o efeito ou a telas plásticas existentes no mercado devendo estas ser aplicadas de acordo com o sistema de ligação que se vai efectuar. No caso do soalho, ou seja cofragem, ser continuo em todo o pavimento deve-se efectuar a furação para colocação dos ligadores e só posteriormente se deve colocar a tela impermeabilizante, para que esta não se danifique.



Fig. 2.28 - Colocação da tela impermeabilizante [6]

Para evitar a passagem de água entre os materiais há ainda a possibilidade de, em vez de se colocar uma barreira, reduzir a água do betão através da introdução de aditivos.

Na colocação do betão é necessário ter em consideração a água pois esta, se não tiver uma barreira a separar o material madeira do material betão, migrará da água para a madeira. A madeira irá sofrer expandir devido a essa absorção de água o que pode provocar tensões que prejudiquem os sistemas de apoio. Outro factor relacionado com a existência de água é que, como o sistema engloba materiais distintos, a velocidade de secagem de cada material é diferente, o que origina esforços rasantes na ligação entre os materiais. Concluindo, a penetração de água tem um papel fulcral na degradação da madeira, devendo por isso ser evitada ao máximo.

As condensações também são perigosas, podendo resultar no apodrecimento da madeira, nomeadamente nas extremidades da viga

2.5.8. SISTEMA DE LIGAÇÃO

No processo construtivo, o sistema de ligação é o procedimento durante a execução da obra que mais variação pode sofrer. Consoante o sistema escolhido pode ser necessário proceder à abertura de calhas nas vigas ou apenas no soalho, bem como pode ser ou não necessário o uso de colas epoxi. De seguida, a título de exemplo, descreve-se um processo corrente de execução de um sistema misto que recorre a ligadores pontuais.

2.5.8.1. Furação

A furação do soalho deve respeitar a distância entre ligadores definida pelo projectista bem como deve respeitar os limites impostos pela dimensão das vigas de madeira. A furação deve ter em conta a largura da viga bem como a distância ao bordo da viga para que não haja diminuição da capacidade resistente do ligador, por este se encontrar muito próximo do limite da viga.

No caso do sistema recorrer a pregos a furação, se necessário, deve ser executada num diâmetro inferior ao diâmetro do prego.



Fig. 2.29 - Furação para posterior colocação dos ligadores [77]

2.5.8.2. Disposição dos ligadores

A disposição dos ligadores, como o próprio nome indica, é a colocação destes no respectivo furo. Há sistemas de ligação que são constituídos por duas ou mais peças, ou seja, é necessário proceder, por exemplo, ao aparafusamento de elementos independentes nas vigas de madeira.



Fig 2.30 - Disposição de ligadores [77]

2.5.9. COLOCAÇÃO DA ARMADURA

A fim de se evitar a fendilhação da lâmina de betão deve-se colocar uma rede electrossoldada, usualmente uma rede Ø6 20x20, devendo haver especial cuidado no recobrimento desta. O recobrimento deve ser garantido por dispositivos adequados para o efeito a fim de evitar que esta fique em contacto com a madeira no fim da betonagem ou que não fique totalmente recoberto pela camada de betão. Uma distância mínima ao ligador também deve ser definida e, na colocação da malha, garantida para que não haja variações na trabalhabilidade do ligador.



Fig. 2.31 - Rede electrossoldada [77]

2.5.10. BETONAGEM

O betão a ser colocado deve respeitar a classe imposta pelo projectista. Durante a colocação do betão, pode-se recorrer à vibração mas devido à pequena espessura da laje de betão, o controlo da vibração pode não ser tão rigoroso como o controlo efectuado em estruturas de betão armado. Contudo não deve ser desprezado já que a existência de uma armadura de fendilhação pode criar espaços de ar no interior da laje de betão.



Fig. 2.32 -Betonagem da lâmina de betão

2.5.11. RECOMENDAÇÕES

Seguidamente são descritas várias recomendações a ter em conta na execução de um pavimento misto.

a) O uso de madeira seca é altamente recomendado. Se isso não for possível deve-se ter a certeza que as fissuras não irão afectar os ligadores, ou seja, que o comportamento dos ligadores seja minorado por se encontrar nas proximidades de uma fenda. Sempre que possível, deve-se colocar a madeira em obra antes da execução dos trabalhos para que esta adquira as suas dimensões finais influenciadas pela humidade existente no local.

b) É recomendado o uso de anti-corrosivos nos ligadores de metal para que a água existente no betão e na própria madeira não degrade os ligadores.

c) O reforço do betão deve ser bem ponderado especialmente quando se pretende uma laje de betão de espessura um pouco maior. A armadura constituída, como já foi referido, por uma malha electrossoldada, deve ser colocada também na zona inferior do betão onde há tensões que poderão fendilhar o betão na ligação não visível betão-soalho, ou betão-cofragem.

d) O escoramento do pavimento deve ser previsto na definição dos trabalhos, não apenas para criar uma contra-flecha, mas também para suportar as cargas impostas pelo betão fresco. Deve ter-se em conta que uma espessura de betão de 5cm tem um peso de 125kg/m^2 , o que provoca à partida, uma deformação inicial não contabilizada.

e) Durante a execução da reabilitação é necessário proteger a madeira da água do betão e isto pode ser garantido, como já referido anteriormente, com o recurso a telas impermeabilizantes ou a aditivos que permitam reduzir a relação água/cimento no betão. A vantagem do uso deste tipo de aditivos associa-se à redução da retração do betão o que ao nível visual é melhor.

f) O tipo de madeira do sistema é um factor a ter em atenção no que se refere a esta poder modificar o tempo de secagem do betão tal como, por exemplo, no caso de madeira de *lariço* [21].

2.6. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

Com a necessidade de garantir a satisfação humana, tornou-se necessário encontrar formas de avaliação do comportamento dos produtos aplicáveis a um determinado elemento construtivo.

Para isso foi necessário definir exigências de desempenho. Pode-se definir exigência de desempenho como um requisito que permite avaliar de forma qualitativa ou quantitativa o comportamento do elemento de construção em fase de utilização.

A Directiva dos Produtos de Construção (DPC) publicada pela Comunidade Económica Europeia, agora União Europeia, introduziu o conceito de exigência essencial, definindo seis grupos de requisitos mínimos que as obras de construção devem respeitar de modo a poderem ser consideradas aptas para o uso durante o período de vida para o qual foram concebidas.

As seis exigências essenciais são:

- EE1-Resistência mecânica e estabilidade;
- EE2-Segurança em caso de incêndio;
- EE3-Higiene, saúde e ambiente;
- EE4-Segurança na utilização;
- EE5-Protecção contra ruído;
- EE6-Economia de energia e isolamento térmico.

2.6.1. RESISTÊNCIA MECÂNICA E DE ESTABILIDADE

i) Estabilidade mecânica do suporte

As vigas de madeira devem resistir ao aumento do peso próprio originado pela colocação da laje de betão e das camadas de acabamento. As cargas variáveis aplicadas à estrutura devem também ser consideradas consoante o tipo de uso a que a estrutura vai estar sujeita devendo a segurança ser garantida através de cálculos de acordo com o EN1995 1-1 [53], por exemplo, cumprindo todos os requisitos. O capítulo referente aos métodos de cálculo refere quais as limitações a que uma estrutura deste tipo deve estar sujeita.

ii) Estabilidade mecânica das ligações

As ligações entre os vários elementos do sistema misto madeira-betão devem garantir todos os critérios de segurança expostos no Eurocódigo 5, parte 1 [53], podendo ser determinados os respectivos valores de cálculo através da norma EN 26891 [58].

2.6.2. SEGURANÇA EM CASO DE INCÊNDIO

i) Reacção ao fogo

A reacção ao fogo é determinada pelos materiais constituintes do sistema. No caso dos revestimentos, estes são classificados de acordo com as classes nacionais que variam entre M0, materiais não combustíveis e M4, materiais facilmente inflamáveis. Outra forma de classificação são as euroclasses que classificam os revestimentos entre A e F.

As classes nacionais podem ser obtidas através dos ensaios descritos na E365 e E371 do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).

A norma europeia ENV 13381-7:2002 [59] define métodos de teste para determinar a resistência ao fogo dos diversos componentes estruturais, sendo que a parte 7 corresponde a elementos de madeira.

ii) Resistência ao fogo

A resistência ao fogo é um assunto complexo já que há vários factores que influenciam o comportamento do pavimento no caso da solução mista se encontrar em contacto com fogo.

A origem do fogo é um dos factores visto que o fogo pode ter início na parte superior do pavimento onde os primeiros elementos em contacto com a fonte de ignição são os revestimentos, normalmente inflamáveis e o betão, ou na parte inferior onde o componente do sistema misto que tem contacto com o fogo é a madeira, madeira esta que tem dupla funcionalidade, de revestimento e estrutural.

No caso do fogo ter origem na parte superior do sistema misto, a resistência dos revestimentos é variável consoante a classificação destes podendo permitir o contacto do fogo com o betão.

O betão se estiver em contacto com o fogo vai homogeneizar mais rapidamente a sua própria temperatura e, supondo que o ligador é o elemento mais frágil do sistema visto este poder plastificar com a temperatura, este vai deixar de trabalhar mais rapidamente do que se o fogo tivesse origem na parte inferior do pavimento, ou seja, pelo lado da madeira.

Concluindo, a escolha do sistema de ligação deve apoiar-se, não só na sua capacidade mecânica mas também no contacto, ou não, com o fogo da estrutura, visto se poder optar por sistemas de ligação que não recorram a ligadores de aço.

Para um melhor conhecimento da reacção ao fogo de um sistema misto madeira-betão é necessário efectuar ensaios não havendo normalização específica para este tipo de sistema.

2.6.3. HIGIENE, SAÚDE E AMBIENTE

Como o sistema não engloba revestimento não faz sentido referir características e especificações de desempenho relativamente a odores e resistência ao enodoamento bem como a limpeza.

2.6.4. SEGURANÇA NA UTILIZAÇÃO

i) Perfil geométrico do suporte

O pavimento não deve apresentar rugosidades ou saliências localizadas que possam provocar ferimentos. Como este sistema não engloba sub-sistema revestimento há apenas a ter em conta no dimensionamento da laje de betão, que esta tenha uma altura superior aos ligadores para que não haja saliências.

ii) Resistência à peladura

Como se trata de um pavimento, este deve ter um bom comportamento a temperaturas elevadas devido às diferentes actividades que se possam realizar independentemente da origem destas.

2.6.5. PROTECÇÃO CONTRA RUÍDO

O pavimento deve assegurar um isolamento sonoro adequado quer quanto à transmissão de ruídos aéreos, quer quanto à transmissão de ruídos por percussão.

2.6.6. ECONOMIA DE ENERGIA E ISOLAMENTO TÉRMICO

A solução madeira-betão sem qualquer tipo de isolamento térmico é uma má solução ao nível do comportamento higrotérmico isto porque existe uma laje de betão a separar dois espaços, tendo esta laje uma espessura muito reduzida. A condutibilidade térmica deve ser determinada de acordo com a norma EN 13986 [60] Para uma melhor solução, e se este sistema dividir espaços não aquecidos de espaços aquecidos o isolamento térmico deverá ser dimensionado de acordo com a legislação em vigor.

2.7.RESISTÊNCIA AO FOGO E CONFORTO ACÚSTICO

Ao longo dos anos as exigências acústicas e ao fogo foram cada vez mais levadas em conta pelos projectistas visto os regulamentos começarem a parametrizar estas duas componentes dos pavimentos. Os pavimentos de madeira tradicionais, ao apresentarem maus resultados ao nível de resistência ao fogo e conforto acústico, induziram a necessidade de criar formas de melhoria entre as quais o recurso a sistemas mistos madeira-betão.

A resistência ao fogo é melhorada significativamente com a introdução da camada de betão, camada essa que permite aos pavimentos mistos adquirirem uma resistência ao fogo na ordem dos 60 minutos e 90 minutos, F60 e F90 respectivamente [24]. Este facto permite a viabilidade de pavimentos de madeira em edifícios, já que os pavimentos de madeira, sem betão, apenas resistem a 30 minutos quando se encontram expostos ao fogo regulamentar, o que é insuficiente face aos regulamentos [9].

Ao nível do conforto acústico a qualidade é superior em sistemas que recorrem a laje de betão comparativamente a pavimentos de madeira usuais. A melhoria é garantida pela camada de betão, camada esta que origina um aumento de massa do sistema o que influencia directamente a resistência acústica.

Ensaio realizados no Laboratório de VTT, Finlândia, atribuem valores ao isolamento acústico deste tipo de pavimentos, avaliados segundo as normas EN ISO aplicáveis, para sons aéreos de 60dB e para sons de impacto de 51dB. O mesmo estudo conclui ainda que este tipo de solução, comparativamente aos pavimentos simples de madeira, apresenta um melhor desempenho em relação às vibrações induzidas pelo caminhar das pessoas [9].

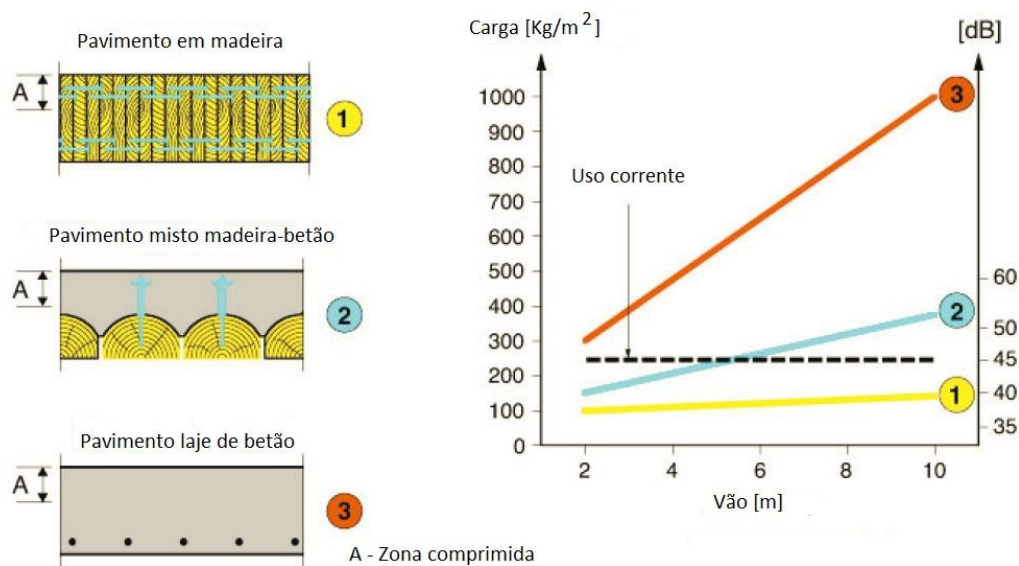


Fig. 2.33 - Resistência acústica de diferentes tipos de pavimentos (Adaptado de [24])

2.8. NORMAS APLICÁVEIS - AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO ESTRUTURAL

2.8.1. LIGADORES

EN 912:1999 Timber fasteners - Specifications for connectors for timber

“Ligadores para madeira – Especificações para conectores de madeira”

EN 13271:2001 Timber fasteners - Characteristic load-carrying capacities and slip-moduli for connector joints

“Ligadores para madeira - Capacidade característica de carregamento e módulo de deslizamento de conectores”

EN 14545:2008 Timber structures - Connectors – Requirements

“Estruturas de madeira – Ligadores – Requisitos dos ligadores”

EN 14592:2008 Timber structures - Dowel-type fasteners - Requirements

EN 26891:1991 Timber structures - Joints made with mechanical fasteners - General principles for the determination of strength and deformation characteristics (ISO 6891:1983)

“Estruturas de madeira – ligações com conectores mecânicos – Princípios gerais para a determinação de esforços e deformações características”

2.8.2. SISTEMA ESTRUTURAL COMPLETO/MADEIRA

EN 383:2007 Timber Structures - Test methods - Determination of embedment strength and foundation values for dowel type fasteners

“Estruturas de madeira – Métodos de ensaio – Determinação da força de interacção de ligadores e respectivos valores base”

EN 408:2003 Timber structures - Structural timber and glued laminated timber - Determination of some physical and mechanical properties

EN 409:2009 Timber structures - Test methods - Determination of the yield moment of dowel type fasteners

“Estruturas de madeira – Métodos de ensaio – Determinação de valores de momentos de ligadores”

EN 1195:1997 Timber structures - Test methods - Performance of structural floor decking

“Estruturas de madeira – Métodos de teste – Performance de pavimentos estruturais”

EN 1912:2004 Structural timber - Strength classes - Assignment of visual grades and species

EN 14251:2003 Structural round timber - Test methods

“Madeira redonda estrutural – Métodos de ensaio”

3

SISTEMAS DE LIGAÇÃO

3.1. INTRODUÇÃO

A utilização de elementos estruturais sujeitos à flexão com secções compostas, é comum em estruturas de aço ou madeira, permitindo aumentar a sua resistência e rigidez. É assim possível tirar partido das propriedades mecânicas de cada material, criando uma estrutura mais interessante do ponto de vista da durabilidade, de resistência e da rigidez do conjunto. Contudo a ligação entre os materiais constitui um problema importante havendo a necessidade de recorrer a ligadores no caso de secções compostas madeira-betão.

As primeiras estruturas mistas madeira-betão utilizavam como sistemas de ligação, os sistemas correntemente usados nas ligações madeira-madeira. Os primeiros sistemas adaptados de ligações madeira-madeira foram assim os pregos e os parafusos. Ao longo dos anos outros sistemas de ligação foram sendo adaptados, de forma a maximizar o rendimento da ligação.

Pela sua simplicidade os sistemas que têm como base os pregos são os que tiveram, no início, mais atenção por parte dos investigadores, ao contrário do que acontece actualmente, procurando-se um ligador que responda a todas as necessidades, independentemente da sua forma.

Os ligadores, que geralmente têm como material principal o aço, a madeira ou o betão, são posicionados no plano de interacção entre os materiais com a função de transmitir esforços de deslizamento e impedir a separação desses elementos quando submetidos à flexão [25].

3.2. CARACTERIZAÇÃO DA LIGAÇÃO

Os sistemas de ligação das estruturas mistas madeira-betão podem ser caracterizados de acordo com diversos parâmetros. Por esse motivo sugere-se uma forma de classificação referida na figura seguinte para uma mais fácil caracterização das soluções disponíveis.

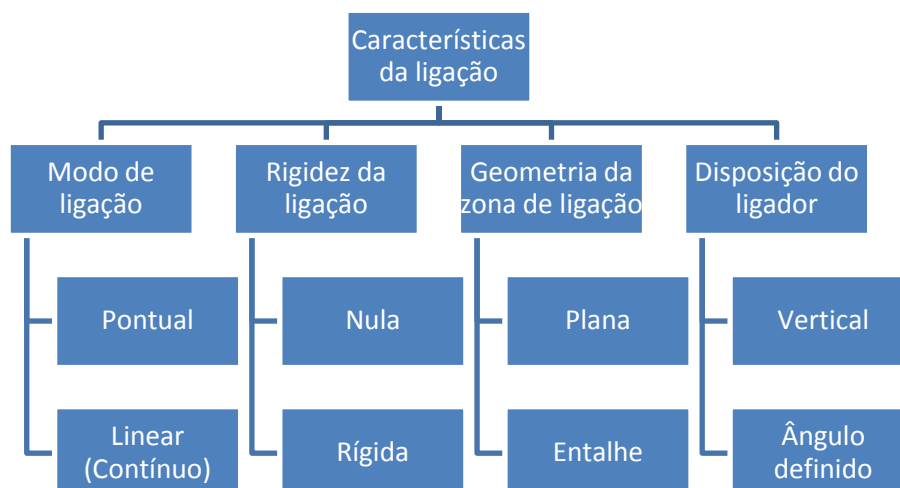


Fig. 3.1 - Caracterização da ligação

As ligações madeira-betão podem ser divididas de acordo com o modo de ligação, a rigidez da ligação, a geometria da zona de ligação ou ainda a disposição do ligador. Mais à frente são identificados diferentes tipos de ligação que serão caracterizadas de acordo com as características da ligação.

3.2.1. MODO DE LIGAÇÃO

A caracterização quanto ao modo de ligação admite a subdivisão em dois grupos distintos. A ligação pode ser definida como ligação pontual ou ligação contínua, consoante o ponto de ligação. Como ligação pontual são identificados os pregos, parafusos, cavilhas, entre outros. As ligações contínuas englobam as chapas metálicas bem como as saliências nas vigas.

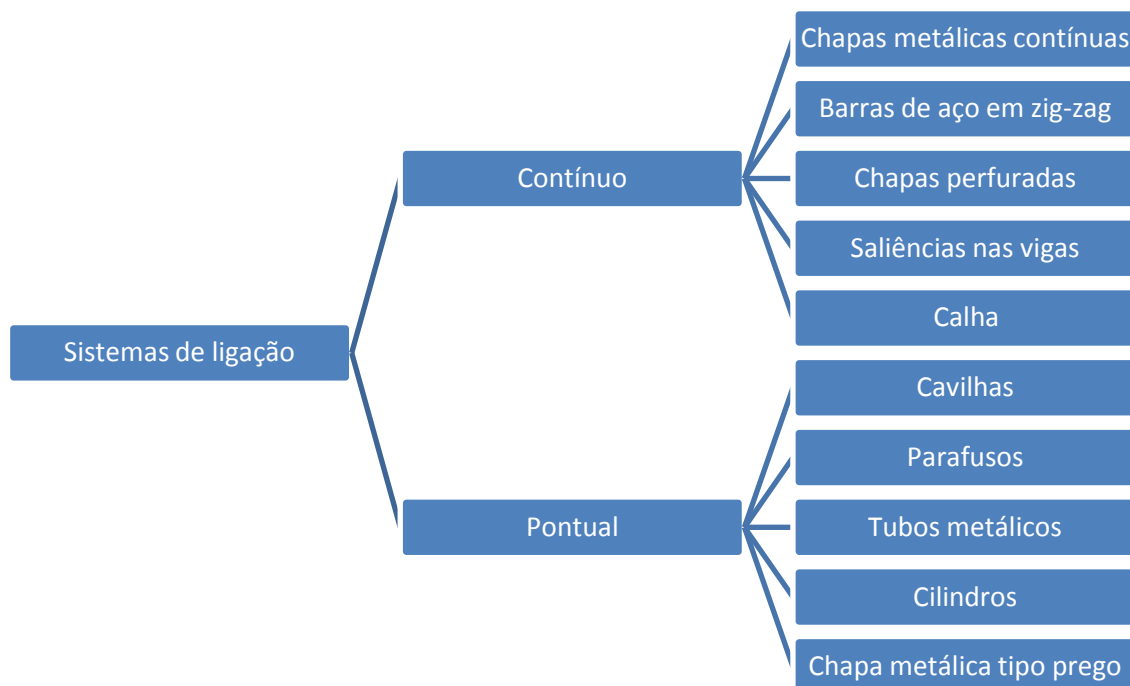


Fig. 3.2 - Modo de ligação

Nas figuras seguintes são identificados os diferentes modos de ligação.

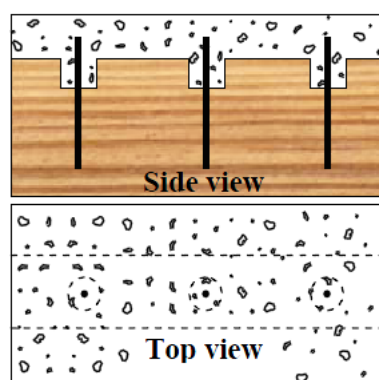


Fig. 3.3 - Ligação pontual [6]

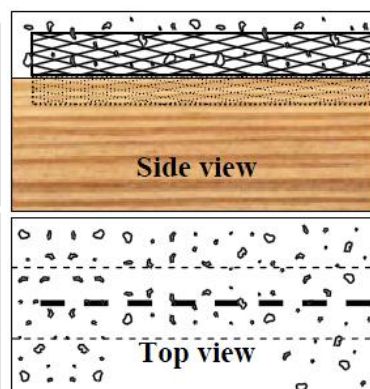


Fig. 3.4 - Ligação contínua [6]

Na prática os ligadores pontuais são os mais utilizados sendo aplicados de forma constante sobre os elementos de madeira evitando assim os efeitos provocados pela descontinuidade. Para efeitos de cálculo, considerando a rigidez do ligador uniformemente distribuída ao longo da ligação madeira-betão, tem-se uma rigidez unitária k/s .

3.2.2. RIGIDEZ DA LIGAÇÃO

A classificação de acordo com a rigidez da ligação permite definir uma ligação rígida ou uma ligação semi-rígida. Esta forma de classificação funciona num intervalo, podendo uma ligação apresentar uma rigidez próxima da rigidez máxima ou podendo, no extremo oposto, apresentar uma rigidez quase nula. A rigidez máxima é aceite quando os materiais se encontram perfeitamente solidarizados, não havendo escorregamento nenhum no plano de ligação, enquanto que, com a rigidez quase nula, os materiais trabalham praticamente de forma independente, não sendo aceite uma rigidez nula por se considerar um sistema misto, ou seja, se a rigidez for nula, não há interação entre os materiais e logo não podemos verdadeiramente falar de um sistema misto.

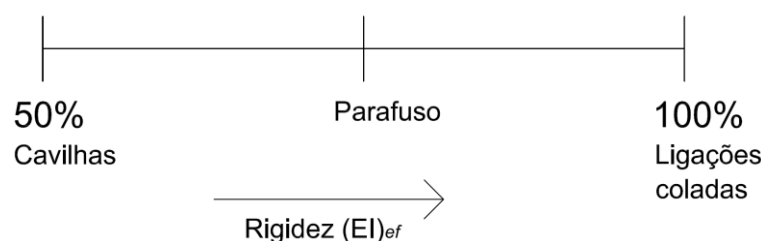


Fig. 3.5 - Rigidez da ligação

As ligações coladas podem ser obtidas com resinas epoxi enquanto as ligações semi-rígidas usam como ligadores: pregos, cavilhas, parafusos, perfis metálicos entre outros.

A vantagem das ligações flexíveis incide sobretudo na capacidade de deformação que este tipo de sistema apresenta. Um ligador flexível quando é sujeito a um carregamento crescente, após atingir a resistência máxima, pode continuar a deformar-se, sem rotura, permitindo que os ligadores vizinhos

absorvam os restantes esforços até atingirem a resistência máxima do sistema. Esta característica faz com que se explore ao máximo a eficiência do conjunto. (Malite, 2002. Fonte: [26])

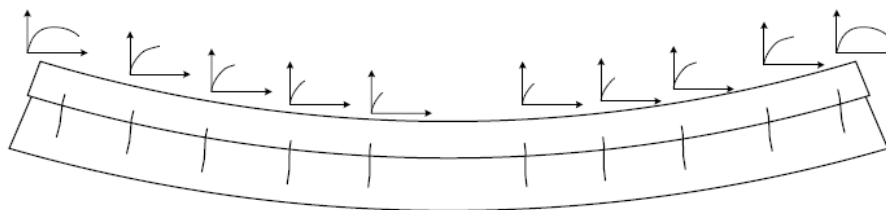


Fig. 3.6 - Esforços por ligadores [20]

As ligações flexíveis garantem assim uma rotura do tipo dúctil.

A característica estrutural mais importante dos ligadores é a relação existente entre a força F transmitida pelo ligador e o deslizamento relativo s na interface dos materiais, determinando o comportamento dúctil do sistema. O diagrama força no deslocamento encontra-se representado na figura seguinte (figura 3.7). (Malite, 2002. Fonte: [26])

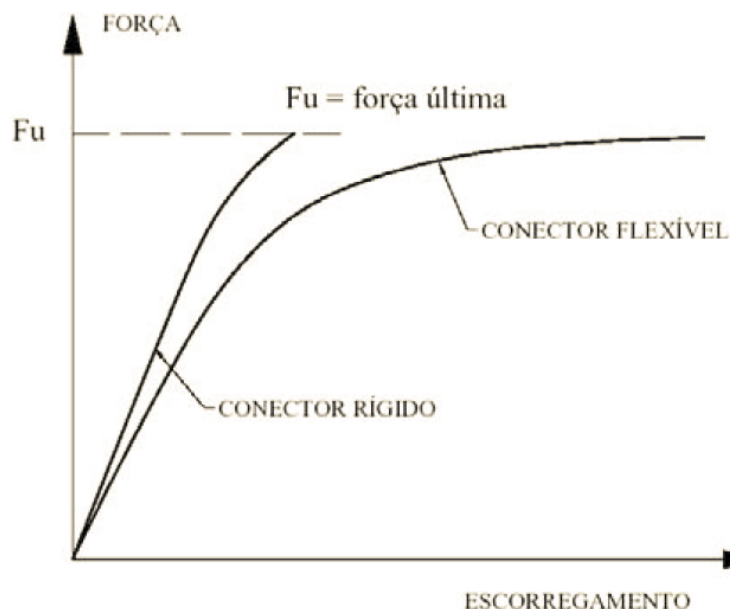


Fig. 3.7 - Curva força x deslizamento [26]

Importa referir que os métodos normalmente aplicados no cálculo de estruturas mistas madeira-betão distinguem-se de acordo com a rigidez da ligação. Se a ligação for rígida o teorema de Bernoulli pode ser aceite, bastando para isso homogeneizar a secção num só material. As equações de resistência dos materiais permitem conhecer rapidamente os esforços e as deformações da secção em estudo[27]. No caso da ligação apresentar um comportamento semi-rígido, no plano de interacção entre os dois materiais, há escorregamento que se relacionam directamente com o coeficiente de deslizamento. No capítulo 4 são estudados de forma mais profunda as ligações semi-rígidas. Na figura seguinte encontra-se representado o comportamento de secções com ligações rígidas e de secções com ligações semi-rígidas.

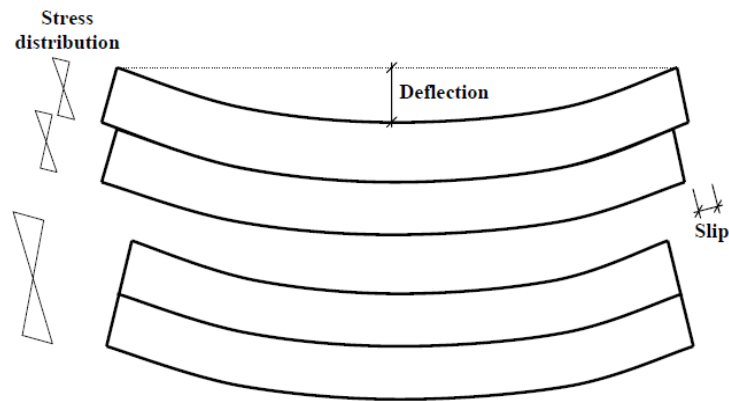


Fig. 3.8 - Deformação e distribuição de tensões de ligação semi-rígida e rígida [6]

3.2.3. GEOMETRIA DA ZONA DE LIGAÇÃO

A geometria da zona de ligação é um factor importante no comportamento da ligação. Um dos métodos mais eficientes de transmissão de esforços é por contacto directo dos materiais. Normalmente esse contacto é obtido pelo corte directo de cavidades na madeira ou simplesmente colando blocos de madeira às vigas de madeira, onde posteriormente se vai colocar o betão. No entanto, é de salientar que o uso de madeiras resinosas nas peças estruturais de madeira leva a que as deformações se tornem elevadas e significativas para o comportamento da ligação devido à alteração de área de contacto. [29].

Esta forma de ligação apresenta propriedades mecânicas em geral muito elevadas (capacidade de carga e módulo de deslizamento) estando por esse motivo na base das soluções utilizadas em estruturas de maior exigência estrutural [9].

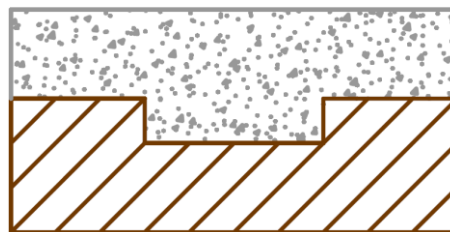


Fig. 3.9 - Cavidades na madeira

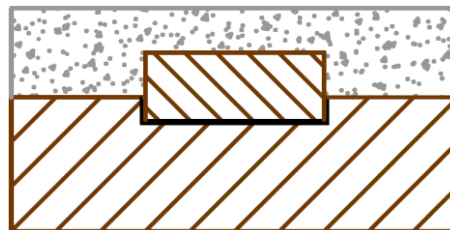


Fig. 3.10 - Placas de madeira coladas nos elementos estruturais de madeira

As cavidades na madeira podem ser realizadas de diversas formas, podendo alterar a geometria da cavidade bem como a forma das paredes [78].

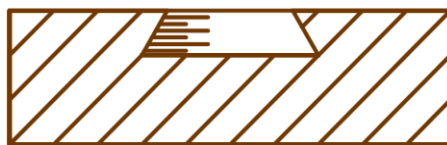


Fig. 3.11 - Cavidade com paredes inclinadas



Fig. 3.12 - Cavidade com paredes verticais

Os sistemas de ligação podem ainda ter como base as cavidades e englobar ligadores metálicos possibilitando diferentes resultados bem como diferentes soluções de ligação.

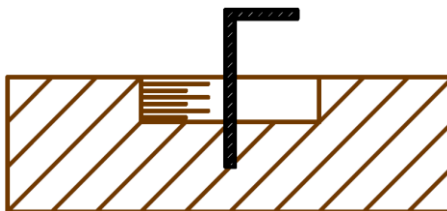


Fig. 3.13 - Ligação mista de ligador associado a cavidade

3.2.4. DISPOSIÇÃO DO LIGADOR

O ligador pode ser colocado em diversas posições para assim tirar partido da sua capacidade resistente. O uso de duplos ligadores tem vantagens ao nível dos esforços de deslizamento. Estes podem ser colocados paralelamente ou em cruz.



Fig. 3.14 - Ligadores dispostos paralelamente [9]

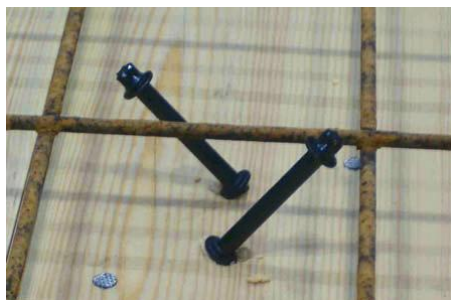


Fig. 3.15 - Ligadores cruzados [9]

No estudo de soluções que englobem ligadores inclinados é necessário ter o devido cuidado na escolha do ligador, visto que estes vão estar sujeitos a esforços de arrancamento, o que determina que não se deve recorrer a pregos ou cavilhas simples.

3.3. PRINCIPIO DE FUNCIONAMENTO

O princípio de funcionamento da ligação num sistema misto madeira-betão pode ser classificado em quatro categorias [9]:

- Ligação por atrito;
- Ligação colada;
- Ligação por contacto directo entre madeira-betão;
- Ligação por interposição de elementos metálicos.

As quatro categorias foram identificadas tendo por base a transmissão de esforços. Este critério não pretende assim classificar ligadores mas sim formas de ligação.

A ligação por atrito é subdividida em dois grupos ou mecanismos. O primeiro é o atrito propriamente dito entre os dois materiais e o segundo é a adesão ou aderência natural, sendo esta do foro químico. Lehmann, nos seus estudos, demonstra a possibilidade de obter estruturas com comportamento misto usando apenas esta forma de ligação [9]. É de salientar que o atrito representa uma parcela importante, quando utilizado em conjunto com outro tipo de ligação.

As ligações coladas são as que apresentam melhores resultados em termos de rigidez. É possível considerar a ligação entre os materiais como sendo perfeita. A durabilidade da colagem bem como o comportamento sob acções de longo prazo e na presença de variações das condições higrométricas são os principais factores de estudo para esta forma de ligação [9]. Esta categoria absorve também as ligações que recorrem a colas para ligar os elementos do sistema, como é o caso de aço à madeira.

Ligações por contacto directo entre madeira e betão são caracterizadas pela transmissão de esforços por contacto directo entre os dois materiais. Este tipo de solução traz vantagens em estruturas de maior exigência estrutural porque há um aumento da capacidade de carga da estrutura bem como há um aumento no módulo de deslizamento [9]. O facto de haver um material embutido no outro material que faz parte do sistema misto possibilita a transferência de esforços de corte entre os materiais.

O uso de ligadores recorrendo à técnica do entalhe permite demonstrar o equilíbrio das forças de ligação.

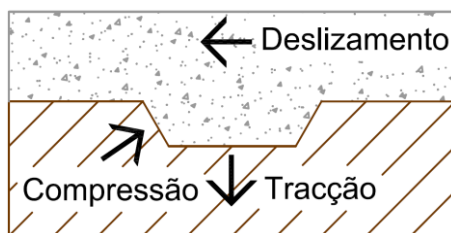


Fig. 3.16 - Esforços actuantes na cavidade realizada na madeira

Neste tipo de sistema de ligação devem ser tomadas precauções de forma a evitar o levantamento da camada de betão, devendo sempre que possível dispor ao longo do plano de ligação, ligadores que resistam a esforços de tracção [13]. Uma solução viável consiste na interacção deste sistema de ligação com o que recorre a colagem.

As ligações que têm por base a colagem podem ser consideradas como tendo um comportamento misto perfeito, para efeito de projecto e dimensionamento de estruturas mistas madeira-betão, podendo admitir-se uma análise global da estrutura através de uma homogeneização da secção e recorrendo ao teorema de Bernoulli, conforme foi referido anteriormente. Contudo deve-se ter um cuidado especial neste tipo de análise porque a capacidade de carga é limitada, capacidade esta que depende essencialmente da qualidade e da resistência da colagem [9].

As ligações por interposição de elementos metálicos são ligações que têm por princípio de funcionamento a utilização de elementos metálicos contínuos ou isolados consoante o modo de contacto dos elementos constituintes do sistema misto.

No caso das ligações isoladas (pregos, parafusos, varões cravados ou colados), o elemento de ligação pode ser caracterizado como sendo ligadores tipo cavilha onde os esforços a que se encontram sujeitos são a flexão e o corte. Na bibliografia são designados como ligadores "*dowel type*". Neste tipo de ligações é provocado o esmagamento da madeira e/ou do betão e/ou a plastificação do ligador, conforme é admitido pela teoria de Johansen.

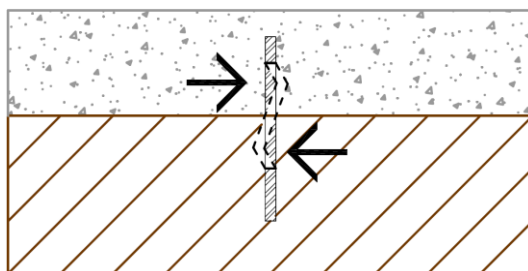


Fig. 3.17: Esmagamento na madeira

Pode-se subdividir a categoria de acordo com o tipo de esforços que são transmitidos, podendo haver apenas esforços de corte, quando se utilizam cavilhas e uma camada intermédia. A subcategoria referente a esforços de flexão e corte corresponde às situações onde não há utilização de camada intermédia entre a madeira e o betão. Pode-se definir uma última categoria correspondente ao esforço axial onde o ligador é fixado com um ângulo previamente definido e de acordo com o Eurocódigo 5, parte 2 [61], criando assim uma esforço de tracção no ligador e um esforço de compressão no betão [13].

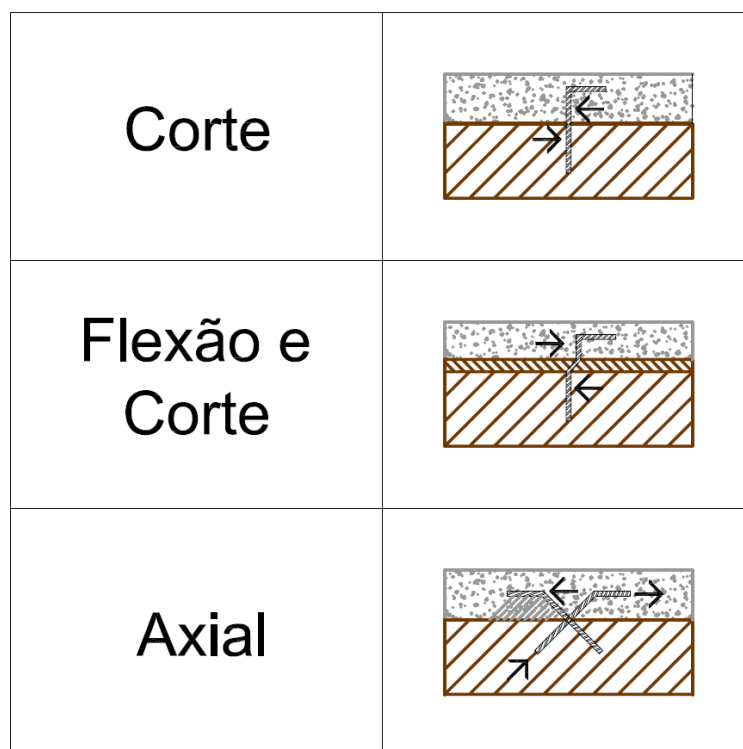


Fig. 3.18 - Esforços de corte, flexão e corte e axial em sistemas mistos

3.4. LIGADORES TRADICIONAIS - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Ceccotti no seu estudo apresentado em [2] refere que elementos ligados por pregos, cavilhas e parafusos são menos rígidos do que ligações que têm por base o uso de anéis, tubos de aço e placas dentadas. Ligações mais rígidas são as que utilizam barras de aço com cavidades na madeira. Com uma rigidez quase perfeita podemos apenas referir as ligações coladas.

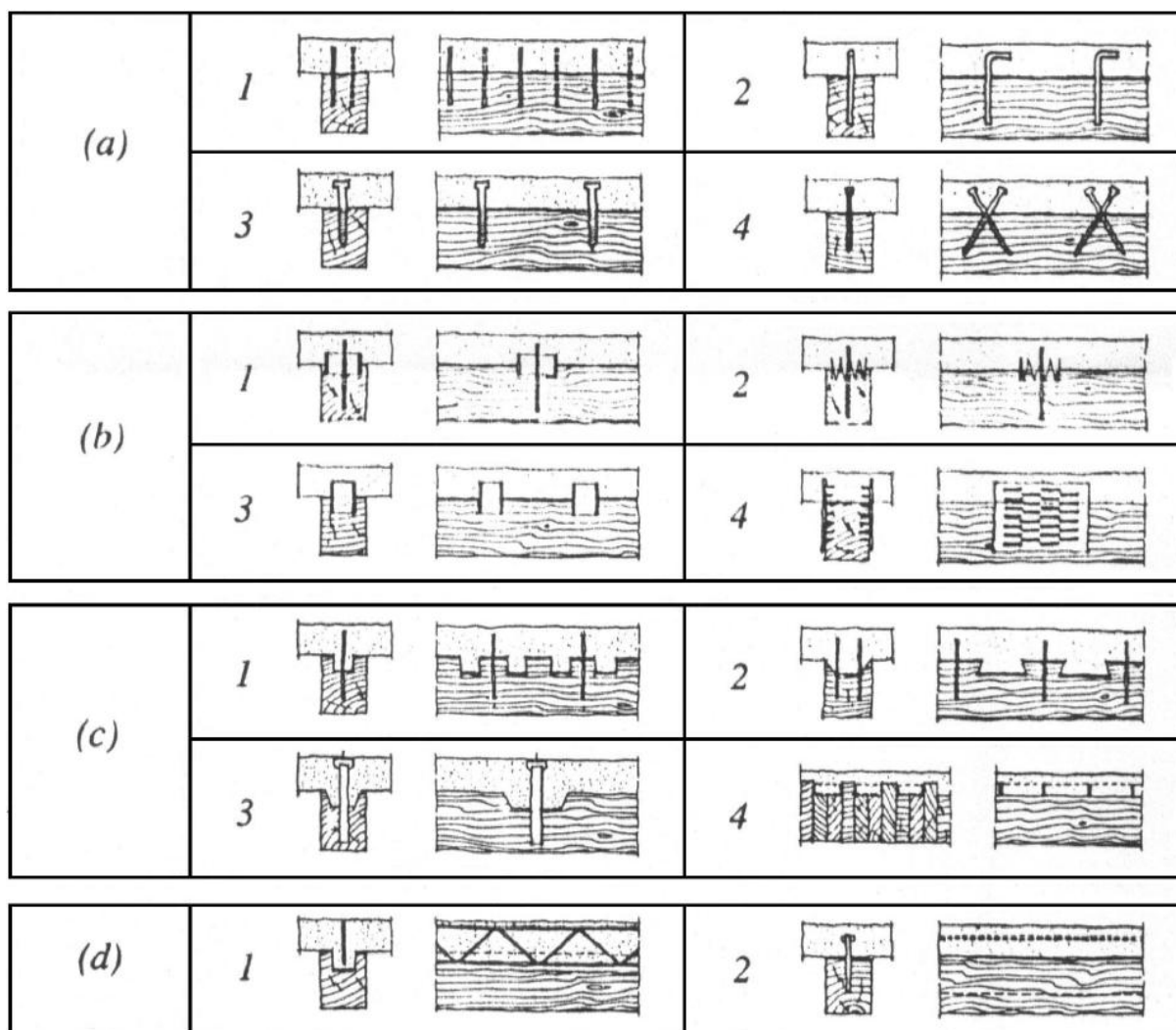


Fig. 3.19 - Exemplos de sistemas de ligação para sistemas mistos madeira-betão [2]. Legenda: (a1) Pregos; (a2) Cavilhas em L; (a3/4) Parafusos; (b1/2) Anéis e Placas metálicas denteadas respectivamente; (b3) Tubo de aço; (b4) Chapas de pregar; (c1) Cavidades redondas na madeira e ligadores para prevenir o arrancamento; (c2) Cavidade quadrada com ligadores; (c3) Cavidade com ligadores pré-esforçados; (c4) Tábuas de madeira pregadas com placas de aço dispostas nas juntas de ligação; (d1) Trelíça de aço colada na madeira; (d2) Placa de aço colada na madeira

Outros estudos chegam à mesma conclusão, como é o caso de Racher (Fonte: [28]) que comparou o comportamento de diversos tipos de ligadores mecânicos, chegando a conclusões semelhantes a Ceccotti (figura 3.20).

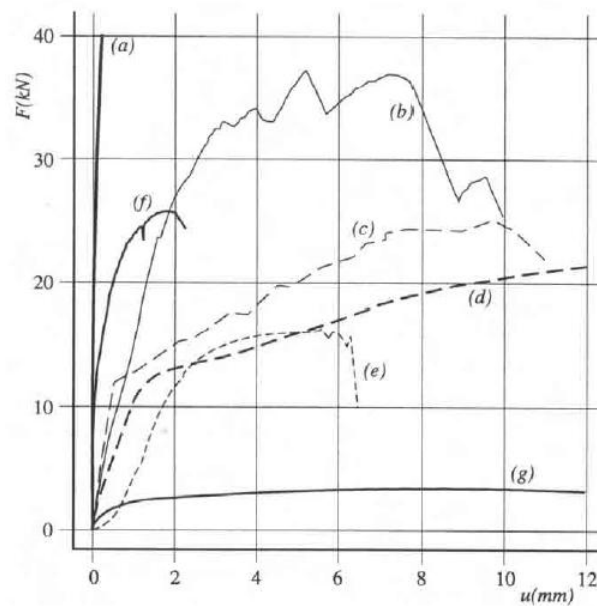


Fig. 3.20 - Comportamento de diferentes tipos de ligação, curvas carga x deslizamento. (Racher, 1995. Fonte: [28]). Legenda: (a) Ligação colada de $12,5 \times 103 \text{ mm}^2$; (b) Anel paralelo de 100mm de diâmetro; (c) Ligador de anel macho e fêmea com peça denteada; (d) Cavilha de 14mm de diâmetro; (e) Parafuso de porca; (f) Chapa de pregar; (g) Pregos de 4,4mm de diâmetro

Colombo caracterizou também o comportamento de ligadores verticais, estudando os diferentes comportamentos consoante a disposição do ligador e geometria da zona de ligação. O estudo compara a rigidez de ligações realizadas com conectores verticais, conectores em X e conectores colocados em calhas. Os resultados encontram-se expostos nos gráficos seguintes (figura 3.21).

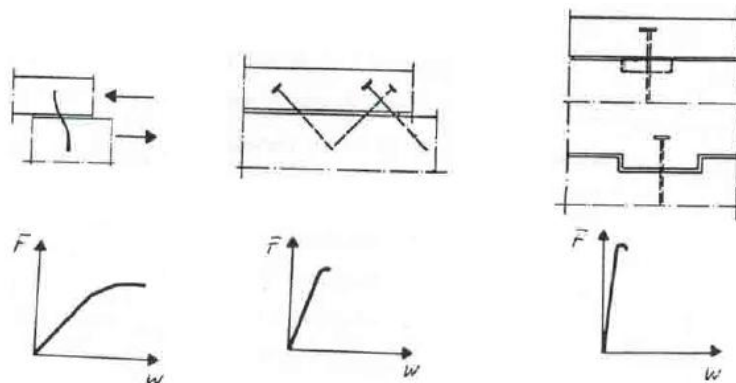


Fig. 3.21 - Tipo de ligações e respectivos modelos gráficos força x deslocamento (Colombo, s/d. Fonte: [28]). (a) Ligações verticais; (b) Ligadores dispostos em X; (c) Ligadores dentro de cavidade

3.5. MÓDULO DE DESLIZAMENTO

3.5.1. INTRODUÇÃO

Módulo de deslizamento é o parâmetro que quantifica a flexibilidade de uma ligação sendo este definido com base na força aplicada sobre um ligador relacionada com o deslizamento (deslocamento) provocado (figura 3.22).

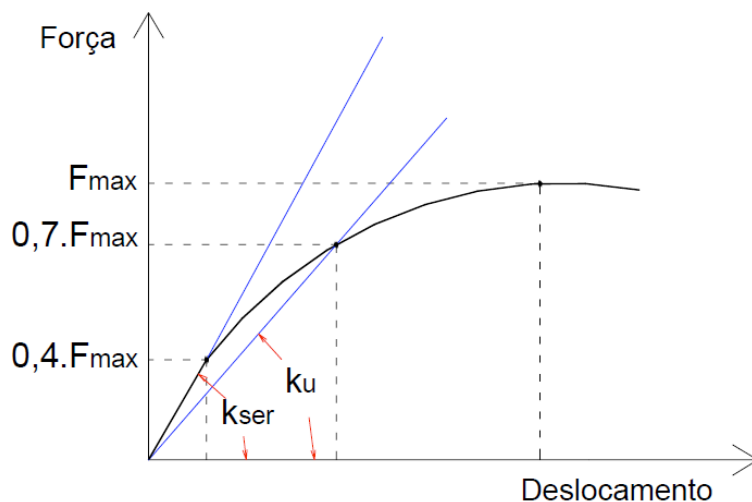


Fig 3.22 - Módulo de deslizamento para ligadores verticais (Barras de aço, pregos e parafusos) [30]

Normalmente o comportamento de um ligador é definido como linear mas a maioria dos diagramas força/deslizamento dos ligadores apresentam um comportamento não linear.

Existem dois tipos de módulo de deslizamento: k_{ser} correspondente aos Estados-limite de utilização e k_u que se refere ao módulo de deslizamento nos Estados-limite últimos.

O módulo de deslizamento k_{ser} é definido no diagrama apresentado como a tangente da curva força/deslizamento no momento em que a carga é 40% da carga máxima prevista para a ligação. Até este patamar considera-se que a ligação tem um comportamento linear, elástico para efeitos de dimensionamento.

Em relação ao Estado-limite último, o valor do módulo de deslizamento corresponde à intercepção da curva no patamar de 70% da carga máxima prevista. Uma aproximação a este valor é aceitável através da relação seguinte.

$$k_u = \frac{2}{3} k_{ser} \quad (3.1)$$

3.5.2. COMPORTAMENTO MECÂNICO DE LIGAÇÕES MADEIRA-LIGADOR METÁLICO

A Teoria de Johansen constitui o modelo formal no qual se baseiam as regras de dimensionamento, preconizadas no EC5 1-1 [53], para ligadores tipo cavilha (pregos, agramos, parafusos de enroscar e de porca e cavilhas propriamente ditas), sujeitos ao corte [5].

Johansen assume que a carga máxima admitida para uma ligação madeira-madeira é definida pela plastificação do ligador ou pelo esmagamento da madeira. Johansen afirma ainda que a capacidade de carga da ligação corresponde ao somatório de dois efeitos. O primeiro efeito é o "efeito cavilha" que depende da resistência do parafuso à flexão e da resistência da madeira ao esmagamento (figura 3.23).

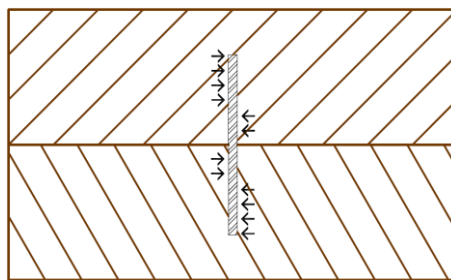


Fig. 3.23 - Efeito cavilha (Teoria de Johansen)

O segundo efeito é designado como "efeito da tensão" e depende da capacidade do parafuso resistir à tensão de arranque bem como ao atrito exercido pelas superfícies da madeira e do aço (figura 3.24) [31].

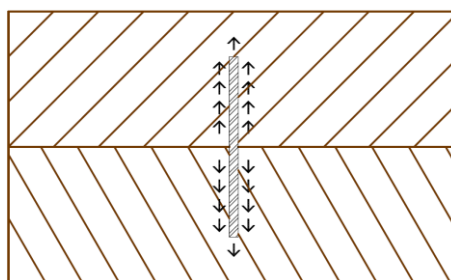


Fig. 3.24 - Efeito da tensão (Teoria de Johansen)

A teoria de Johansen não se aplica apenas a ligações madeira-madeira podendo ser aplicada a ligações madeira-aço e madeira-betão. Um estudo mais detalhado da ligação madeira-betão encontra-se descrito no capítulo 4.

3.5.3. VALORES EXPERIMENTAIS DE K_{SER} (OBTENÇÃO DOS VALORES)

A madeira, devido às suas propriedades, é um material que não permite realizar ligações perfeitamente rígidas, excepto por colagem. Por esse facto a rigidez da ligação deve ser caracterizada pelo módulo de deslizamento, devendo este ser determinado de acordo com resultados experimentais obtidos com base nos pressupostos descritos na EN26891 [58]. Na bibliografia encontram-se diversos estudos na área.

A não existência de norma específica para ligações madeira-betão levou a que os investigadores recorressem à norma EN26891[58], norma que define o ensaio de ligações usando ligadores metálicos em estruturas de madeiras. O ensaio consiste em sujeitar um provete a uma força de compressão originando planos de corte nas ligações, ligações essas onde se encontram os ligadores.

Durante o ensaio deve-se ter em atenção a migração de água de um material para o outro, do betão para a madeira, devendo ser previamente acautelado o controlo dessa probabilidade, recorrendo ao uso de uma película plástica em torno do elemento de madeira. A película de plástico tem dupla finalidade já que anula também o atrito entre as faces do betão e da madeira.

A norma EN 26891[58] define um programa de carga com ciclo de carga/descarga. Na figura seguinte encontra-se detalhado o comportamento da carga aplicada ao longo do tempo.

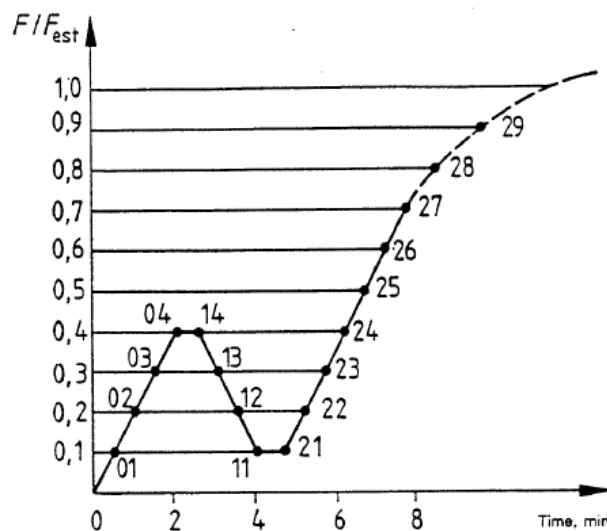


Fig. 3.25 - Comportamento da carga aplicada [58]

O parâmetro definido como F_{est} é referido na norma como uma estimativa da carga da ligação. A estimativa assenta em ensaios preliminares ou por comparação com outros ensaios, devendo ser ajustada posteriormente se os valores médios obtidos ao longo do ensaio ultrapassarem pelo menos em 20% o valor da carga estimada.

O ensaio tem uma primeira parte de carregamento, onde há a aplicação de uma força crescente até $0,4F_{est}$. Nesse instante, a força aplicada é mantida num intervalo de 30 segundos. Passado o tempo é reduzida até $0,1F_{est}$ e de novo mantida durante um intervalo de tempo de 30 segundos. A partir deste patamar, representado na figura anterior, é aplicada de novo a carga até ao valor máximo ou até a um escorregamento superior a 15 mm.

A exigência de manter por 30 segundos a carga aplicada de forma constante não é para efeitos de fluência mas sim para possibilitar a inversão da carga a aplicar.

Abaixo de $0,7F_{est}$ a carga deve ser aplicada de forma gradual correspondente a $0,2F_{est}$ por minuto $\pm 25\%$. Acima de $0,7F_{est}$ a carga deve ser incrementada com o recurso ao deslocamento que deve ter uma velocidade constante até se atingir o valor da carga máxima ou um deslocamento de 15mm, de forma a que a parte final do ensaio tenha uma duração de 3 a 5 minutos implicando uma duração total do ensaio entre 10 e 15 minutos.

A carga máxima, $F_{máx}$, dá informação sobre a capacidade de carga máxima da ligação enquanto que o módulo de deslizamento fornece informação sobre o comportamento da ligação (carga-deslocamento), na fase elástica. O valor da carga máxima é obtido directamente da curva anteriormente referida enquanto que o módulo de deslizamento é obtido recorrendo a parâmetros contidos na referida curva. Os parâmetros são o v_{01} que corresponde ao deslocamento medido no momento em que é aplicada 10% de carga estimada e o parâmetro v_{04} que corresponde ao deslocamento quando é aplicado 40% da carga estimada. O módulo de deslizamento é então obtido pela fórmula (3.2).

$$k_s = \frac{0,4F_{est}}{\frac{4}{3}(v_{04} - v_{01})} \quad (3.2)$$

O Eurocódigo 5 [53] define ainda que o módulo de deslizamento é designado como K_{ser} , e obtido recorrendo à carga máxima estimada e a dois pontos de deslizamento da ligação. O módulo de

deslizamento é K_{ser} , no Estado-limite de utilização, enquanto que no Estado-limite último é considerado como $2/3$ de K_{ser} , como atrás se refere.

Conforme já referido, o ensaio deve ser reajustado sempre que se ultrapasse 20% da carga estimada. O processo de reajuste é normalmente exacto se o comportamento das juntas for perfeitamente elástico-linear até pelo menos 40% da carga máxima. Isto acontece na maior parte dos casos em que se utilizam ligações coladas e ligações de entalhe, mas o uso de ligadores correntes de cavilha têm um comportamento não linear logo desde o início do teste. Neste caso, o valor da carga estimada bem como os pontos onde são determinados os deslocamentos têm uma grande influência na determinação do módulo de deslizamento [6].

Segundo Dias, as diferenças nos valores obtidos podem ser definidas de duas formas: ou há a possibilidade de haver diferentes módulos de deslizamento para a mesma ligação dependendo apenas de F_{est} , ou há a possibilidade de haver valores superiores de módulo de deslizamento para ligações flexíveis, devido ao comportamento das ligações acima dos 40% de F_{est} .

Para comprovar, Dias [6] realizou um estudo calculando, de três formas diferentes o módulo de deslizamento em ligações aparafusadas. Uma forma foi usando F_{est} igual ao valor exacto da carga máxima, outra forma com um valor inferior (80% da carga máxima) e por fim com um valor superior ao valor da carga máxima, mais concretamente a 120%. O gráfico seguinte dá a curva carga-deslizamento bem como as curvas correspondentes ao módulo de deslizamento calculado usando os diferentes valores de cargas.

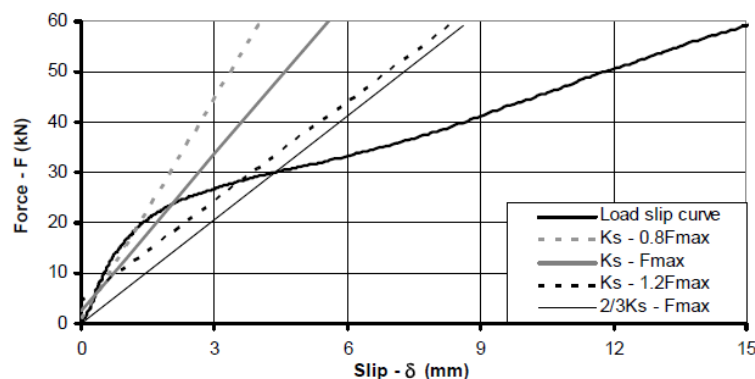


Fig. 3.26 - Rigidez da ligação madeira-betão aparafusada usando diferentes valores de F_{est} e com o módulo de deslizamento calculado como indicado no Eurocódigo 5 [6]

Tabela 3.1 - Módulo de deslizamento para diferentes valores de F_{est} [6]

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

Os resultados apresentados mostram claramente a influência do parâmetro F_{est} na determinação do módulo de deslizamento. É visível que os valores obtidos são claramente superiores para valores inferiores de carga estimada em comparação com valores superiores de carga estimada. Conclui-se com isto que as diferenças obtidas para o módulo de deslizamento são em alguns casos superiores a

100%, apesar de os testes seguirem o regulamentado, e apenas mudando os valores da carga máxima estimada. Dias afirma ainda que nos seus estudos notou que a velocidade do teste é mais elevada para cargas estimadas mais elevadas influenciando assim o valor da deformação, embora a ordem de grandeza destas variações seja inferior às referidas anteriormente [6].

A segunda situação referida por Dias é admitir uma ligação fictícia com o mesmo comportamento carga-deslocamento de uma ligação normal até ao valor de 40% da carga máxima. A partir desse valor admite-se um rendimento constante ao longo do gráfico. O módulo de deslizamento é então calculado para as duas ligações, definindo previamente que a carga estimada é igual à carga máxima. Com este estudo, Dias chega aos resultados de 10kN/mm para uma ligação com um comportamento normal e 22kN/mm para uma ligação com o comportamento de patamar conforme se encontra no gráfico seguinte.

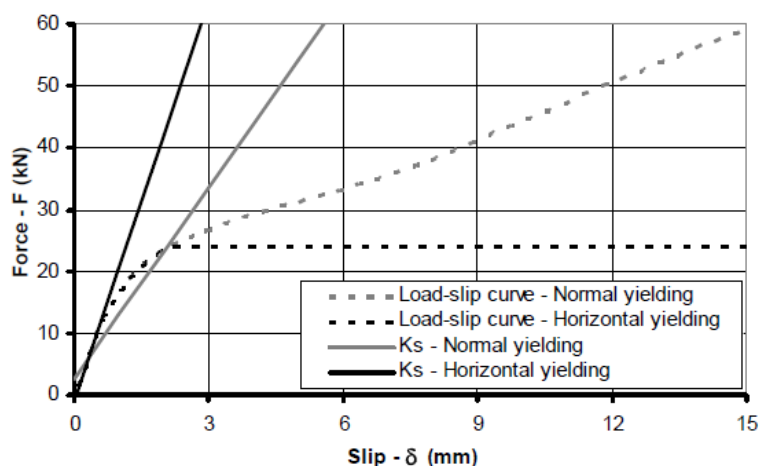


Fig. 3.27 - Curvas carga-deslizamento e rigidez das ligações com aumento constante de carga após o patamar[6]

De forma a obter o mesmo módulo de deslizamento para a ligação fictícia, a deformação deve ser multiplicada pelo factor 2. Estes resultados mostram que as ligações com comportamentos semelhantes de carga-deslizamento podem ter valores de módulo de deslizamento muito diferentes entre si, ou ligações com valores semelhantes de módulo de deslizamento podem ter diagramas carga-deslizamento muito diferentes entre si [6].

Dias considera que a relação (expressão (3.3)) pode levar a comportamentos carga-deslizamento que não representam o comportamento real de uma ligação. Na figura 3.26 encontra-se representado um exemplo disso, mais concretamente na deformação atingida na carga máxima que é de 15mm, valor este que é quase o dobro do esperado que seria de 8mm. Este problema é causado pela diferença na rigidez, antes e depois da variação do comportamento da ligação. O valor do k_u é baseado na rigidez da ligação, quando esta apresenta um comportamento elástico-linear, mas o deslizamento no estado último é altamente influenciado pela rigidez depois da alteração de comportamento [6].

$$k_u = \frac{2}{3} k_s \quad (3.3)$$

3.5.4. DEFINIÇÃO NO EC5

O Eurocódigo 5 [53] propõe expressões para a determinação do módulo de deslizamento, utilizando como sigla K_{ser} ao contrário da norma EN26891[53] que utiliza K_s . O Eurocódigo define que para

ligações com ligadores tipo cavilha, o módulo de deslizamento, K_{ser} , por plano de corte e por ligador, para uma determinada carga de serviço deverá ser dado pelo quadro seguinte com ρ_M em kg/m³ e d ou d_c em mm. (d_c encontra-se definido na EN912 [62])

Tabela 3.2 - Valores de K_{ser} para ligadores (em N/mm) no caso de ligações madeira-madeira e madeira-placas de derivados de madeira [53]

Tipo de ligador	K_{ser} (Módulo de deslizamento)	
Cavilhas		
Parafusos de porca com ou sem folga ¹	$\frac{\rho_M^{1,5} d}{23}$	(3.4)
Parafusos de enroscar		
Pregos (com pré-furação)		
Pregos (sem pré-furação)	$\frac{\rho_M^{1,5} d^{0,8}}{30}$	(3.5)
Agrafos	$\frac{\rho_M^{1,5} d^{0,8}}{80}$	(3.6)
Aneis do tipo A segundo a EN 912	$\frac{\rho_M d_c}{2}$	(3.7)
Aneis do tipo B segundo a EN 912		
Placas denteadas tipos C1 a C9 segundo a EN 912	$\frac{1,5 \rho_M d_c}{4}$	(3.8)
Placas denteadas tipos C1 a C9 segundo a EN 912	$\frac{\rho_M d_c}{2}$	(3.9)
¹ A folga deve ser adicionada separadamente à deformação		(3.10)

A massa volúmica ρ_k , para a união madeira-betão deve ser homogeneizada tal como para a ligação madeira-madeira. A massa volúmica deve então obedecer à expressão (3.11), onde ρ_B é a massa volúmica do betão e ρ_M é a massa volúmica da madeira.

$$\rho_k = \sqrt{\rho_B \cdot \rho_M} \quad (3.11)$$

Como se trata de um sistema misto madeira-betão, o Eurocódigo permite que apenas se utilize a massa volúmica da madeira, sem ser necessário homogeneizar, e deve-se multiplicar o resultado pelo valor 2 para que se obtenha o módulo de deslizamento pretendido.

O método referido no Eurocódigo para determinar o módulo de deslizamento, é baseado em modelos empíricos propostos por Ehlbeck e Larsen. Como referido na tabela, o módulo de deslizamento é baseado na massa volúmica da madeira e no diâmetro do ligador.

Na bibliografia encontram-se diversos estudos que demonstram que o comportamento mecânico da estrutura mista madeira-betão é mais influenciado pelo módulo de deslizamento do que propriamente pela capacidade de carga máxima. [32] O Eurocódigo sugere que, à falta de resultados experimentais, o valor do módulo de deslizamento seja o dobro para a ligação madeira-betão do que o definido para uma ligação madeira-madeira, como já foi anteriormente referido. Alguns autores consideram que esta relação não é correcta, visto que o valor da rigidez da ligação obtida numa ligação madeira-madeira deve ser multiplicado por 2 para considerar a maior rigidez do betão. Com isto, o cálculo assume que não há deformação no betão [6].

3.5.5. MÓDULO DE DESLIZAMENTO DE DIVERSOS LIGADORES

Devido à dificuldade de avaliar alguns parâmetros, Turrini e Ceccotti propuseram expressões para a determinação do módulo de deslizamento baseando-se em resultados experimentais e obtiveram, em alguns casos, aproximações razoáveis [32].

Ambos os investigadores definiram que o módulo de deslizamento se obtém partindo do diâmetro do ligador, d , e do módulo de elasticidade da madeira, E , ao contrário de se utilizar a média da densidade da madeira [27].

Tabela 3.3 - Expressões de k_{ser} propostas por diferentes investigadores

Investigador	Expressão
Turrini	$K_{ser} = 0,08 E d$ (3.12)
Ceccotti	$K_{ser} = 0,125 E d$ (3.13)

Na figura seguinte, encontram-se representados diversos estudos realizados por diferentes investigadores onde se compararam valores referentes às expressões propostas por Turrini e Ceccotti, bem como através do proposto pelo Eurocódigo 5 [53].

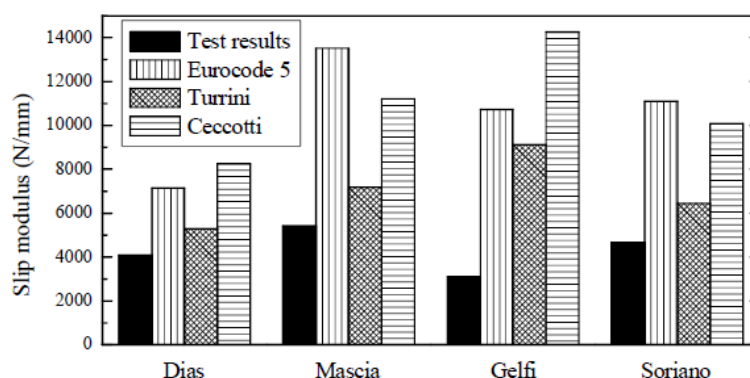


Fig. 3.28 - Comparação dos resultados experimentais do módulo de deslizamento e os valores propostos por o Eurocódigo 5, por Turrini e Ceccotti [32]

No caso da existência de uma camada intermédia, reutilizando o soalho existente, Gelfi vai ainda mais longe propondo a seguinte expressão (expressão 3.14) [33].

$$K_{ser} = \frac{12E_A I_A}{l^*3} \quad (3.14)$$

Na expressão (3.14), E_A é o módulo de elasticidade do ligador, I_A é o momento de inércia do ligador e l^* é o comprimento ideal do ligador, sendo definido por (expressão (3.15)):

$$l^* = 17,3 - 0,000572k_B - 0,00894k_M + 0,880t + 4,34d \quad (3.15)$$

Definem-se ainda k_B e k_M como a rigidez do betão e da madeira respectivamente. Na expressão, t é a espessura da camada intermédia e d é o diâmetro do ligador.

O método referido apresenta algumas limitações como por exemplo os diâmetros do ligador que devem estar compreendidos entre os 12 e os 20 mm [33].

Ceccotti propõe para este caso (existência de camada intermédia entre os dois materiais constituintes do sistema), que se crie uma relação entre o valor a utilizar do módulo de deslizamento e os valores obtidos pela expressão proposta pelo próprio (expressão (3.13)). A relação encontra-se documentada na tabela seguinte (tabela 3.4).

Tabela 3.4 - Relação proposta por Ceccotti para o valor de k_{ser} , quando existe camada intermédia

Kser em camada intermédia	Altura da camada (mm) / diâmetro do ligador	
0,75 k_{ser}	2	(3.16)
0,66 k_{ser}	3	(3.17)
0,5 k_{ser}	4	(3.18)

Mais recentemente Branco, após uma série de ensaios, apresenta uma fórmula semelhante à de Ceccotti.

$$k_{ser} = 0,15d^{0,95}E^{0,9} \quad (3.19)$$

A figura seguinte compara a expressão proposta por Branco com a proposta pelo Eurocódigo, concluindo-se que os valores atingidos são inferiores aos definidos no Eurocódigo 5[53]. Na figura são ainda comparadas as propostas anteriormente referidas para uma melhor percepção das variações obtidas pelas diferentes propostas de diferentes investigadores.

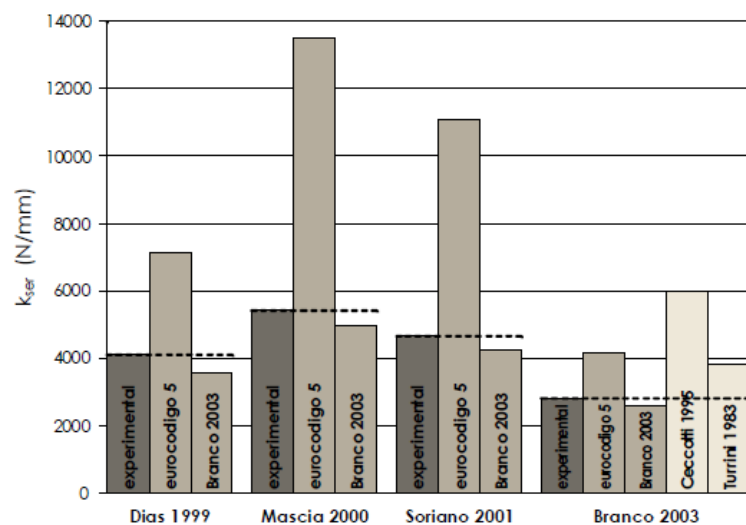


Fig. 3.29 - Estudo comparativo do módulo de deslizamento [7]

A figura indica que o valor obtido através da expressão proposta no Eurocódigo é mais preciso do que o valor obtido pela expressão de Ceccotti. Este facto deve-se à utilização de betão leve, betão este que, por apresentar menor densidade, influencia apenas o valor do módulo de deslizamento proposto pelo Eurocódigo.

Apesar de a expressão de Branco melhor se aproximar do comportamento real, esta aproximação não se encontra pelo lado da segurança o que não deve ser desprezado [34].

Numa análise comparativa, a expressão proposta por Turrini representa a que se aproxima melhor dos valores obtidos experimentalmente, de acordo com a figura 3.29 [34].

3.6. PESQUISA DE MERCADO

3.6.1. INTRODUÇÃO

Não havendo uma forma ideal para dividir os diversos sistemas de ligação optou-se por recorrer à classificação, apresentada na figura 3.1, quanto ao modo de ligação para organizar os diversos tipos de sistemas de ligação.

No leque de sistemas de ligação há que referir a discrepância temporal na concepção e estudo dos sistemas bem como o conhecimento existente em cada fase de criação de cada ligador. Com a evolução do conhecimento, houve a necessidade de fazer evoluir os desenhos dos ligadores para assim dar resposta a novas exigências bem como a necessidade de evoluir para ligações mais económicas e de mais fácil execução.

No mercado mundial são encontradas diversas formas de ligação para sistemas mistos madeira-betão, notando contudo que não há um interesse como há noutros tipos de ligação. É de referir que a própria informação técnica, em muitos casos, não é completa, o que origina, por parte dos projectistas, alguma dificuldade no uso desta forma de construção/reconstrução.

3.6.2. SISTEMAS DE LIGAÇÃO

Devido à variabilidade de parâmetros no qual se podem classificar os ligadores, optou-se por criar uma classificação que simplificasse a leitura e localização de cada sistema de ligação. Para isso subdividiu-se os sistemas em sistemas de ligação contínuos e pontuais, subdivisão de acordo com o modo de ligação apresentado no ponto 3.2.1. deste capítulo.

Os sistemas que englobam ligações pontuais foram divididos em cavilhas, parafusos, tubos metálicos, cilindros e chapa metálica tipo prego. A distinção entre tubos metálicos e cilindros, é como o próprio nome indica, o material de fabrico sendo que, os cilindros são executados em betão, ou seja recorre-se a cavidades circulares na madeira e durante a betonagem são "criados" os cilindros de betão.

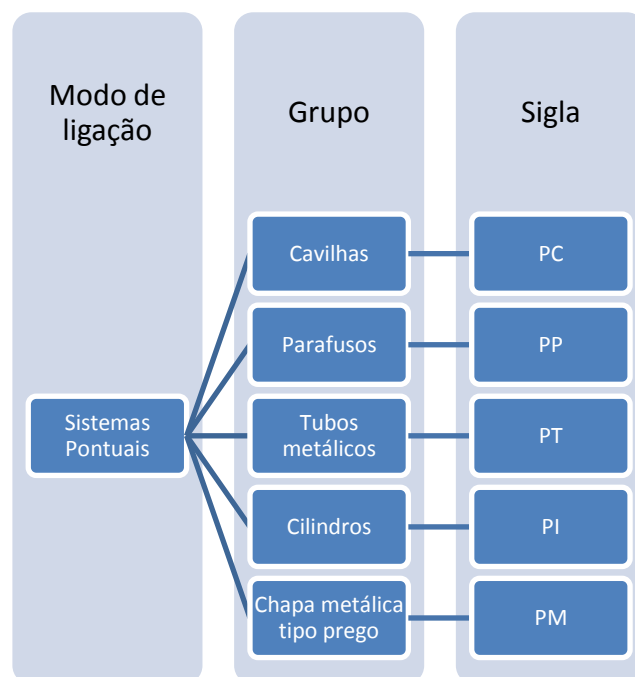


Fig. 3.30 - Sistemas pontuais

As ligações contínuas encontram-se divididas em chapas metálicas contínuas, barras de aço em zig-zag, saliências nas vigas e calhas. Os primeiros três grupos distinguem-se dos restantes quanto ao material utilizado que, tal como nos ligadores pontuais, são de aço, enquanto os outros são alterações provocadas aos desenhos do sistema e posterior betonagem.

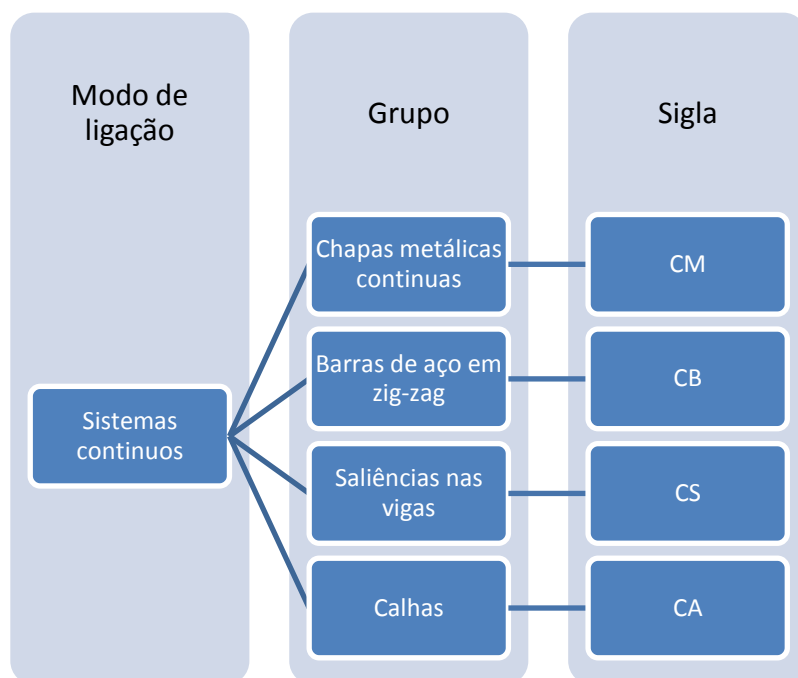
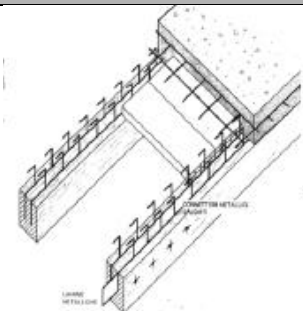
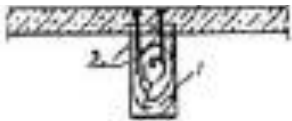
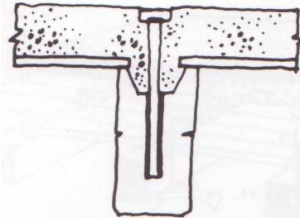
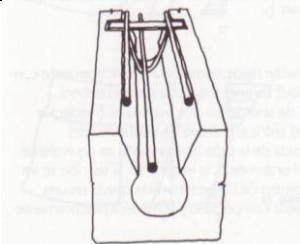
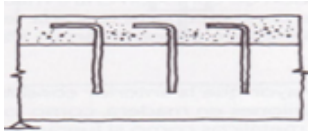
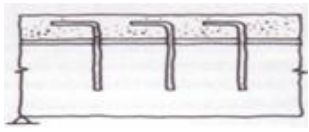
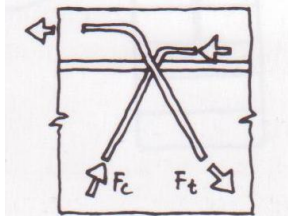
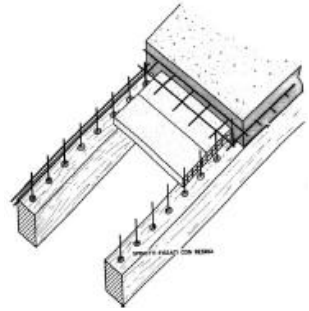
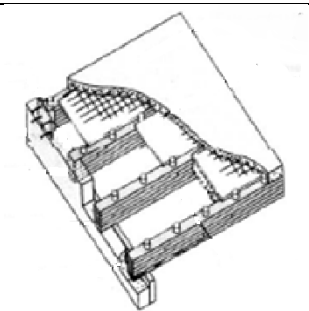


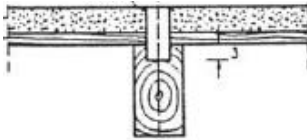
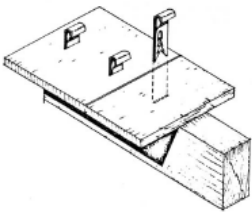
Fig. 3.31 - Sistemas contínuos

De seguida descrevem-se os sistemas de ligação, dividindo-os em sistemas tradicionais e sistemas modernos. Os sistemas tradicionais são os descritos na bibliografia e que foram alvo de um estudo mais aprofundado (Tabela 3.5).

Tabela 3.5 - Ligadores tradicionais

Código	Tipologia	Referência	Descrição	Descrição visual
TCC1	Contínuo/chapa metálica contínua	Sistema Campone, Campa	Placa metálica cravada e colada na viga de madeira e posterior ligação de parafusos/cavilhas à barra de aço	
TCS6	Contínuo/saliências nas vigas	Sistema Natterer, Hoeft	Cunhas incrustadas na madeira	
TCS7	Contínuo/saliências nas vigas	Sistema Kessel, Stallkamp	Cunhas na madeira com utilização de pregos para não haver separação dos dois materiais	
TCS8	Contínuo/saliências nas vigas	Sistema Godycki, Pawlica e Kleszczewski	Ressaltos criados na madeira e posterior utilização de pregos consoante a necessidade	
TCA9	Contínuo/calhas	Calhas nas vigas	Calhas realizadas nas vigas de madeira onde o betão penetra e permite a transmissão dos esforços entre o betão e a madeira	
TCA10	Contínuo/calhas	Calha armada	Estrutura de betão armado com "recobrimento" de madeira, simulando uma viga de madeira	

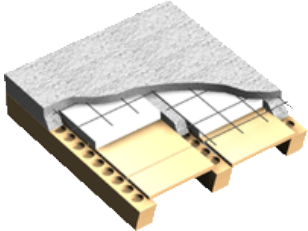
TPC1	Pontual/cavilhas	Cavilhas ao corte	O esforço rasante que se desenvolve na fibra de contacto entre a madeira e o betão é absorvido pela cavilha. Cavilha em contacto directo com o betão	
TPC2	Pontual/cavilhas	Cavilhas ao corte e flexão	Semelhantes às cavilhas ao corte com soalho intermédio da madeira e betão	
TPC3	Pontual/cavilhas	Cavilhas ao esforço axial	Cavilhas dispostas obliquamente ao plano de corte estando as cavilhas sujeitas a esforços axiais	
TPC4	Pontual/cavilhas	Sistema Alessi, Rafagli, Lamborghini	Cavilhas fixadas na madeira através de resina com barra soldada na extremidade oposta para melhor ligação ao betão	
TPC5	Pontual/cavilhas	Sistema Cecchi	Ligadores tipo barra que vão desde a viga de madeira à laje de betão com espaço aberto entre estes dois materiais	
TPT10	Pontual/tubos metálicos	Sistema Sylva-Structures	Sistema formado por tubos metálicos incrustados na viga previamente perfurada	

TPT12	Pontual/tubos metálicos	Sistema Gelfi, Ronca	Tubos metálicos de aço com uma zona dentada. Possibilidade de complementar com colas epoxi ou colocação de chapas quadradas soldadas ao tubo	
TPT13	Pontual/tubos metálicos	Sistema FLAP, Laner	Ligador metálico em forma de tubo com extremidade cortada formando dentes complementado com parafuso central	
TPM15	Pontual/chapa metálica tipo prego	Sistema Messina-Paolini	Chapa metálica dobrada parcialmente, cravada na viga de madeira ficando inserida parte no betão.	

Os sistemas comerciais são sistemas que mereceram por parte das empresas um estudo mais aprofundado, para melhor garantia dos utilizadores sendo que são sistemas que se encontram disponíveis no mercado da especialidade.

Tabela 3.6 - Ligadores comerciais

Código	Tipologia	Referência	Descrição	Descrição visual
CCC2	Contínuo/chapas metálicas contínuas	Sistema HBV	Chapa metálica perfurada criando uma rede metálica embutida na viga de madeira	
CCC3	Contínuo/chapas metálicas contínuas	Sistema LPR, Peter Cox	Perfil metálico com secção em V invertida, alveolado e perfurado para fixação na madeira	
CCB4	Contínuo/barras de aço em zig-zag	Sistema Llear, RBD	Treliça em aço fixada na viga de madeira com colas epoxi	
CPP6	Pontual/parafusos	Sistema VB, SFS intec	Ligador tipo parafuso parcialmente inserido na madeira e a outra extremidade solidarizada ao betão	
CPP7	Pontual/parafusos	Sistema Tecnaria	Ligador que consiste na junção de um ligador de superfície com parafusos que permitem a solidarização à madeira	

CPP8	Pontual/parafusos	Sistema HSB	Deriva dos ligadores de anel ou tubos metálicos com um elemento saliente de secção circular que fica inserido no betão. Num orifício central é introduzido um prego	
CPT9	Pontual/tubos metálicos	Sistema FLAP, Peter Cox	Ligador metálico em tubo com fundo perfurado. Ligador normalmente usado como complemento a outros sistemas de ligação	
CPT11	Pontual/tubos metálicos	Sistema Sylvat	Ligador em forma de tubo metálico	
CPI14	Pontual/cilindros	Sistema Wood Beton	Furação e execução das vigas de madeira de acordo com as especificações	

A classificação apresentada é meramente indicativa e original deste estudo o que não invalida que outros autores apresentem outro sistema de classificação ou sistemas de ligação classificados em discordância com as tabelas apresentadas. No anexo A encontram-se todos os sistemas de ligação anteriormente referidos.

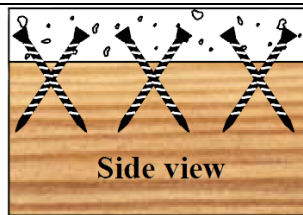
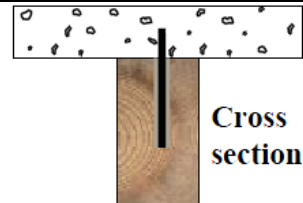
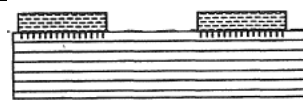
3.6.3. PROPRIEDADES MECÂNICAS OBTIDAS EXPERIMENTALMENTE

O módulo de deslizamento é normalmente definido para descrever o comportamento da ligação. É possível classificar as ligações de acordo com o valor do módulo de deslizamento, isto porque há variações significativas nos valores obtidos. Contudo, não é correcto atribuir um valor exacto para cada tipo de ligação, visto que o módulo de deslizamento varia consoante as características dos materiais utilizados bem como a forma de execução dos ensaios.

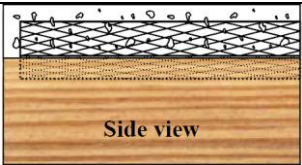
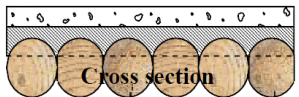
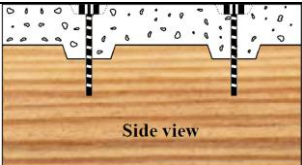
Com a necessidade crescente de se conhecer o comportamento das ligações, vários investigadores estudaram o comportamento de diversos ligadores obtendo, o módulo de deslizamento referido na tabela seguinte (Tabela 3.7).

Os valores na tabela 3.7 apresentam-se em N/mm/mm e na tabela 3.8, mais à frente, encontram-se em KN/mm. A razão da diferença é que os valores da tabela inicial são referentes ao módulo de deslizamento por unidade de comprimento, ou seja, o módulo de deslizamento da tabela 3.7 deve ser multiplicado pelo espaçamento mínimo descrito no Eurocódigo 5 para originar os valores da tabela 3.8.

Tabela 3.7 - Força máxima e módulo de deslizamento de diferentes tipos de ligação² (Adaptado: de [6])

Tipo de ligação	F_{max} ¹ (N/mm)	K_s ² (N/mm/mm)	δ_u ³ (mm)	Referência	Descrição visual ⁴
Pregos 6mm	271	68	15	Dias (1999)	
Parafusos	469	49	15	Dias et al. (2004)	
Varão em aço 10mm	226	152	15	Dias et al. (2003)	
Varão em aço 10mm com recurso a cola epoxi	-	250	-	STEP 2 - E13 (1995)	
Chapas metálicas	180	183	10	Van der Linden (1999)	
SFS 45°	305	405	5	Van der Linden (1999)	
HILTI 1	296	514 ⁵	15	Mungwa et al. (1998)	

² Os valores apresentados são referentes à direcção horizontal e ajustados a uma viga de madeira com uma largura de 100mm na direcção transversal e de acordo com uma ligação contínua nessa direcção [6].

HILTI 2	300 ^{5,7}	600 ^{5,7}	>3	Said et al. (2002)	
Tecnaria	333	128	13	Sonda (2001)	
Malha de aço	372	1385	>4	Bathon and Clouston (2004)	
Chapa metálica perpendicular ao fio	118 ⁷	243 ⁷	>4	Grosse et al. (2001)	
Varão em aço associado a cavidade	317	494	15	Van der Linden (1999)	
Cavidade com parafuso pós-tensionado	52 ⁶	123	-	Kuhlmann, U. and Michelfelder, B. (2004)	
Cavidade circular na madeira	413 ⁷	663 ⁷	<1	Ballerini et al. (2002)	
Ligações coladas	647	-	<1	Negrão et al. (2004)	

¹ - Carga máxima por unidade de comprimento

² - Módulo de deslizamento por unidade de comprimento

³ - Deslizamento máximo

⁴ As imagens não correspondem aos sistemas de ligação exactos estudados pelos autores, apenas se apresentam de forma a facilitar o reconhecimento visual

⁵ - Valores obtidos através de gráficos

⁶ - Valores característicos

⁷ - Espaçamento mínimo considerado corresponde ao espaçamento usado nos ensaios

Para uma melhor análise, a figura 3.32 apresenta os diferentes comportamentos das diferentes ligações.

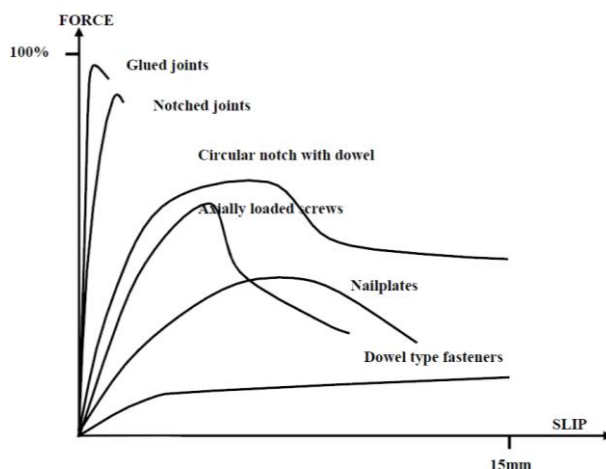


Fig. 3.32 - Comportamento típico para os diferentes tipos de ligação [6]

A figura 3.32 mostra o comportamento mecânico de diferentes tipos de ligação, havendo diferenças significativas na rigidez e na carga. A ligação colada é caracterizada por valores elevados de carga e rigidez com um comportamento quase linear até à rotura, rotura essa que acontece com pequenos valores de deformação. Por outro lado, os pregos apresentam valores baixos de carga e rigidez mas têm uma deformação plástica superior aos outros sistemas de ligação.

Linden estudou também os sistemas mistos, chegando a valores do módulo de deslizamento para três tipos distintos de ligação. Na figura seguinte encontram-se representados os diferentes tipos de ligação testados. O primeiro consiste na utilização de ligadores do tipo parafuso onde se varia a altura da camada intermédia. O segundo sistema recorre a chapas metálicas, sob a viga de madeira. Por último há uma junção de duas formas de ligação, ou seja, uma ligação mista de cavilhas e cavidades. [8]

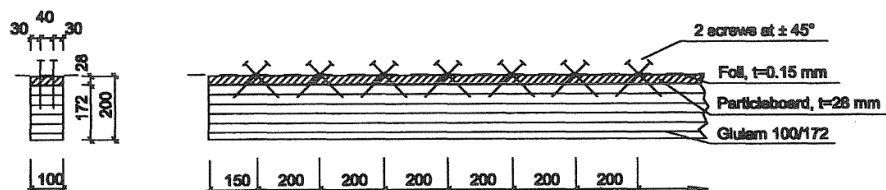


Fig. 3.33 - Parafusos cruzados a 45° [35]

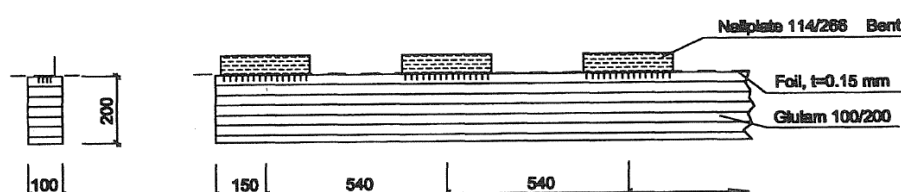


Fig. 3.34 - Chapas metálicas [35]

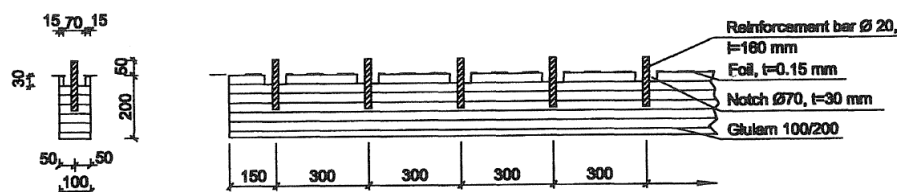


Fig. 3.35 - Sistema de ligação misto de cavilhas associadas a cavidades [35]

Os respectivos valores de força e módulo de deslizamento encontram-se descritos na tabela 3.8.

Tabela 3.8 - Módulo de deslizamento, força máxima dos ligadores e módulo de deslizamento máximo [35]

Tipo de ligador	Módulo de deslizamento determinado de acordo com EN26891 (KN/mm)	Carga máxima F_{max} (KN)	Constante relacionada com o espaçamento mínimo (EC5) * d (mm)	k/s (N/mm/mm)
Parafusos (por par), com camada intermédia de:				
0mm	29.2	22.0	12 * 6	405
19mm	12.9	15.3		179
28mm	15.6	15.0		217
Chapas metálicas	48.8	47.9	(comprimento de 266mm)	183
Cavilhas associadas a cavidades	79.5	51.1	Máximo entre: 7*20 (Cavilha) 2,3*70 (Cavidade)	494

O reforço através de ligadores e cavidades na madeira é o tipo de ligação que apresenta resultados mais elevados. Nesse caso, o valor do módulo de deslizamento é 1,6 vezes superior às chapas metálicas, e é 2,7 vezes superior à solução com parafusos sem camada intermédia. [35]

A análise indica que os valores do módulo de deslizamento dos parafusos são muito inferiores do que os outros dois sistemas de ligação, mas se a força e o módulo de deslizamento forem divididos pelos espaçamentos mínimos impostos pelo Eurocódigo 5, obtêm-se valores próximos dos valores de k/s das cavilhas associadas a cavidades. [35]

O gráfico relativo ao comportamento carga-deslizamento dos três tipos de ligação encontra-se representado na figura 3.36.

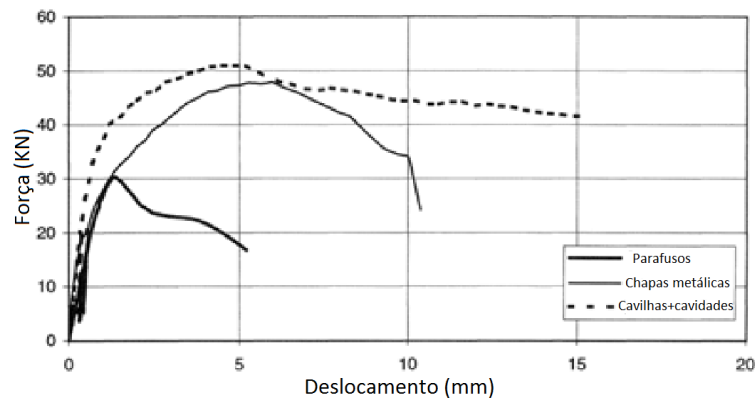


Fig.3.36 - Diagrama carga-deslizamento relativo a parafusos sem camada intermédia, chapas metálicas e cavilhas associadas a cavidades [35]

Uma das preocupações nas ligações de sistemas mistos relacionam-se com os custos associados ao tipo de ligação a que se recorre, o que motivou que investigadores na Alemanha comparassem os valores do módulo de deslizamento de dois tipos de ligação. Um sistema consiste na realização de cavidades na superfície da viga de madeira e o outro sistema associa ao inicial parafusos. É evidente que a diminuição de parafusos ao longo da viga reduz o custo final do sistema, devido ao grande abaixamento dos custos com mão-de-obra de aplicação [36]



Fig. 3.37 - Cavidades e parafusos antes da colocação do betão [36]



Fig. 3.38 - Vista lateral de uma cavidade [36]

Para uma melhor compreensão dos valores obtidos foram adicionados à tabela seguinte os dados relativos a chapa metálicas (Tabela 3.9).

Tabela 3.9 - Carga máxima e módulo de deslizamento nos diferentes tipos de ligação [36]

Tipo de ligador	Carga última (KN) por metro de largura de laje	Rigidez da ligação (KN/mm) por metro de largura de laje
Cavidade com parafuso	380	497
Cavidade sem parafuso	386	500
Chapa metálica perpendicular ao fio	290 a 340	530

Este estudo demonstrou que a diferença entre os tipos de ligação estudados não é significativa, tanto ao nível da carga máxima dos ligadores, como ao nível do módulo de deslizamento. O estudo indica ainda que as cavidades poderão ser reformuladas para assim otimizar o seu comportamento já que a diferença de resultados não é significativa, comparando com os custos de uma ligação que recorra a parafusos.

Na bibliografia foram ainda encontrados diversos ensaios relativos à determinação de valores de módulos de deslizamento de diferentes ligações. Os ensaios descrevem a variação do módulo de deslizamento quando se altera a espécie de madeira, bem como o ligador a usar. De referir que todos os elementos foram instalados nas peças de madeira através de pré-furação, exceção para o prego de 3,6mm para o qual se recorreu a uma máquina de "pressão". O processo de aplicação da chapa metálica consistiu na cravação sob pressão na madeira.

Tabela 3.10 - Dados relativos a ensaios distinguindo espécie de madeiras (Adaptado de [37])

Investigadores	Espécie de madeira pesquisada	Massa volúmica (Kg/m ³)	Tipo de ligação	Diâmetro (mm)	Módulo de deslizamento experimental (N/mm)
Soriano(2001)	Goupia glabra	838	Prego	6,58	14427
Soriano(2001)	Goupia glabra	838	Cavilha	9,53	11471
Soriano(2001)	Goupia glabra	838	Cavilha	12,70	15464
Soriano(2001)	Goupia glabra	838	Prego	5,40	6012
Souza(1997)	Manikara spp	1072	Prego	3,60	21250
Souza(1997)	Manikara spp	1072	Prego	4,00	14000
Souza(1997)	Manikara spp	1072	Cavilha	5,20	16360
Mathiesen(1999)	Pinus	516	Cavilha	9,53	14750
Mathiesen(1999)	Pinus	516	Cavilha	12,70	18060
Mathiesen(1999)	Eucalyptus grandis	703	Cavilha	9,53	15250
Mathiesen(1999)	Eucalyptus grandis	703	Cavilha	12,70	17810
Mathiesen(1999)	Goupia glabra	764	Cavilha	12,70	30680
Oliveira S.(1999)	Eucalyptus grandis	804	Chapa metálica		18369

3.6.4. VALORES COMERCIAIS

Dada a complexidade de obtenção do módulo de deslizamento em sistemas mistos madeira-betão as empresas que comercializam componentes para este tipo de solução, mais concretamente ligadores, facilitam o acesso aos valores dos módulos de deslizamento obtidos experimentalmente. Com a crescente complexidade dos ligadores, ao nível de desenho, há uma necessidade crescente de definir o parâmetro para cada ligador que exista no mercado, isto porque se torna difícil a comparação de ligadores com os ligadores tipo existentes nas tabelas do Eurocódigo.

A empresa Tecnaria [77] disponibiliza informação relativa ao seus sistemas de ligação, mais concretamente aos sistema de ligação que recorrem aos ligadores "*Base Connector*" e aos sistemas de ligação que recorrem aos ligadores "*Maxi Connector*".

O sistema "*Base Connector*" consiste num ligador tipo pino fixado uma placa metálica onde são colocados dois parafusos que posteriormente são embutidos na madeira.

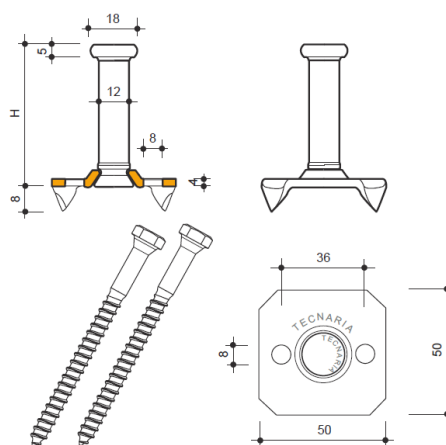


Fig. 3.39 - Ligador Tecnaria "*Base Connector*" [77]

No catálogo do sistema de ligação são sugeridos os valores descritos na tabela 3.11.

Tabela 3.11 - Valores admissíveis para ligadores Tecnaria "*Base Connector*" [77]

	Posição do ligador		
	Directamente na viga de madeira	Com camada intermédia de 2 cm	Com camada intermédia de 4cm
Carga admissível (N)	7500	5100	3500
Módulo de deslizamento em serviço (N/mm)	20800	3140	1410
A classe da madeira é C16 de acordo com a norma EN338 [56]			

A empresa apresenta os valores para os estados limites descritos na tabela 3.12.

Tabela 3.12 - Valores nos estados limites para ligadores Tecnaria "Base Connector" [77]

	Posição do ligador		
	Directamente na viga de madeira	Com camada intermédia de 2 cm	Com camada intermédia de 4cm
Carga máxima (N)	20900	14190	9760
Módulo de deslizamento kser (N/mm)	17200	2740	1330
Módulo de deslizamento ku (N/mm)	7410	1730	970
A classe da madeira é C16 de acordo com a norma EN338 [56]			

O sistema "Maxi Connector" apresenta apenas diferenças nas dimensões da placa metálica relativamente ao sistema "Base Connector". A maior dimensão do comprimento da placa metálica é justificada pelo objectivo se obterem melhores propriedades mecânicas do sistema.

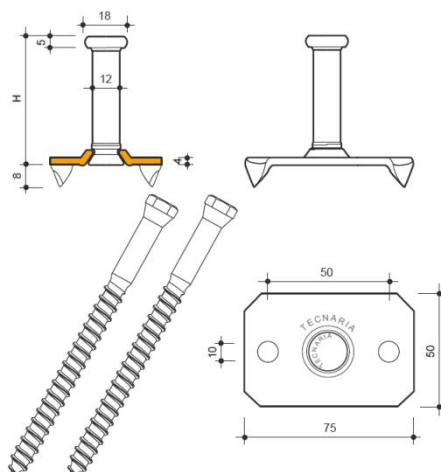


Fig. 3.40 - Ligador Tecnaria "Maxi Connector" [77]

No catálogo do sistema de ligação são sugeridos os valores da tabela 3.13.

Tabela 3.13 - Valores admissíveis para ligadores Tecnaria "Maxi Connector" [77]

	Posição do ligador		
	Directamente na viga de madeira	Com camada intermédia de 2 cm	Com camada intermédia de 4cm
Carga admissível (N)	8700	7050	6140
Módulo de deslizamento em serviço (N/mm)	20800	8390	3660
A classe da madeira é C16 de acordo com a norma EN338 [56]			

A empresa apresenta os valores para os estados limites descritos na tabela 3.14.

Tabela 3.14 - Valores nos estados limites para ligadores Tecnaria "Base Connector" [77]

	Posição do ligador		
	Directamente na viga de madeira	Com camada intermédia de 2 cm	Com camada intermédia de 4cm
Carga máxima (N)	24250	19630	17100
Módulo de deslizamento kser (N/mm)	17200	6800	3230
Módulo de deslizamento ku (N/mm)	7410	3270	2410
A classe da madeira é C16 de acordo com a norma EN338 [56]			

4

MODELO DE CÁLCULO

4.1. INTRODUÇÃO

Existem vários métodos de dimensionamento de pavimentos mistos madeira-betão, podendo os métodos distinguir-se de acordo com a rigidez da ligação.

Se a ligação madeira-betão for completamente rígida, como ocorre com as soluções coladas, o cálculo não mostra dificuldade. Em primeiro lugar, a secção deverá homogeneizar-se tomando o módulo de elasticidade de um dos materiais, madeira ou betão. Denomina-se K a relação entre o módulo de elasticidade do betão e da madeira, a largura homogeneizada do betão é equivalente a K vezes a largura real. Como o valor de K é elevado a secção do betão adquire uma importância maior, originando uma mudança no eixo neutro da solução passando este para uma posição mais elevada, originando com que o betão se encontre praticamente todo comprimido e a madeira praticamente toda à tracção.

No caso em que a ligação deixa de ser rígida, começam a existir pequenos deslizamentos entre os materiais traduzindo-se essa situação pelo coeficiente de deslizamento. Um método aproximado de cálculo encontra-se descrito no STEP 2 [2], estando este baseado no modelo de cálculo apresentado no anexo B do Eurocódigo 5 [53]. Este método sugere a utilização de equações simplificadas, baseadas no cálculo da rigidez efectiva à flexão e na distribuição de tensões obtidas em função da rigidez da ligação entre os dois materiais.

No dimensionamento de secções de betão armado à flexão, partimos do princípio que este não pode suportar tensões de tracção, o que provoca fissuração, mas este facto é desprezado porque nos regulamentos de dimensionamento, este valor é nulo, ou praticamente nulo, encontrando-se assim pelo lado da segurança.

Na análise de estruturas mistas podem ocorrer tensões de tracção na fibra inferior do betão, o que, não deve ser admitido devido ao exposto anteriormente. Este caso pode ser anulado se se proceder a um reajuste nas variáveis do sistema e repetindo os cálculos de forma iterativa de forma a se atingir uma solução onde a camada de betão se encontre totalmente à compressão [7].

Os modelos de cálculo apresentados neste capítulo têm como base a secção transversal patente na figura seguinte.

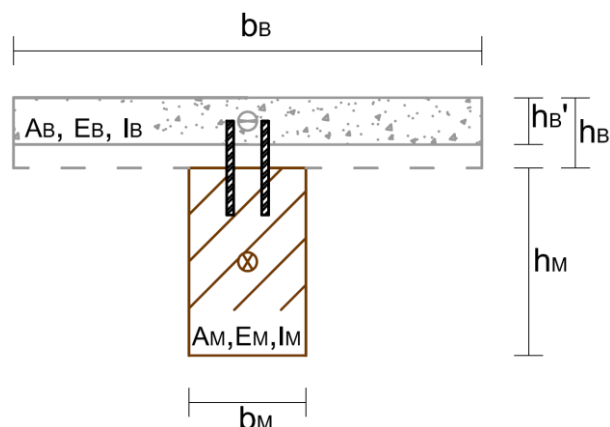


Fig. 4.1 - Secção transversal da viga

O modelo apresentado, tanto no Eurocódigo 5 [41] como o apresentado por J. Pardo Ros [7], assentam nos seguintes pressupostos [9]:

- i) O carregamento aplicado é unidireccional e actua no plano perpendicular ao eixo da viga;
- ii) A ligação madeira-betão tem rigidez constante ao longo da viga;
- iii) A curvatura é igual na lâmina de betão e na viga de madeira;
- iv) O comportamento dos componentes (betão, madeira e ligador) é elastico-linear;
- v) A estrutura permanece no domínio das pequenas deformações;
- vi) A deformação por esforço transversal é desprezável;
- vii) Não existe atrito entre os dois componentes, betão e madeira.

Na figura anterior identifica-se a camada intermédia mas esta é desprezável do ponto de vista estrutural, ou seja, admite-se que apresenta uma rigidez à flexão nula. A consideração é feita com base no tipo de material que faz parte da camada intermédia, sendo esta normalmente constituída por tábuas de soalho. Contudo há que referir que no mercado existem elementos contínuos de contraplacado que já apresentam alguma rigidez de flexão, o que não é considerado nos modelos seguintes [9].

A análise de estruturas mistas madeira-betão consiste no conhecimento da relação entre tensão e deformação dos vários constituintes do sistema misto, madeira, ligador e betão. A necessidade de definir e determinar um grande número de parâmetros causa uma grande complexidade o que origina a criação de modelos onde são criadas simplificações que não são relevantes no resultado final.

4.2. BASES DE PROJECTO

Num projecto de uma estrutura mista madeira-betão as acções, as combinações de acções e todos os restantes elementos necessários à quantificação dos esforços actuantes são obtidos de forma análoga a qualquer outro projecto de estruturas [5].

4.2.1. PRINCÍPIOS E REGRAS BASE PARA O DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL

No âmbito das estruturas de madeira, estas devem ser projectadas de acordo com o ambiente para o qual se destinam visto que, dependendo das condições ambientais, as estruturas podem variar as suas dimensões de acordo com o teor de água em que se encontram [5].

De forma a uniformizar este factor, o Eurocódigo 5 [53] classifica as estruturas em classes de serviço tentando assim resolver o problema da durabilidade da madeira face às diversas condições ambientais a que poderão estar sujeitas as estruturas.

As classes de serviço destinam-se fundamentalmente a definir as propriedades mecânicas dos materiais e a permitir o cálculo das deformações em condições ambientais determinadas.

- classe de serviço 1, refere-se a um teor de água dos materiais correspondente a uma temperatura de 20°C e a uma humidade relativa do ar ambiente superior a 65% apenas durante algumas semanas por ano;
- classe de serviço 2, refere-se a um teor de água dos materiais correspondente a uma temperatura de 20°C e a uma humidade relativa ao ar ambiente superior a 85% apenas durante algumas semanas por ano;
- classe de serviço 3, refere-se a condições climáticas que conduzem a valores do teor em água dos materiais superiores aos da classe de serviço 2.

No que se refere à duração das acções, o Eurocódigo 5 [41] define 5 categorias, representadas na tabela seguinte (Tabela 4.1).

Tabela 4.1 - Duração das acções

Classe de duração das acções	Ordem de grandeza da duração acumulada do valor característico da acção	Exemplos de acções
Permanente	Superior a 10 anos	Peso próprio
Longa duração	6 meses - 10 anos	Produtos armazenados
Média duração	1 semana - 6 meses	Sobrecargas em pavimentos, neve
Curta duração	Inferior a uma semana	Neve, vento
Instantânea	Muito curta	Vento, acção de acidente

O Eurocódigo 0 define que qualquer dimensionamento estrutural deve ser alvo de verificação relativamente aos Estados-limite últimos de resistência e aos Estados-limite de utilização.

No caso dos Estados-limite últimos a combinação de acções a empregar é obtida pela combinação de acções fundamental (expressão 4.1).

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \Psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (4.1)$$

Para os Estados-limite de utilização é introduzida a distinção entre a análise a curto prazo através da combinação de acções característica, e a longo prazo, através da combinação de acções quase permanente (expressões (4.2) e (4.3)).

Combinação de acções característica:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \Psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (4.2)$$

Combinação de acções quase-permanente:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \sum_{i > 1} \Psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (4.3)$$

Nas expressões (4.1), (4.2) e (4.3) os símbolos têm o seguinte significado:

$G_{k,j}$ - valor característico da acção permanente, j;

$Q_{k,i}$ - valor característico da acção variável, i;

$\gamma_{G,i}$ - factor de segurança parcial da acção permanente, i;

$\gamma_{Q,i}$ - factor de segurança parcial da acção variável, i;

$\Psi_{0,i}$ - coeficiente de redução para a determinação do valor raro da acção variável, i;

$\Psi_{2,i}$ - coeficiente de redução para a determinação do valor quase-permanente da acção variável, i.

Tabela 4.2 - Valores γ_F , factor de segurança parcial (Adaptado de [63])

Designação	Valores γ_F que devem ser adoptados
$\gamma_{G,i}$	1,35
$\gamma_{Q,i}$	1,5

Tabela 4.3 - Valores recomendados dos coeficientes ψ para edifícios (Adaptado de [63])

Acção	Ψ_0	Ψ_2
Sobrecargas em edifícios (ver EN1991-1-1)		
Categoria		
A	0,7	0,3
B	0,7	0,3
C	0,7	0,6

No dimensionamento é necessário definir os valores característicos das sobrecargas, de acordo com as categorias de utilização. As categorias a considerar são definidas no Eurocódigo 1 [64].

Tabela 4.4 - Categorias de utilização (Adaptado de [64])

Categoria	Utilização específica	Exemplo
A	Actividades domésticas e residenciais	Salas em edifícios de habitação; Quartos e enfermarias de hospitais; Quartos de hotéis; Cozinhas; Lavabos.
B	Escritórios	
C	Locais de reunião	C1: Zonas com mesas, etc. Exemplo: escolas, cafés, restaurantes, salões de jantar, salas de leitura, recepções.
		C2: Zonas com assentos fixos. Exemplo: igrejas, teatros ou cinemas, salas de conferências, salas de aulas, salas de reunião, salas de espera.
		C3: Zonas sem obstáculos para movimentação de pessoas, por pessoas. Exemplo: museus, salas de exposição, acesso a edifícios públicos e administrativos como hotéis e hospitais.
		C4: Zonas em que são possíveis actividades físicas Exemplo: salões de dança, ginásios, palcos.
		C5: Zonas de possível acolhimento de multidões. Exemplo: edifícios para eventos públicos como salas de concertos, salas para actividades desportivas incluindo bancadas, terraços e zonas de acesso.

Para efeitos de projecto, às categorias das zonas carregadas estabelecidas na tabela anterior devem corresponder valores característicos que se encontram na tabela seguinte (Tabela 4.5).

Tabela 4.5 - Sobrecargas em edifícios (Adaptado de [64])

Categorias de zonas carregadas		q_k (KN/m ²)
Categoria	A	2,0
	B	3,0
	C1	3,0
	C2	4,0
	C3	5,0
	C4	5,0
	C5	6,0

4.2.2. VALORES DE CÁLCULO

O projecto de estruturas de madeira deve ser realizado de acordo com o Eurocódigo 0, Eurocódigo este que define as regras base de projecto para qualquer outro Eurocódigo.

Seguidamente é apresentada a metodologia de cálculo aos Estados-limite, fundamental nos projectos de estruturas de madeira.

Os Estados-limite de Utilização englobam o conceito de factor de deformação (k_{def}) e de módulo de deslizamento (K_{ser}) que basicamente resolvem aspectos específicos das Estruturas de Madeira relacionados com a duração das acções, fluência e classes de serviço atrás definidas [5].

4.2.2.1. Influência nas deformações da duração das acções e do teor de água

Dois factores importantes que devem ser tidos em conta no cálculo da resistência mecânica e da aptidão ao uso das estruturas de madeira é a duração das acções e o teor de água visto que afectam as propriedades de resistência e rigidez dos elementos de madeira [5].

Na verificação da segurança em relação aos estados limites de utilização, se a estrutura for constituída por elementos ou componentes com diferentes propriedades no tempo, os valores médios finais do módulo de elasticidade, $E_{mean,fin}$, do módulo de distorção $G_{mean,fin}$, e do módulo de deslizamento, $k_{ser,fin}$, utilizados para o cálculo da deformação final, devem ser obtidos a partir das expressões (4.4), (4.5) e (4.6).

$$E_{mean,fin} = \frac{E_{mean}}{(1 + k_{def})} \quad (4.4)$$

$$G_{mean,fin} = \frac{G_{mean}}{(1 + k_{def})} \quad (4.5)$$

$$k_{ser,fin} = \frac{k_{ser}}{(1 + k_{def})} \quad (4.6)$$

Para a verificação da segurança em relação aos estados limites últimos, em que a distribuição dos esforços nos elementos é afectada pela distribuição de rigidez na estrutura, os valores médios finais do módulo de elasticidade, $E_{mean,fin}$, do módulo de distorção $G_{mean,fin}$, e do módulo de deslizamento, $k_{ser,fin}$, utilizados para o cálculo da deformação final, devem ser obtidos a partir das expressões (4.7), (4.8) e (4.9).

$$E_{mean,fin} = \frac{E_{mean}}{(1 + \Psi_2 k_{def})} \quad (4.7)$$

$$G_{mean,fin} = \frac{G_{mean}}{(1 + \Psi_2 k_{def})} \quad (4.8)$$

$$k_{ser,fin} = \frac{k_{ser}}{(1 + \Psi_2 k_{def})} \quad (4.9)$$

Nas expressões acima, os símbolos representam:

E_{mean} - valor médio do módulo de elasticidade;

G_{mean} - valor médio do módulo de distorção;

k_{ser} - módulo de deslizamento, em N/mm, aplicável ao cálculo do deslizamento de uma ligação (em mm) em função do esforço aplicado em Newton;

k_{def} - factor para avaliação da deformação devida à fluência e que tem em conta a classe de serviço pertinente;

Ψ_2 - coeficiente para o valor quase-permanente da acção.

4.2.2.2. Valor de cálculo de uma propriedade de um material

O valor de cálculo X_d de uma propriedade de resistência é determinado da seguinte forma:

$$X_d = k_{mod} \frac{X_k}{\gamma_M} \quad (4.10)$$

Na expressão os símbolos significam:

X_k - valor característico de uma propriedade de resistência;

γ_M - coeficiente parcial do material;

k_{mod} - factor de modificação que tem em conta o efeito da duração das acções e do teor em água.

No caso da madeira, o coeficiente parcial de segurança de projecto encontra-se representado na tabela seguinte (Tabela 4.6).

Tabela 4.6 - Coeficientes parciais recomendados para as propriedades dos materiais (Adaptado de [61])

Material	Designação	Valor
1. Madeira e derivados da madeira		
- Verificação normal		
- Madeira maciça	γ_M	1,3
- Madeira lamelada colada	γ_M	1,25
- Lvl, contraplacado, OSB	γ_M	1,2
-Verificação à fadiga	$\gamma_{M,fad}$	1,0
2. Ligações		
- Verificação normal	γ_M	1,3
-Verificação à fadiga	$\gamma_{M,fad}$	1,0
3. Aço usado em elementos mistos	$\gamma_{M,a}$	1,15
4. Betão usado em elementos mistos	$\gamma_{M,B}$	1,5
5. Ligadores em sistemas mistos madeira-betão		
- Verificação normal	$\gamma_{M,v}$	1,25
-Verificação à fadiga	$\gamma_{M,v,fad}$	1,0
6. Elementos em aço pré-esforçado	$\gamma_{M,a}$	1,15

O factor de modificação, que tem em conta o efeito da duração das acções e do teor em água, encontra-se definido na tabelas seguinte de acordo com o tipo de madeira, classe de serviço e classe de duração das acções³.

³ O valor a utilizar deverá ser sempre correspondente à duração mais longa imposta à estrutura.

Tabela 4.7 - Valores de k_{mod} (Adaptado de [53])

Material	Norma	C. de serv.	Classe de duração das acções				
			Acção permanente	Acção de longa duração	Acção de média duração	Acção de curta duração	Acção instantânea
Madeira maciça	EN 14081-1	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	EN 14080	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
LVL	EN14374, EN14279	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

4.2.2.3. Valor de cálculo das resistências

O valor da cálculo, R_d , de uma resistência (capacidade resistente) deve ser calculado de acordo com a expressão (4.11).

$$R_d = k_{mod} \frac{R_k}{\gamma_M} \quad (4.11)$$

O parâmetro R_k corresponde ao valor característico da capacidade resistente.

4.2.2.4. Fluência dos materiais

Vários factores influenciam o comportamento da madeira, como é o caso do teor de água, a duração da carga ou a tensão aplicada influenciando o comportamento, por exemplo, ao nível da deformação ao longo do tempo.

A tabela seguinte, adaptada do Eurocódigo 5 [53], apresenta os valores do coeficiente de fluência (designação dada em [5]) para acções permanentes.

Tabela 4.8 - Valores de k_{def} (Adaptado de [53])

Material	Norma	Classe de serviço		
		1	2	3
Madeira maciça	EN 14081-1	0,60	0,80	2,00
Madeira laminada colada	EN 14080	0,60	0,80	2,00
LVL	EN 14374, EN 14279	0,60	0,80	2,00

Na tabela (4.8), k_{def} corresponde ao factor de deformação.

No caso do betão, a fluência e a retracção dependem da humidade ambiente, das dimensões do elemento e da composição do betão. A fluência também depende da idade do betão no primeiro carregamento assim como da duração e da intensidade da carga.

O método detalhado de cálculo encontra-se descrito no Eurocódigo 2 [55].

4.2.2.5. Estados-limite de deformação

A deformação de uma estrutura resultante dos efeitos das acções, como por exemplo, esforços normais e transversos, momentos flectores e deslizamento, deve manter-se dentro dos limites apropriados, tal como a variação do teor de água. Os limites estabelecidos existem para controlar a ocorrência de danos em materiais de revestimento, tectos, pavimentos, divisórias e acabamentos bem como cumprir as exigências funcionais e de aspecto [53].

A deformação instantânea, u_{inst} é calculada para a combinação característica de acções, tal como o referido no Eurocódigo 0, e no cálculo devem ser utilizados os valores médios apropriados dos módulos de elasticidade, de distorção e de deslizamento.

A deformação final, u_{fin} , deve ser calculada para a combinação de acções quase-permanente.

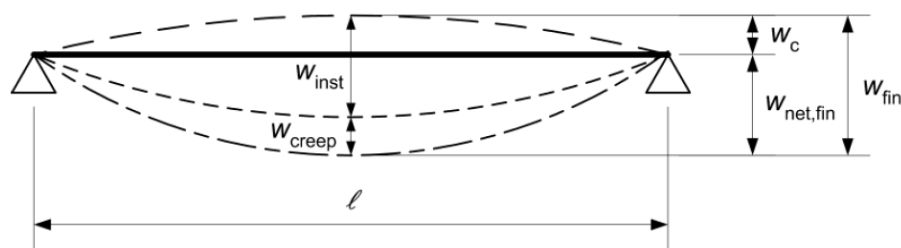


Fig. 4.2 - Componentes da flecha

A flecha aparente final, considerada em relação à linha recta entre os apoios, $w_{net,fin}$, deve ser considerada igual à definida pela expressão (4.12).

$$w_{net,fin} = w_{inst} + w_{creep} - w_c = w_{fin} - w_c \quad (4.12)$$

Os valores limites a considerar para as flechas das vigas com um vão L é dado no quadro seguinte em função do nível de deformação considerado aceitável.

Tabela 4.9 - Exemplos de valores limites para as flechas de vigas

		w_{inst}	$w_{net,fin}$	w_{fin}
Viga sobre 2 apoios	Limite inferior	$L/300$	$L/250$	$L/150$
	Limite superior	$L/500$	$L/350$	$L/300$

4.2.3. PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

4.2.3.1. Madeira e derivados

Os valores das principais propriedades físicas e mecânicas a considerar no cálculo à rotura de estruturas de madeira encontram-se descritas nas tabelas seguintes. As tabelas 4.10 e 4.11 são reproduzidas sem qualquer alteração da tabela que integra a EN 338 [56].

Tabela 4.10 - Propriedades físicas e mecânicas de madeira maciça para estruturas (resinosas)

		Espécies Resinosas											
		C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50
Propriedades resistentes em N/mm ² (MPa)													
Flexão	$F_{m,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50
Tracção	$F_{t,0,k}$	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30
Tracção	$F_{t,90,k}$	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Compressão	$f_{c,0,k}$	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	29
Compressão	$f_{c,90,k}$	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2
Corte	$f_{v,k}$	1,7	1,8	2,0	2,2	2,4	2,5	2,8	3,0	3,4	3,8	3,8	3,8
Propriedades de rigidez em KN/mm ² (GPa)													
Módulo de elasticidade	$E_{0,mean}$	7	8	9	9,5	10	11	11,5	12	13	14	15	16
Módulo de elasticidade (5º percentil)	$E_{0,k}$	4,7	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	7,7	8,0	8,7	9,4	10,0	10,7
Módulo E	$E_{90,mean}$	0,23	0,27	0,30	0,32	0,33	0,37	0,38	0,40	0,43	0,47	0,50	0,53
Módulo de distorção	G	0,44	0,50	0,56	0,59	0,63	0,69	0,72	0,75	0,81	0,88	0,94	1,00
Densidade em Kg/m ³													
Densidade	P_k	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460
Densidade média	P_{mean}	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550

Tabela 4.11 - Propriedades físicas e mecânicas de madeira maciça para estruturas (folhosas)

		Espécies Folhosas					
		D30	D35	D40	D50	D60	D70
Propriedades resistentes em N/mm^2 (MPa)							
Flexão	$F_{m,k}$	30	35	40	50	60	70
Tracção	$F_{t,0,k}$	18	21	24	30	36	42
Tracção	$F_{t,90,k}$	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Compressão	$f_{c,0,k}$	23	25	26	29	32	34
Compressão	$f_{c,90,k}$	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 em KN/mm^2 (GPa)							
Módulo de elasticidade	$E_{0,\text{mean}}$	10	10	11	14	17	20
Módulo de elasticidade (5º percentil)	$E_{0,k}$	8,0	8,7	9,4	11,8	14,3	16,8
Módulo E	$E_{90,\text{mean}}$	0,64	0,69	0,75	0,93	1,13	1,33
Módulo de distorção	G	0,60	0,65	0,70	0,88	1,06	1,25
Densidade em Kg/m^3							
Densidade	P_k	530	560	590	650	700	900
Densidade média	P_{mean}	640	670	700	780	840	1080

Quando a reabilitação passa pela substituição total do sistema estrutural horizontal ou se pretende alterar o sistema estrutural global sem perder o aspecto visual dos pavimentos, pode-se recorrer a derivados de madeira para substituir os elementos de madeira maciça.

Um dos derivados da madeira que se pode utilizar é a madeira lamelada colada que permite criar peças estruturais de maiores comprimentos e secções comparativamente à madeira maciça. Em geral não é possível obter peças de madeira maciça com comprimentos superiores a 12 metros ou secções superiores a $20 \times 30 \text{cm}^2$ e mesmo estas só sendo possíveis em condições muito especiais [5].

Tal como a madeira maciça, a madeira lamelada colada apresenta valores das propriedades físicas e mecânicas a usar no cálculo associados a uma classe de resistência, conforme se encontra definido na norma EN 1194 [64].

Nesta norma são definidas quatro classes de resistência para cada tipo de madeira lamelada colada, homogénea ou combinada⁴. Para a madeira lamelada colada homogénea, as classes previstas são: GL24h, GL28h, GL32h, GL36h. No caso da madeira lamelada colada combinada as classes são: GL24c, GL28c, GL32c, GL36c [5].

Tabela 4.12 - Propriedades mecânicas de madeira lamelada colada [64]

Propriedade	Símb.	Un.	GL24h	GL28h	GL32h	GL36h	GL24c	GL28c	GL32c	GL36c
Flexão	$f_{m,g,k}$	MPa	24	28	32	36	24	28	32	36
Tracção	$f_{t,0,g,k}$	MPa	16,5	19,5	22,5	26	14	16,5	19,5	22,5
Tracção	$f_{t,90,g,k}$	MPa	0,4	0,45	0,5	0,6	0,35	0,4	0,5	0,6
Compressão	$f_{c,0,g,k}$	MPa	24	26,5	29	31	21	24	29	31
Compressão	$f_{c,90,g,k}$	MPa	2,7	3,0	3,3	3,6	2,4	2,7	3,3	3,6
Corte	$f_{v,g,k}$	MPa	2,7	3,2	3,8	4,3	2,2	2,7	3,8	4,3
Módulo de elasticidade	$E_{0,g,mean}$	GPa	11,6	12,6	13,7	14,7	11,6	12,6	13,7	14,7
M. de elast. (5º percentil)	$E_{0,g,k}$	MPa	9,4	10,2	11,1	11,9	9,4	10,2	11,1	11,9
M. de elast. perpendicular	$E_{90,g,mean}$	MPa	0,39	0,42	0,46	0,49	0,32	0,39	0,46	0,49
Módulo de distorção	$G_{g,mean}$	MPa	0,72	0,78	0,85	0,91	0,59	0,72	0,85	0,91
Massa volúmica	$P_{g,k}$	Kg/m ³	380	410	430	450	350	380	430	450

4.2.3.2. Betão

(i) Betão normal

As propriedades do betão normal, de acordo com as respectivas classes, encontram-se descritas no Eurocódigo 2 [55] encontrando-se na tabela seguinte as principais propriedades do betão.

⁴ A designação de madeira lamelada colada homogénea ou combinada encontra-se explicada no capítulo 2.

Tabela 4.13 - Características de resistência e de deformação do betão

Símbolo	Unidade	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55
f_{ck}	MPa	12	16	20	25	30	35	40	45
$f_{ck,cubo}$	MPa	15	20	25	30	37	45	50	55
f_{cm}	MPa	20	24	28	33	38	43	48	53
f_{ctm}	MPa	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8
E_{cm}	GPa	27	29	30	31	33	34	35	36

Na tabela 4.13, os símbolos têm o seguinte significado:

f_{ck} - Valor característico da tensão de rotura do betão à compressão aos 28 dias de idade;

$f_{ck,cubo}$ - Valor característico da tensão de rotura do betão à compressão de um cubo aos 28 dias de idade;

f_{cm} - Valor médio da tensão de rotura do betão à compressão;

f_{ctm} - Valor médio da tensão de rotura do betão à tracção simples;

E_{cm} - Módulo de elasticidade secante do betão.

(ii) Betão leve

As propriedades do betão leve encontram-se representadas na tabela (4.14):

Tabela 4.14 - Classes de resistência do betão leve

Símb.	Un.	LC12/13	LC16/18	LC20/25	LC25/28	LC30/33	LC35/38	LC40/44	LC45/50
f_{lck}	MPa	12	16	20	25	30	35	40	45
$f_{lck,cubo}$	MPa	13	18	22	28	33	38	44	50
f_{lcm}	MPa	20	24	28	33	38	43	48	53
f_{lctm}	MPa	$f_{lctm} = f_{ctm} \times \eta_1$							(4.13)
E_{lcm}	GPa	$E_{lcm} = E_{cm} \times \eta_E$							(4.14)

De acordo com o Eurocódigo 2 [55] o betão leve é classificado em função da massa volúmica. A tabela 4.15 indica as classes de massa volúmica normalizadas, bem como as massas volúmicas para o betão simples e armado, com percentagens normais de armadura, que podem ser utilizadas no cálculo do peso próprio ou de sobrecargas de natureza permanente.

Tabela 4.15 - Classes de massa volúmica e correspondentes valores de cálculo do betão leve [54]

Classe de massa volúmica	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
Massa volúmica (Kg/m ³)	801	1001	1201	1401	1601	1801
(seca em estufa)	a	a	a	a	a	a
	1000	1200	1400	1600	1800	2000
Massa volúmica (Kg/m ³)	Betão simples	1050	1250	1450	1650	1850
	Betão armado	1150	1350	1550	1750	1950
	2050	2150				

A resistência à tracção do betão leve pode ser obtida multiplicando os valores correspondentes ao betão normal pelo coeficiente η_1 .

$$\eta_1 = 0,60 \times \frac{\rho}{2200} \quad (4.15)$$

Na expressão (4.14), ρ representa o limite superior da massa volúmica para a classe do betão leve. A tabela 4.16 indica os valores de η_1 para as diferentes massas volúmicas considerando betão simples.

Tabela 4.16 - Coeficiente para a determinação da resistência à tracção, η_1

Classe de massa volúmica	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
Massa volúmica (Kg/m ³)	1050	1250	1450	1650	1850	2050
η_1	0,67	0,73	0,78	0,84	0,89	0,95

O módulo de elasticidade secante, E_{lcm} , do betão leve pode obter-se multiplicando os valores indicados na tabela 4.13, referentes ao betão de densidade normal pelo coeficiente η_E .

$$\eta_E = \left(\frac{\rho}{2200} \right)^2 \quad (4.16)$$

O factor de conversão para o cálculo do módulo de elasticidade, η_E , adquire os valores descritos na tabela 4.17.

Tabela 4.17 - Factor de conversão para o cálculo do módulo de elasticidade, η_E

Classe de massa volúmica	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
Massa volúmica (Kg/m ³)	1050	1250	1450	1650	1850	2050
η_E	0,21	0,30	0,40	0,53	0,67	0,83

Segundo o Eurocódigo 2 [55], o coeficiente de fluência, ϕ , para o betão leve é igual ao valor referente ao betão normal multiplicando pelo coeficiente seguinte.

$$\left(\frac{\rho}{2200} \right)^2 \quad (4.17)$$

Os valores de cálculo da tensão de rotura à compressão e à tracção são determinados de acordo com o Eurocódigo 2 [55]. Assim, o valor de cálculo da tensão de rotura à compressão é definido de acordo com a expressão (4.18).

$$f_{lcd} = \frac{\alpha_{lcc} \cdot f_{lck}}{\gamma_B} \quad (4.18)$$

Na expressão (4.18), γ_B é o coeficiente parcial de segurança relativo ao betão presente na tabela 4.6, do presente capítulo, e α_{lcc} é o coeficiente que tem em conta os efeitos de longo prazo na resistência à compressão e os efeitos desfavoráveis resultantes do modo como a carga é aplicada. Este coeficiente toma o valor de 0,85 no caso do betão leve.

O valor de cálculo da tensão de rotura à tracção é determinado segundo a expressão (4.19).

$$f_{lcta} = \frac{\alpha_{lcc} \cdot f_{lctk}}{\gamma_B} \quad (4.19)$$

O coeficiente α_{lcc} , para este caso, toma o valor de 0,85, igual ao considerado na resistência à compressão.

4.2.4. PROPRIEDADES DAS LIGAÇÕES

4.2.4.1. Deslizamento nas ligações

O módulo de deslizamento instantâneo, conforme o explicado no capítulo anterior, designa-se por k_{ser} (de serviceability) de acordo com o Eurocódigo 5 e por k_s de acordo com a norma EN 26891 [58].

Tabela 4.18 - Valores de K_{ser}

Tipo de ligador	K_{ser} (Módulo de deslizamento)	
Cavilhas		
Parafusos de porca com ou sem folga ¹	$\frac{\rho_m^{1,5} d}{23}$	(4.20)
Parafusos de enroscar		
Pregos (com pré-furação)	$\frac{\rho_m^{1,5} d^{0,8}}{30}$	(4.21)
Pregos (sem pré-furação)		
Agrafos	$\frac{\rho_m^{1,5} d^{0,8}}{80}$	(4.22)
Aneis do tipo A segundo a EN 912	$\frac{\rho_m d_c}{2}$	(4.23)
Aneis do tipo B segundo a EN 912		
Placas denteadas tipos C1 a C9 segundo a EN 912	$\frac{1,5 \rho_m d_c}{4}$	(4.24)
Placas denteadas tipos C1 a C9 segundo a EN 912	$\frac{\rho_m d_c}{2}$	(4.25)

¹ A folga deve ser adicionada separadamente à deformação

Na tabela anterior (Tabela 4.18), os símbolos representam:

ρ_m - valor médio da massa volúmica (capítulo 3);

d - diâmetro do ligador;

d_c - diâmetro nominal definido na EN 13271 [65].

Como se trata de uma ligação madeira-betão, o cálculo de K_{ser} deverá basear-se na massa volúmica ρ_m do elemento de madeira e poderá ser multiplicado por 2,0 conforme indica o ponto 7.1.3 do Eurocódigo 5, parte 1 [53].

O Eurocódigo 5 parte 1, Anexo B [53], não contempla o comportamento não-linear da estrutura mista. É então necessário fazer a distinção para o módulo de deslizamento a considerar em cada estado limite. Para os Estados-limite de utilização, k_{ser} , deve ser determinado de acordo com a norma EN 26891 [58], ou através da anterior enquanto que para os Estados-limite último, k_u , deve ser determinado através da expressão (4.26).

$$k_u = \frac{2}{3} k_{ser} \quad (4.26)$$

Alguns investigadores indicam no entanto, para k_u o valor dado pela expressão (4.27).

$$k_u = 0,6 \frac{F_{máx}}{v_{0,6}} \quad (4.27)$$

$F_{máx}$ representa a força máxima descrita na EN26891 [58]. (Ver capítulo 3).

4.2.4.2. Capacidade resistente da ligação

Para ligações madeira-betão são consideradas três formas de rotura, sendo estas:

- Compressão localizada no betão;
- Rotura do ligador por corte;
- Compressão localizada na madeira.

As expressões que se seguem, encontram-se de acordo com o descrito por Ceccotti, STEP2 [2], e adaptadas no Eurocódigo 5 [53].

(i) Compressão localizada no betão

O esmagamento por compressão localizada no betão dá-se quando este não resiste ao esforço aplicado pelo ligador (figura 4.3).

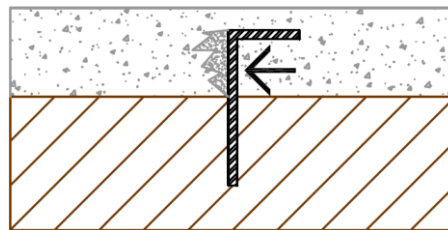


Fig. 4.3 - Esmagamento do betão

A expressão de verificação é a (4.28).

$$F_{v,Rk} = 0,23d^2 \sqrt{f_{ck} \frac{E_1}{\gamma_{M,v}}} \quad (4.28)$$

(ii) Rotura do ligador por corte

Nos sistemas mistos madeira-betão pode ocorrer o corte do ligador, sendo necessário verificar a sua segurança (figura 4.4).

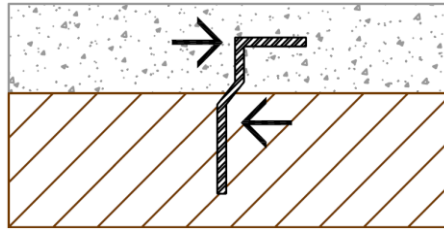


Fig. 4.4 - Rotura do ligador por corte

Para o cálculo, a expressão a usar é a (4.29).

$$F_{v,Rk} = 0,8 f_u \frac{\pi \cdot d^2}{4 \gamma_{M,v}} \quad (4.29)$$

(iii) Compressão localizada na madeira

A rotação do ligador na secção do furo origina o esmagamento da madeira, conforme o indicado na figura 4.5, sendo a força de rotura dada pela expressão (4.30).

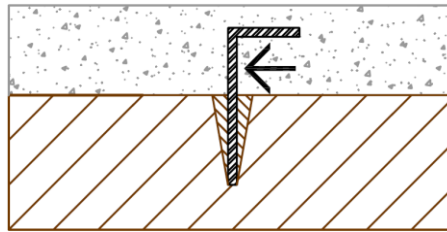


Fig. 4.5 - Esmagamento da madeira

$$F_{v,Rk} = 1,5 \sqrt{2 \cdot M_{y,Rd} \cdot f_{h,2,d} \cdot d} \quad (4.30)$$

Os símbolos referidos têm o seguinte significado:

d - diâmetro do ligador, em mm;

f_{ck} - valor característico da resistência à compressão do betão, em N/mm^2 ;

E_1 - módulo de elasticidade do betão, em N/mm^2 ;

$\gamma_{M,v}$ - coeficiente parcial de segurança para as propriedades dos materiais. Os valores referidos na tabela 4.2 deste capítulo;

f_u - valor da tensão de rotura à tracção do fio de aço, em N/mm ;

$M_{y,Rd}$ - valor característico do momento de cedência plástica, em $N \cdot mm$;

$f_{h,2,d}$ - resistência ao esmagamento da madeira, em N/mm^2 .

4.2.4.3. Valores característicos dos sistemas de ligação

O momento de cedência plástica, tal como na construção metálica, corresponde ao momento flector instalado numa barra quando é criada uma rótula plástica, devido ao esgotamento da capacidade resistente da secção à flexão. A rótula é formada pela pressão exercida pelo contacto com a madeira que origina forças transversais que se transformam em momento flector ao longo da barra, neste caso, ao longo do ligador [5].

(i) Cavilhas

Para cavilhas, deverá tomar-se o valor característico do momento de cedência plástica dado por (4.31). (EC5)

$$M_{y,Rk} = 0,3 \cdot f_{u,k} \cdot d^{2,6} \quad (4.31)$$

Na expressão acima, símbolos representam:

$M_{y,Rk}$ - valor característico do momento de cedência plástica, em N/mm;

$f_{u,k}$ - valor característico da tensão resistente à tracção do ligador, em N/mm²;

d - diâmetro da cavilha, em mm.

Para cavilhas deverão ser considerados os seguintes valores característicos da resistência ao esmagamento localizado na madeira, para um ângulo α em relação ao fio (expressões (4.32) a (4.36)).

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{f_{h,0,k}}{K_{90} \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \quad (4.32)$$

, com,

$$f_{h,0,k} = 0,082(1 - 0,01d)\rho_k \quad (4.33)$$

, e K_{90} dado pelas expressões,

$$K_{90} = 1,35 + 0,015d \quad \text{Madeiras de resinosas} \quad (4.34)$$

$$K_{90} = 1,30 + 0,015d \quad \text{LVL} \quad (4.35)$$

$$K_{90} = 0,90 + 0,015d \quad \text{Madeiras de folhosas} \quad (4.36)$$

Os símbolos das expressões (4.32) a (4.36) têm o seguinte significado:

$f_{h,0,k}$ - valor característico da resistência ao esmagamento localizado paralela ao fio, em N/mm²;

ρ_k - valor característico da massa volúmica da madeira, em kg/m³;

α - ângulo entre o esforço e o fio;

d - diâmetro da cavilha, em mm.

No caso de sistemas mistos madeira-betão admite-se um ângulo de 0°, não havendo ângulo força-fio.

(ii) Pregos

As expressões que se seguem são válidas para pregos de diâmetro inferior a 8mm, caso contrário, o Eurocódigo 5 direcciona para as expressões correspondentes a cavilhas.

Os pregos podem ser divididos em duas categorias, com pré-furação e sem pré-furação devendo ser feita a pré-furação sempre que:

- o valor característico da massa volúmica da madeira for superior a 500kg/m³;
- o diâmetro d do prego exceda 6mm.

No caso de se recorrer a pregos de secção quadrada, o diâmetro a considerar deverá ser a dimensão de um dos lados da secção.

O valor característico do momento de cedência plástica para pregos de secção circular é obtido da seguinte forma:

$$M_{y,Rk} = 0,3 \cdot f_{u,k} \cdot d^{2,6} \quad (4.37)$$

, enquanto para pregos de secção quadrada:

$$M_{y,Rk} = 0,45 \cdot f_{u,k} \cdot d^{2,6} \quad (4.38)$$

O símbolo $f_{u,k}$ corresponde à tensão de rotura à tracção do fio de aço, em mm.

Relativamente à resistência ao esmagamento localizado da madeira para o caso dos pregos aplicados sem pré-furação, o seu valor característico é obtido através da seguinte expressão:

$$f_{h,k} = 0,082 \rho_k d^{-0,3} \quad (4.39)$$

No caso dos pregos com pré-furação a expressão é:

$$f_{h,k} = 0,082(1 - 0,01d)\rho_k \quad (4.40)$$

Para uma fácil consulta é proposta a tabela 4.19.

Tabela 4.19 - Momento de cedência plástica e resistência ao esmagamento localizado da madeira para cavilhas e pregos

Sistema de ligação			Momento de cedência plástica	Resistência ao esmagamento localizado da madeira
Cavilhas			$M_{y,Rk} = 0,3 \cdot f_{u,k} \cdot d^{2,6}$	$f_{h,k} = \frac{0,082(1 - 0,01d)\rho_k}{k_{90} \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha}$
Pregos	Secção	Pré-furação		
	Circular	Sim	$M_{y,Rk} = 0,3 \cdot f_{u,k} \cdot d^{2,6}$	$f_{h,k} = 0,082(1 - 0,01d)\rho_k$
	Quadrada	Não	$M_{y,Rk} = 0,45 \cdot f_{u,k} \cdot d^{2,6}$	$f_{h,k} = 0,082 \rho_k d^{-0,3}$
	Circular	Sim	$M_{y,Rk} = 0,3 \cdot f_{u,k} \cdot d^{2,6}$	$f_{h,k} = 0,082(1 - 0,01d)\rho_k$
	Quadrada	Não	$M_{y,Rk} = 0,45 \cdot f_{u,k} \cdot d^{2,6}$	$f_{h,k} = 0,082 \rho_k d^{-0,3}$

4.2.5. PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS

4.2.5.1. Características dos materiais

As áreas da madeira e do betão são dadas por:

$$A_i = b_i \times h_i \quad (4.41)$$

, em que,

$$b_B = 0,25 \times L < e \quad (4.42)$$

Nas expressões (4.41) e (4.42) os símbolos representam:

L - vão equivalente da viga, em mm;

e - espaçamento entre vigas, em mm;

b_i - base dos materiais, betão e madeira, em mm;

h_i - altura dos materiais, betão e madeira, em mm.

As inércias dos materiais são dadas por:

$$I_i = \frac{b_i \times h_i^3}{12} \quad (4.43)$$

4.2.5.2. Disposições construtivas

O EC5 sugere para o cálculo, a utilização de um espaçamento constante, s_{eq} , correspondente ao espaçamento entre ligadores, s .

$$s_{eq} = 0,75s_{min} + 0,25s_{máx} \quad (4.44)$$

Os símbolos da expressão (4.44) têm o seguinte significado:

s_{min} - espaçamento mínimo entre os ligadores, em mm;

$s_{máx}$ - espaçamento máximo entre os ligadores, em mm;

s_{eq} - espaçamento equivalente entre os ligadores, em mm.

Os valores de s_{min} e $s_{máx}$ podem ser fixados pelo projectista, podendo este recorrer às *expressões empíricas* (4.45) a (4.47).

$$s_{min} = \frac{(h_M - 10)}{2} \quad (4.45)$$

$$s_{máx} = \frac{h_M}{L} \times 5000 - 10 \quad (4.46)$$

Respeitando,

$$s_{máx} = 4 \times s_{min} \quad (4.47)$$

As expressões (4.44) a (4.47) são indicadas em [27] e, segundo esse autor têm origem em indicações originalmente publicadas em [61].

A redistribuição pode compensar no caso da capacidade de carga do sistema mas o rearranjo obriga a criar novos pontos de apoio do sistema, o que por vezes é impossível quando se está na presença de estruturas com paredes resistentes já existentes.

Segundo o Eurocódigo 5, parte 2 [61], para sistemas mistos madeira-betão, a largura efectiva do betão deve ser determinada de acordo com:

$$b_{ef,B} = b_M + b_{ef,B1} + b_{ef,B2} \quad (4.48)$$

, onde,

$b_{ef,B}$ - Largura efectiva do banzo de betão, em m;

b_M - Largura da viga de madeira, em m;

$b_{ef,B1}$, $b_{ef,B2}$ - Largura efectiva do banzo parcial 1 e 2 do betão (de acordo com a figura seguinte) determinadas para uma secção de betão em T de acordo com o Eurocódigo 2 [55], em m.

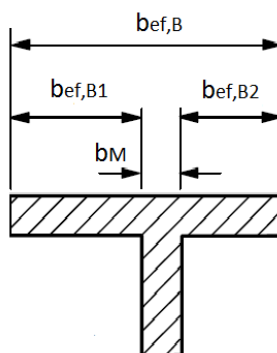


Fig. 4.6 - Parâmetros para a determinação da largura efectiva do banzo⁵ (Adaptado: [55])

Visto o Eurocódigo 5, parte 2 [61], se focar em considerações relativas a pontes, os parâmetros anteriormente descritos são meramente indicativos de forma a facilitar o projectista, não sendo obrigatório cumprir as imposições descritas nesse documento.

4.3.MODELO DE CÁLCULO - ESTUDO TEÓRICO

O estudo que se segue assenta na tese de doutoramento desenvolvida na Universidade Politécnica de Valência por José Luís Pardo Ros com o título *Estructuras Mixtas de Hormigón - Madera Aplicadas a la Rehabilitación de Forjados* no ano de 1997 [7]. O estudo foca-se em especial em pavimentos de madeira existentes, admitindo que o reforço é formado por uma camada de compressão de betão de pequena espessura.

4.3.1. HIPÓTESES DE CÁLCULO

Para o desenvolvimento do estudo, foi necessário definir hipóteses de cálculo admitindo que uma deformação plana das secções parciais de betão e madeira ocorre, mas não na secção total, visto que neste tipo de estrutura só é possível obter uma ligação deformável. Apenas são considerados os efeitos

⁵ O Eurocódigo 2 descreve todos os parâmetros no ponto 5.3.2.1.

resistentes da viga de madeira bem como a secção de betão à compressão, considerando os efeitos da fissuração. Os materiais são considerados como tendo um comportamento elástico-linear bem como os elementos da ligação tendo em conta, sempre, que o betão apenas trabalha como elemento único. Apesar de ser reforçado com uma malha de aço, esta não entra para o cálculo, visto só minorar o aparecimento da fendilhação bem como pelo facto de ser definida como sendo armadura de esforço transversal porque a espessura da laje é reduzida. Logo não se considera a laje de betão como sendo laje de betão armado, apenas se considerando a resistência de betão à compressão formando um binário com a viga de madeira que funciona à tracção. Outra hipótese a ser levada em conta é que não se considera o desprendimento da viga de madeira da laje de betão, admitindo assim que há igualdade de flecha e curvatura em ambos os materiais. Admite-se também que a força rasante que é transferida entre os dois materiais é constante ao longo do plano de ligação, bem como, apesar de se considerarem ligadores pontuais, estes encontram-se distribuídos de forma constante com o objectivo de formarem uma ligação contínua. Há que realçar que no cálculo se admitem secções constantes, tanto para a madeira como para o betão e que todas as cargas, incluindo o peso próprio são suportadas na totalidade pelo sistema misto em conjunto.

4.3.2. LIGADORES

No capítulo anterior procedeu-se à classificação dos ligadores quanto à rigidez da ligação. Foi definido que o sistema de ligação pode variar entre ligação nula, onde não há interacção entre os materiais e ligação rígida, que é o caso das colas, onde os dois materiais podem ser definidos como funcionando totalmente em sintonia estrutural. Neste tipo de análise, admite-se que as ligações a estudar se encontram dentro do intervalo global, tendo assim um comportamento semi-rígido.

Sabendo que a relação entre o esforço rasante F e o deslizamento relativo entre as superfícies de contacto do betão e da madeira é dado por:

$$F = -k \cdot u \quad (4.49)$$

, onde,

F - Força paralela ao eixo da viga que se transmite através de cada ligador;

k - Rigidez do ligador;

u - Deslizamento relativo entre a madeira e o betão no centro de gravidade da secção de betão.

Considerando a rigidez do ligador uniformemente distribuída, admite-se uma rigidez unitária k/s cuja relação com o esforço rasante é dada pela seguinte expressão:

$$F = -\frac{k}{s} u \quad (4.50)$$

Na figura 4.8 apresenta-se a secção transversal do sistema misto madeira-betão e, admitindo um equilíbrio de forças, e tendo em conta também que a deformação é uma variação do deslizamento:

$$\varepsilon = \frac{du}{dx} \quad (4.51)$$

, então obtemos:

$$\varepsilon = -\frac{s}{k} \cdot \frac{h_B^2 \cdot N_B}{dx^2} \quad (4.52)$$

sendo esta a expressão que define a diferença entre a deformação do betão e da madeira na fibra de contacto admitindo uma rigidez contínua na ligação entre os materiais.

4.3.3. CARGAS APLICADAS

Conforme já referido neste capítulo, a carga aplicada é a soma da carga correspondente ao peso próprio das vigas de madeira e da laje de betão bem como a camada intermédia, mais as cargas variáveis e a carga correspondente à carga permanente atribuída à solução.

Se admitirmos a viga de secção mista duplamente apoiada e submetida a uma carga constante q , o momento flector numa secção, sendo x a distância ao apoio, é dado por:

$$M(x) = \frac{q \cdot x}{2} (L - x) \quad (4.53)$$

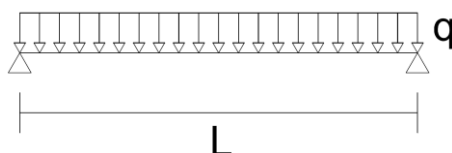


Fig. 4.7 - Carga aplicada

Os esforços encontram-se representados na figura 4.8.

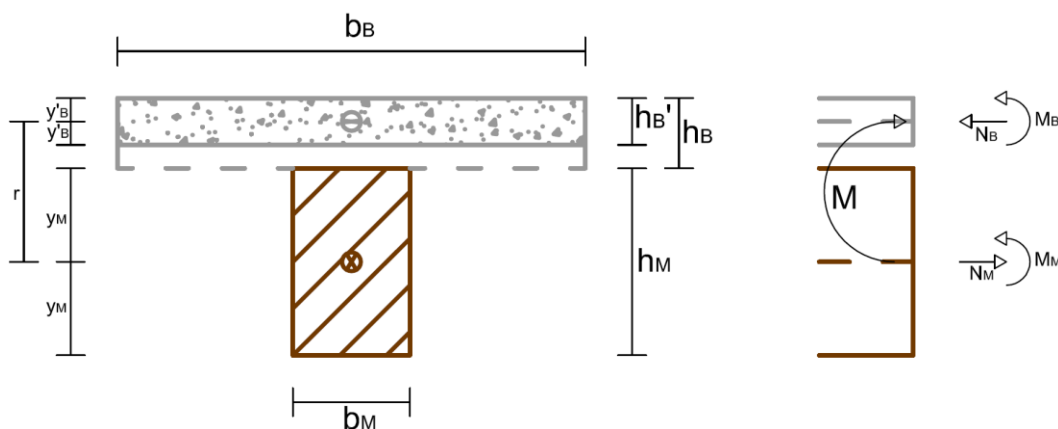


Fig. 4.8 - Secção transversal em equilíbrio. Os esforços distribuídos nas secções parciais equilibram o momento actuante exterior

4.3.4. TENSÕES INICIAIS

A fim de descontar o betão à tracção, e a camada intermédia definiu-se o parâmetro r que representa a distância entre os centros de gravidade entre as secções de betão não fissurado, à compressão, e a madeira.

Admitindo a figura 4.8 e estabelecendo o equilíbrio de forças e momentos, obtemos as seguintes expressões:

$$\sum F = 0 \Leftrightarrow N_B(x) = N_M(x) = N(x) \quad (4.54)$$

, e,

$$\sum M = 0 \Leftrightarrow M_B(x) + M_M(x) + N(x) \cdot r = N(x) \quad (4.55)$$

A igualdade em termos de flecha e curvatura em qualquer secção entre os dois materiais garante a igualdade das expressões seguintes:

$$\frac{M_B(x)}{E_B I_B} = \frac{M_M(x)}{E_M I_M} \quad (4.56)$$

De acordo com o equilíbrio de forças referenciadas anteriormente e a igualdade das curvaturas, obtêm-se os momentos parciais que actuam no betão e na madeira em função de $M(x)$ e $N(x)$.

$$M_B(x) = (M(x) - N(x) \cdot r) \frac{E_B I_B}{E_B I_B + E_M I_M} \quad (4.57)$$

, e,

$$M_M(x) = (M(x) - N(x) \cdot r) \frac{E_M I_M}{E_B I_B + E_M I_M} \quad (4.58)$$

Os símbolos têm o seguinte significado:

E_B - Módulo de elasticidade do betão;

I_B - Momento de inércia da laje de betão à compressão;

E_M - Módulo de elasticidade da madeira;

I_M - Momento de inércia da madeira.

O deslizamento entre as fibras de contacto dos materiais, equação referente à diferença entre a deformação do betão e da madeira na fibra de contacto, tem de ser igual à diferença das extensões de cada uma das fibras causadas pelas tensões produzidas.

$$\left[-\frac{N(x)}{A_B E_B} + \frac{M_B(x) \left(r - \frac{h_M}{2} \right)}{E_B I_B} \right] - \left[-\frac{N(x)}{A_M E_M} - \frac{M_M(x) \left(\frac{h_M}{2} \right)}{E_M I_M} \right] = -\frac{s}{k} \cdot \frac{h_B^2 \cdot N(x)}{dx^2} \quad (4.59)$$

, onde A_B é área do betão na zona comprimida.

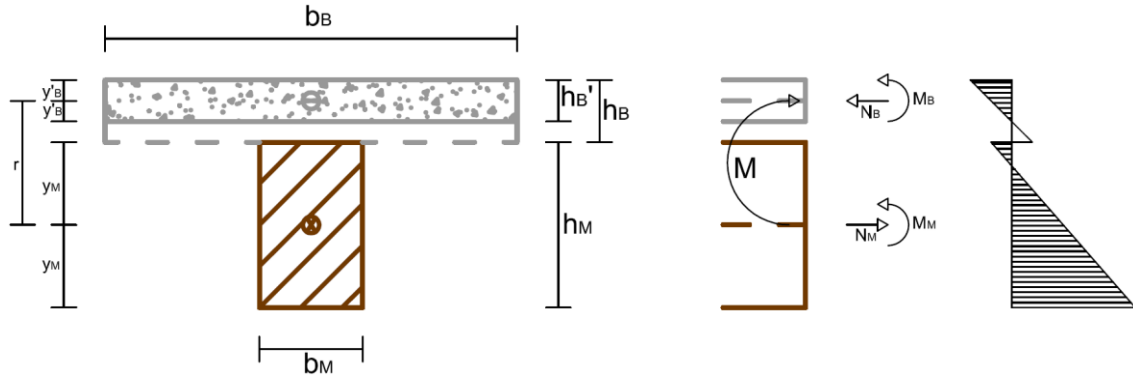


Fig. 4.9 - Secção de equilíbrio e diagrama de deformações resultante

Admitindo um sistema de quatro incógnitas constituído pelas expressões (4.54), (4.55), (4.56) e a expressão resultante da simplificação imposta pelas expressões (4.57) e (4.58) na expressão (4.59) obtém-se a seguinte expressão:

$$\frac{s}{k} \cdot \frac{d^2 \cdot N(x)}{dx^2} = (\alpha + r^2 \cdot \beta) \cdot N(x) = -\beta \cdot r \cdot M(x) \quad (4.60)$$

, onde:

$$\alpha = \frac{1}{E_B A_B} + \frac{1}{E_M A_M} \quad (4.61)$$

, e,

$$\beta = \frac{1}{E_B I_B} + \frac{1}{E_M I_M} \quad (4.62)$$

A expressão (4.60) é uma equação diferencial de 2ª ordem de coeficientes constantes que integrando adquire a seguinte forma:

$$N''(x) - \chi^2 \cdot N(x) = -\beta \cdot \frac{k}{s} \cdot r \cdot M(x) \quad (4.63)$$

, onde,

$$\chi^2 = \frac{k}{s} (\alpha + r^2 \cdot \beta) \quad (4.64)$$

A resolução desta equação permite chegar à expressão (4.65).

$$N(x) = \frac{\beta \cdot q \cdot k \cdot r}{s \cdot \chi^4} \left[1 - \frac{\cosh(\chi \cdot L)}{\sinh(\chi \cdot L)} \sinh(\chi \cdot x) + \cosh(\chi \cdot x) \right] + \frac{\beta \cdot q \cdot k \cdot r}{2 \cdot s \cdot \chi^2} \left[-x^2 + L \cdot x - \frac{2}{\chi^2} \right] \quad (4.65)$$

Esta expressão permite obter o valor do esforço axial no betão e na madeira em qualquer secção da estrutura, mas para este estudo apenas é relevante determinar o valor do esforço axial onde o momento é máximo, ou seja, em:

$$x = \frac{L}{2} \quad (4.66)$$

, e,

$$N\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{\beta \cdot k \cdot q \cdot r}{s \cdot \chi^2} \left[\frac{2 \sinh\left(\chi \cdot \frac{L}{2}\right)}{\chi^2 \sinh(\chi \cdot L)} + \frac{L^2}{8} - \frac{1}{\chi^2} \right] \quad (4.67)$$

Como já anteriormente foi descrita a relação entre o esforço axial e os momentos parciais de cada material é possível chegar a às seguintes expressões:

$$M_B\left(\frac{L}{2}\right) = \left[\frac{q \cdot L^2}{8} - N\left(\frac{L}{2}\right) \cdot r \right] \cdot \beta \cdot E_B \cdot I_B \quad (4.68)$$

$$M_M\left(\frac{L}{2}\right) = \left[\frac{q \cdot L^2}{8} - N\left(\frac{L}{2}\right) \cdot r \right] \cdot \beta \cdot E_M \cdot I_M \quad (4.69)$$

Com o conhecimento dos esforços em cada secção, podem-se calcular as tensões em qualquer ponto da peça, bem como os seus valores máximos.

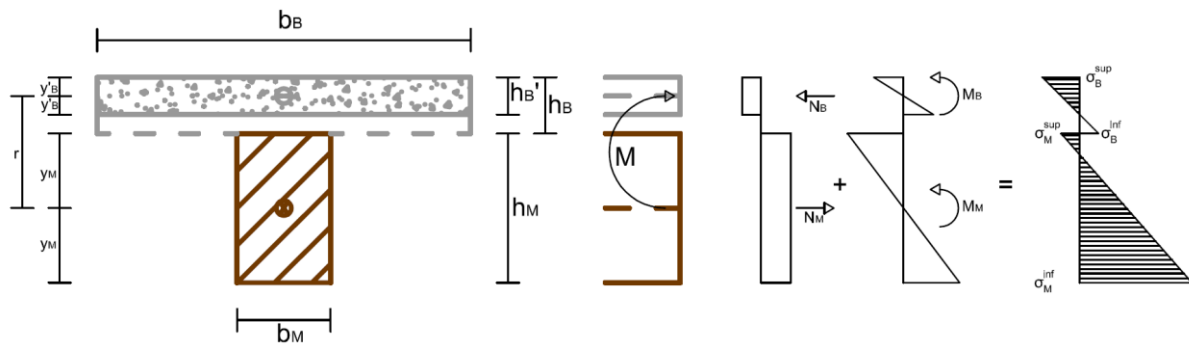


Fig. 4.10 - Secção transversal, diagrama de tensões

Tabela 4.20 - Tensões na secção da estrutura mista

Designação	Símbolo	Expressão
Tensão na fibra superior do betão	σ_B^{sup}	$\sigma_B^{sup} = -\frac{N}{A_B} - \frac{M_B \cdot y'_B}{I_B}$ (4.70)
Tensão na fibra inferior do betão	σ_B^{inf}	$\sigma_B^{inf} = -\frac{N}{A_B} + \frac{M_B \cdot y'_B}{I_B}$ (4.71)
Tensão na fibra superior da madeira	σ_M^{sup}	$\sigma_M^{sup} = \frac{N}{A_M} - \frac{M_M \cdot y_M}{I_M}$ (4.72)
Tensão na fibra inferior da madeira	σ_M^{inf}	$\sigma_M^{inf} = \frac{N}{A_M} + \frac{M_M \cdot y_M}{I_M}$ (4.73)

Os valores máximos são atingidos nas extremidades da secção, de modo a que, o betão na sua fibra superior se encontre sempre à compressão e a madeira na sua fibra inferior se encontre sempre à tracção. A fibra inferior do betão pode-se encontrar à tracção ou à compressão, bem como a fibra superior da madeira. Este facto depende de múltiplos factores podendo estes serem relativos à rigidez do ligador, aos módulos de elasticidade dos materiais e à geometria da secção [7].

É necessário ter em especial cuidado a fibra inferior do betão já que este não se deve encontrar à tracção devido à sua pouca resistência a esforços de tracção. O mesmo já não é importante que aconteça na madeira, já que esta apresenta um bom comportamento à compressão.

4.3.5. DEFORMAÇÃO

De acordo com o que já foi referido anteriormente, as secções parciais de betão e da madeira têm de apresentar a mesma curvatura e a mesma flecha o que nos leva a:

$$\frac{d^2 y_M}{dx^2} = -\frac{M_M}{E_M \cdot I_M} \quad (4.74)$$

Através das expressões (4.58) e (4.63) obtém-se a expressão seguinte:

$$y_M = \beta \cdot \left[\frac{\beta \cdot r^2 \cdot k}{s \cdot \chi^2} - 1 \right] \cdot \left[\frac{q \cdot L}{12} \cdot x^2 - \frac{q}{24} x^4 - \frac{q \cdot L^3}{24} x^3 \right] + \frac{\beta \cdot r}{\chi^2} \cdot N(x) \quad (4.75)$$

No caso presente, a situação que é necessária determinar é onde a flecha é máxima e, no caso de uma viga simplesmente apoiada, a flecha é máxima no centro onde:

$$x = \frac{L}{2} \quad (4.76)$$

, logo,

$$y_M \left(x = \frac{L}{2} \right) = \frac{5}{384} q \cdot L^4 \cdot \beta \left[1 - \frac{\beta \cdot k \cdot r^2}{s \cdot \chi^2} \right] + \frac{q \cdot \beta^2 \cdot k \cdot r^2}{s \cdot \chi^4} \left[\frac{2 \sinh \left(\chi \cdot \frac{L}{2} \right)}{\chi^2 \sinh(\chi \cdot L)} + \frac{2L^2}{16} - \frac{1}{\chi^2} \right] \quad (4.77)$$

A expressão apenas permite determinar a flecha máxima inicial, ou seja, a flecha inicial elástica.

4.3.6. ESFORÇO RASANTE

O esforço rasante é caracterizado pela variação de esforços axiais entre as secções de betão e da madeira.

$$F(x) = \frac{dN_B(x)}{dx} = \frac{dN_M(x)}{dx} = \frac{dN(x)}{dx} \quad (4.78)$$

A derivada da expressão (4.65) é a expressão (4.73).

$$F(x) = \frac{dN(x)}{dx} = \frac{\beta \cdot q \cdot k \cdot r}{s \cdot \chi^4} \left[\frac{1 - \cosh(\chi \cdot L)}{\sinh(\chi \cdot L)} \cosh(\chi \cdot x) + \sinh(\chi \cdot x) \right] + \frac{\beta \cdot q \cdot k \cdot r}{2 \cdot s \cdot \chi^2} [-2 \cdot x + L] \quad (4.79)$$

A expressão representa a variação do esforço rasante ao longo da peça, sendo, que a meio vão, o esforço rasante é nulo. Contrariamente, nos apoios o esforço é máximo onde o momento é máximo e de sinais contrários nos extremos.

$$F(0) = F(L) = \frac{\beta \cdot q \cdot k \cdot r}{s \cdot \chi^2} \left[\frac{1}{\chi^2} \cdot \frac{1 - \cosh(\chi \cdot L)}{\sinh(\chi \cdot L)} + \frac{L}{2} \right] \quad (4.80)$$

Para o dimensionamento dos ligadores, admitindo que eles se encontram dispostos de forma constante, o valor a ser considerado é o valor acima descrito, visto ser o mais desfavorável.

4.3.7. TENSÕES FINAIS E DEFORMAÇÕES FINAIS

No sistema misto madeira-betão ambos os materiais, quando são postos em obra e ao longo do tempo, apresentam efeitos diferidos no tempo. No caso da madeira, os efeitos de fluência são mais gravosos quando esta se encontra à compressão.

Na análise do diagrama tensão-deformação da madeira, quando sujeita a esforços de tracção e deformação, é visível a diferença entre os módulos de elasticidade à tracção e à compressão sendo que o módulo de elasticidade à tracção é superior em cerca de 50% comparativamente ao módulo de elasticidade à compressão bem como a resistência à tracção é praticamente o dobro da resistência à compressão [7].

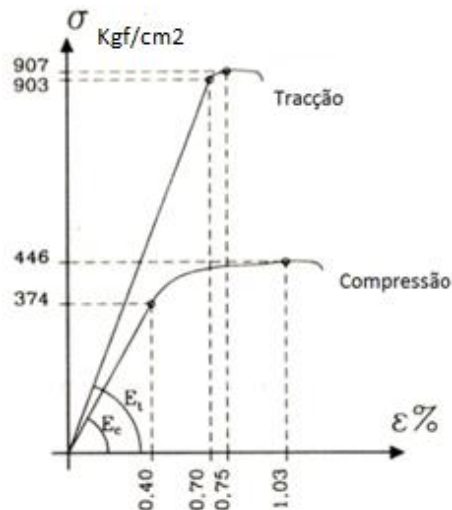


Fig. 4.11 - Diagrama tensão-deformação da madeira à tracção e à compressão paralela à fibra (Adaptado de [7])

No caso específico de sistema misto madeira-betão, o problema de fluência da madeira não é preocupante visto que ao se associar, na zona comprimida da viga de madeira, uma laje de betão, as compressões na madeira são eliminadas quase na totalidade (Ver figura 4.12).

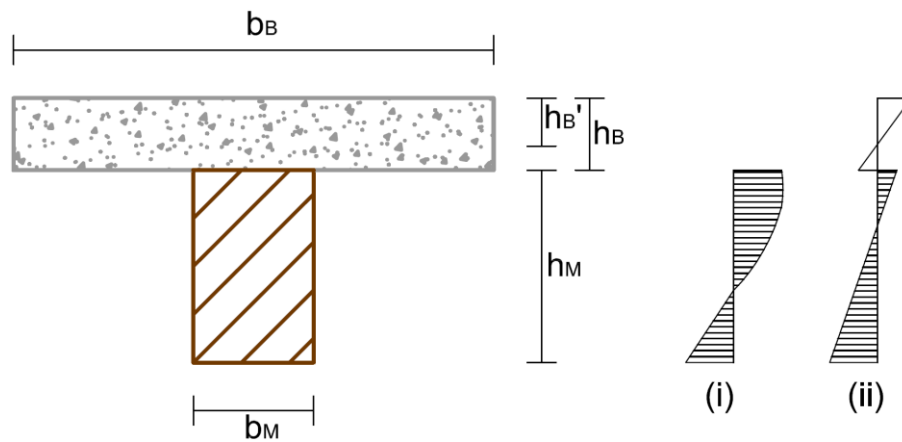


Fig.4.12 - Diagrama de tensões da madeira. (i) Antes da laje de betão; (ii) Depois da laje de betão

O betão é um material que tem grandes variações com o decurso do tempo ao nível da carga aplicada, fluência, ao nível de descarregamento e retracção. Este facto vai influenciar o comportamento global da estrutura.

Para se englobar o efeito da fluência no dimensionamento de um sistema misto madeira-betão, associou-se ao módulo de elasticidade do betão o coeficiente de fluência ϕ , relacionando este parâmetro as deformações finais de longo prazo com as deformações iniciais.

$$E_{c\infty} = \frac{E_c}{(1 + \phi)} \quad (4.81)$$

Os símbolos da expressão (4.81) representam:

$E_{c\infty}$ - Módulo de elasticidade para o tempo ∞ (infinito);

E_c - Módulo de elasticidade para o tempo 0 (zero);

ϕ - Coeficiente de fluência (Para o caso mais usual, tempo infinito, este parâmetro varia entre 2 e 2,5).

As acções que provocam fluência são as de carácter permanente, sendo estas as que actuam durante um longo período contínuo de tempo. Por este motivo, os métodos descritos anteriormente para tensões e deformações iniciais são igualmente válidos para tensões e deformações finais tendo em conta que as cargas a considerar são as de carácter permanente.

Há que ter em conta que as expressões seguintes sofrem alterações:

$$\alpha_{\infty} = \frac{1}{E_{B\infty} A_B} + \frac{1}{E_M A_M} \quad (4.82)$$

$$\beta_{\infty} = \frac{1}{E_{B\infty} I_B} + \frac{1}{E_M I_M} \quad (4.83)$$

, bem como,

$$\chi_{\infty}^2 = \frac{k}{s} (\alpha_{\infty} + r^2 \cdot \beta_{\infty}) \quad (4.84)$$

Desta forma, as expressões dos momentos que actuam nas secções parciais da madeira e do betão adquirem a seguinte forma:

$$M_{B\infty} \left(\frac{L}{2} \right) = \left[\frac{q \cdot L^2}{8} - N_{\infty} \left(\frac{L}{2} \right) \cdot r \right] \cdot \beta_{\infty} \cdot E_{B\infty} \cdot I_B \quad (4.85)$$

$$M_{M\infty} \left(\frac{L}{2} \right) = \left[\frac{q \cdot L^2}{8} - N_{\infty} \left(\frac{L}{2} \right) \cdot r \right] \cdot \beta_{\infty} \cdot E_M \cdot I_M \quad (4.86)$$

, onde,

$$N \left(\frac{L}{2} \right) = \frac{\beta_{\infty} \cdot k \cdot q \cdot r}{s \cdot \chi_{\infty}^2} \left[\frac{2 \sinh \left(\chi_{\infty} \cdot \frac{L}{2} \right)}{\chi_{\infty}^2 \sinh(\chi_{\infty} \cdot L)} + \frac{L^2}{8} - \frac{1}{\chi_{\infty}^2} \right] \quad (4.87)$$

O esforço rasante máximo sofre também alterações, de acordo com a seguinte expressão:

$$F_{\infty}(0) = F_{\infty}(L) = \frac{\beta_{\infty} \cdot q \cdot k \cdot r}{s \cdot \chi_{\infty}^2} \left[\frac{1}{\chi_{\infty}^2} \cdot \frac{1 - \cosh(\chi_{\infty} \cdot L)}{\sinh(\chi_{\infty} \cdot L)} + \frac{L}{2} \right] \quad (4.88)$$

É assim possível calcular a flecha diferida no tempo pela expressão (4.83).

$$y_{M\infty}\left(x = \frac{L}{2}\right) = \frac{5}{384} q \cdot L^4 \cdot \beta_{\infty} \left[1 - \frac{\beta_{\infty} \cdot k \cdot r^2}{s \cdot \chi_{\infty}^2} \right] + \frac{q \cdot \beta_{\infty}^2 \cdot k \cdot r^2}{s \cdot \chi_{\infty}^4} \left[\frac{2 \sinh\left(\chi_{\infty} \cdot \frac{L}{2}\right)}{\chi_{\infty}^2 \sinh(\chi_{\infty} \cdot L)} + \frac{2L^2}{16} - \frac{1}{\chi_{\infty}^2} \right] \quad (4.89)$$

4.4. MODELO DE CÁLCULO - MÉTODO SIMPLIFICADO

4.4.1. INTRODUÇÃO

O método de cálculo que se apresenta em seguida é um método, actualmente muito utilizado neste tipo de estruturas, estando este descrito por Ario Ceccotti na publicação STEP 2 [2], baseando-se no Modelo de Cálculo apresentado no anexo B do Eurocódigo 5 [53] para vigas com ligadores. O modelo referido na norma tem como base o modelo proposto por Mohler, estando este adaptado para estruturas mistas madeira-betão [30]. O método considera uma viga de madeira ligada a uma laje de betão, por um sistema de ligação, conforme mostra a figura 4.13.

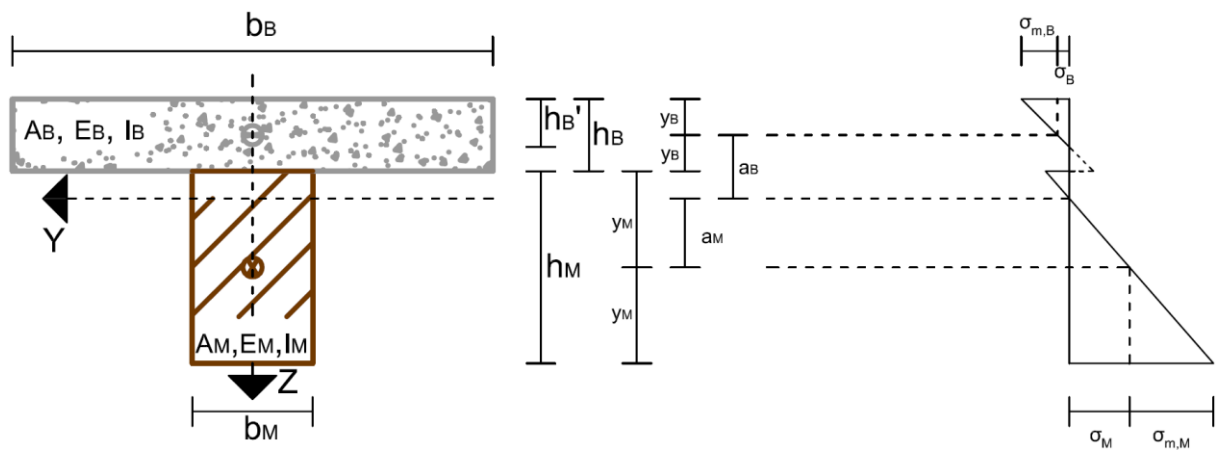


Fig.4.13 - Secção transversal à esquerda e distribuição de tensões normais devidas à flexão à direita. Todas as dimensões devem ser tomadas como positivas de acordo com o que é indicado (Adaptado de [53])

É de referir que o método descrito no anexo B do Eurocódigo 5 [53] baseia-se na teoria da elasticidade linear e nas seguintes hipóteses:

- as vigas são normalmente apoiadas com um vão L . Em vigas contínuas as expressões podem ser utilizadas com L igual a 0,8 vezes o comprimento do vão relevante. Para vigas em consola deve adoptar-se um comprimento L igual a 2 vezes o vão da consola;
- a secção transversal é constante ao longo do eixo das vigas;
- as diferentes partes constituintes das vigas são ligadas entre si por ligadores mecânicos com um módulo de deslizamento k ;
- os ligadores terão espaçamento constante ou variável de acordo com a força de corte; No caso de espaçamento variável o espaçamento máximo não deve ser superior a 4 vezes o espaçamento mínimo;
- as forças aplicadas segundo uma direcção Z originarão um momento flector $M(x)$, com variação sinusoidal ou parabólica e uma força de corte $V=V(x)$.

Convém referir que o coeficiente de fluência do betão é maior do que o coeficiente de fluência da madeira e que, por esse motivo, as tensões existentes no betão, ao longo do tempo, vão ser transferidas para a madeira. Por isso, o sistema misto deve ser verificado tanto no seu estado inicial como no estado final.

4.4.2. RIGIDEZ EFECTIVA À FLEXÃO

Através das equações de equilíbrio resultantes da distribuição das tensões de flexão é definida a rigidez à flexão.

$$(EI)_{ef} = (E_B \times I_B + \gamma_B \times E_B \times A_B \times a_B^2) + (E_M \times I_M + \gamma_M \times E_M \times A_M \times a_M^2) \quad (4.90)$$

Neste modelo, a partir do módulo de deslizamento do ligador utilizado, define-se o factor de redução. A redução é feita para o material que apresentar maior módulo de elasticidade tendo-se portanto [30]:

$$\gamma_M = 1 \quad (4.91)$$

Admitindo-se unitário e,

$$\gamma_B = \left(1 + \frac{\pi^2 \times E_B \times A_B \times s}{k_\alpha \times L^2} \right)^{-1} \quad (4.92)$$

, onde,

s - espaçamento entre ligadores, em mm;

L - vão da viga, em mm;

k_α - módulo de deslizamento. No caso de Estados-limite de serviço considerar k_{ser} e no caso de Estados-limites últimos, considerar k_u ;

$E_B A_B$ - factor de rigidez do betão.

O parâmetro γ , em alguma bibliografia dá o nome ao método designando-o por γ -method.

O termo numérico a_1 é dado por:

$$a_B = \frac{\gamma_M E_M A_M \left(\frac{h_B + h_M}{2} \right)}{(\gamma_B E_B A_B + \gamma_M E_M A_M)} \quad (4.93)$$

, ou,

$$a_B = \left(\frac{h_B + h_M}{2} \right) - a_M \quad (4.94)$$

sendo este a relação entre a rigidez da madeira e a rigidez conferida pelos dois materiais. A relação entre a rigidez do betão e a rigidez conferida pelos dois materiais é em tudo semelhante definindo-se da seguinte forma:

$$a_M = \frac{\gamma_B E_B A_B \left(\frac{h_B + h_M}{2} \right)}{(\gamma_B E_B A_B + \gamma_M E_M A_M)} \quad (4.95)$$

Uma forma de ser possível a aplicação desta metodologia a secções mistas que prevejam a colocação de tábuas de soalho, painéis de aglomerados ou contraplacados entre o betão e as vigas de madeira é

substituir o termo $((h_B+h_M)/2)$ por (r) , distância entre os dois centros geométricos conforme indica a figura 4.14.

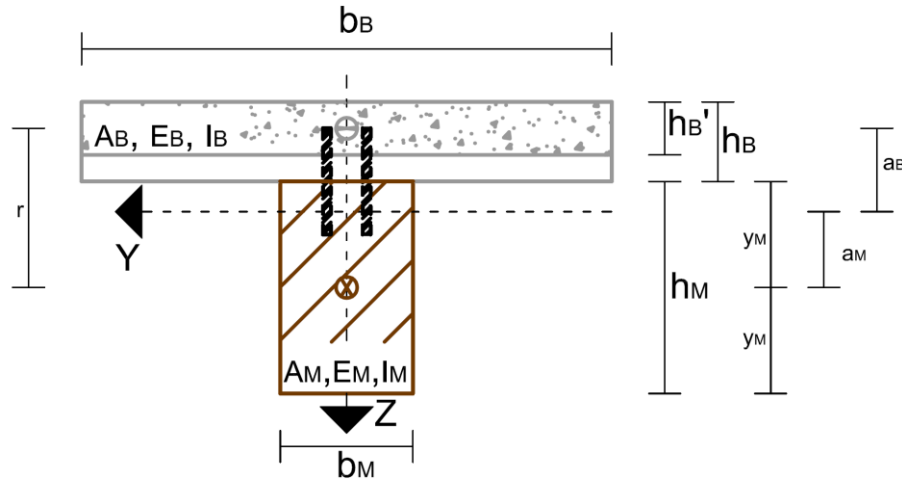


Fig. 4.14 - Metodologia englobando tábuas de soalho (definição de r)

4.4.3. VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA

4.4.3.1. Verificação ao corte

A tensão tangencial máxima deve também ser controlada, considerando para isso que todo o esforço transversal é suportado pelas vigas de madeira, desprezando-se a contribuição do betão:

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{3}{2} \frac{V_{m\acute{a}x}}{A_{M,seguran\c{c}a}} \quad (4.96)$$

Os símbolos referem-se a:

$V_{m\acute{a}x}$ - esforço transversal máximo, em N;

$A_{M,seguran\c{c}a}$ - área da secção transversal da madeira de acordo com a largura reduzida da secção, em mm^2 ;

$\tau_{m\acute{a}x}$ - tensão tangencial actuante máxima, em N/mm^2 .

O controlo é então realizado pela expressão seguinte:

$$\tau_{m\acute{a}x} \leq f_{v,d} \quad (4.97)$$

, sendo $f_{v,d}$ a resistência ao corte da madeira, em N/mm^2 , e é dado pela expressão (4.98).

$$f_{v,d} = k_{mod} \frac{f_{v,k}}{\gamma_M} \quad (4.98)$$

Na expressão, os símbolos referem-se a:

k_{mod} - factor de modificação da resistência, que tem em conta o efeito da duração das acções e do teor em água; Os valores encontram-se referidos na tabela 4.7 deste capítulo;

γ_M - coeficiente parcial de segurança para as propriedades dos materiais. Os valores referidos na tabela 4.6 deste capítulo.

4.4.3.2. Verificação da ligação

O sistema de ligação deve ser também ser alvo de verificação de segurança sendo então necessário determinar a força aplicada num ligador.

$$F_d = \frac{\gamma_1 E_1 A_1 \cdot a_1 \cdot s \cdot V_{sd}}{(EI)_{ef}} \quad (4.99)$$

Os símbolos apresentados expressão anterior têm o seguinte significado:

V_{sd} - esforço transversal para a secção analisada, em N/mm;

s - espaçamento de ligadores na secção analisada (s_{min} pelo lado da segurança), em mm.

A força aplicada num ligador, para o sistema se encontrar em segurança, não deve ser superior à capacidade resistente da ligação.

4.4.4. DISTRIBUIÇÃO DAS TENSÕES NORMAIS

É possível definir a distribuição das tensões normais, na secção composta, considerando os valores extremos das tensões actuantes nos dois materiais, dados pelas expressões (4.94) e (4.95).

Tensão normal devido ao esforço axial:

$$\sigma_i = \frac{\gamma_i E_i a_i M}{(EI)_{ef}} \quad (4.100)$$

Tensão normal devido à flexão:

$$\sigma_{m,i} = \frac{0,5 E_i h_i M}{(EI)_{ef}} \quad (4.101)$$

, sendo M o momento flector actuante na secção.

4.4.5. VERIFICAÇÃO DOS MATERIAIS

4.4.5.1. Betão

(i) Tensão na secção de topo do betão (compressão):

$$\sigma_{c,topo} = \sigma_B + \sigma_{m,B} < f_{cd} \quad (4.102)$$

, onde,

$\sigma_{c,topo}$ - tensão actuante de cálculo na fibra de topo, em N/mm^2 ;

σ_B - tensão normal devido ao esforço axial, em N/mm^2 ;

$\sigma_{m,B}$ - tensão normal devido à flexão, em N/mm^2 ;

f_{cd} - resistência à compressão, em N/mm^2 .

(ii) Tensão na secção de base do betão (tracção):

$$\sigma_{B,base} = \sigma_B - \sigma_{m,B} < f_{ctmd} \quad (4.103)$$

, onde,

$\sigma_{B,base}$ - tensão actuante de cálculo na fibra de base, em N/mm²;

f_{ctmd} - resistência à tracção, em N/mm².

4.4.5.2. Madeira

$$\frac{\sigma_M}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,M}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (4.104)$$

, onde,

$f_{t,0,d}$ - resistência à tracção na direcção das fibras, em N/mm²;

$f_{m,d}$ - resistência à flexão, em N/mm².

4.4.6. ESTADO-LIMITE ÚLTIMO

A verificação de tensões na secção é dividida em duas linhas base, uma relativa ao estado inicial, onde as propriedades dos materiais são relativas ao tempo zero, e a outra linha é referente às condições ao longo do tempo dos materiais, ou seja, engloba-se o comportamento diferido no tempo dos materiais.

4.4.6.1. Estado inicial

Para o Estado-limite último há que considerar o valor do módulo de deslizamento último k_u , valor referido no ponto relativo ao deslizamento da ligação.

As propriedades relativas ao betão devem ser as discriminadas na tabela 4.13 e tabela 4.14, consoante o tipo de betão. Quanto às propriedades da madeira, consoante a classe desta, devem ser utilizados os valores definidos na tabela 4.10 para madeiras folhosas, na tabela 4.11 para madeiras resinosas ou na tabela 4.12 para madeira lamelada colada.

Com os parâmetros acima definidos, o procedimento de cálculo passa pelo cálculo das tensões actuantes nas peças e respectiva verificação de segurança.

4.4.6.2. Situação a longo prazo

A longo prazo verificam-se fenómenos de fluência na estrutura composta, havendo uma alteração das tensões na secção. O fenómeno da fluência em vigas mistas madeira-betão é bastante complexo, dado que existem dois materiais com diferentes comportamentos em termos de fluência, ligados por ligadores que apresentam ainda um outro comportamento distinto à fluência [8].

O método de cálculo tem em consideração o efeito da fluência dos materiais, modificando os módulos de elasticidade do betão e da madeira bem como o módulo de deslizamento último.

Assim o módulo de elasticidade para o betão, adquire a seguinte forma:

$$E_{B,fin} = \frac{E_B}{(1 + \Psi_2 \varphi)} \quad (4.105)$$

, onde,

$E_{B,fin}$ - Módulo de elasticidade do betão, a longo prazo, em N/mm²;

E_B - Módulo de elasticidade do betão, inicial, em N/mm²;

, considerando,

ψ_2 - Coeficiente para o valor quase-permanente da acção.

O módulo de elasticidade da madeira é definido da seguinte forma:

$$E_{M,fin} = \frac{E_M}{(1 + \Psi_2 k_{def})} \quad (4.106)$$

, onde,

$E_{M,fin}$ - Módulo de elasticidade da madeira, a longo prazo, em N/mm²;

E_M - Módulo de elasticidade da madeira, inicial, em N/mm²;

k_{def} - factor para avaliação da deformação devida à fluência, definido no Eurocódigo 5 [53], e que tem em conta a classe de serviço pertinente;

ψ_2 - Coeficiente para o valor quase-permanente da acção.

No caso das ligações é aceitável a seguinte aproximação [53]:

$$K_{ser,fin} = \frac{K_{ser}}{(1 + \Psi_2 k_{def})} \quad (4.107)$$

4.4.7. ESTADO-LIMITE DE UTILIZAÇÃO

A deformação de uma estrutura, resultante dos efeitos das acções (tais como, forças axiais e de corte, momentos flectores e deslizamento nas ligações) e da variação do teor de água deve manter-se dentro dos limites apropriados, atendendo à possibilidade de aquela deformação provocar danos em materiais de revestimento, tectos, divisórias e acabamentos, e as exigências funcionais e de aspecto.

Nos Estado-limite de utilização, são calculadas as flechas máximas admissíveis para o elemento, de acordo com a filosofia do Eurocódigo 5 [53], que consiste em:

$$w_{net,fin} = w_{inst} + w_{creep} - w_c = w_{fin} - w_c \quad (4.108)$$

Os símbolos referidos na expressão (4.108) representam:

w_c - contraflecha (caso aplicada), em mm;

w_{inst} - flecha instantânea, em mm;

w_{creep} - flecha devida à fluência, em mm;

$w_{net,fin}$ - flecha aparente final, em mm.

A flecha a meio vão é, para um carregamento uniformemente distribuído, calculada pelas expressões de resistência dos materiais:

$$w = \frac{5 Q L^4}{384 (EI)_{ef}} \quad (4.109)$$

, onde,

Q - valor da acção, em N/mm;

L - comprimento do vão, em mm;

$(EI)_{ef}$ - Rigidez efectiva de flexão, em N/mm².

A rigidez efectiva de flexão deve ser calculada de acordo com a expressão (4.90) admitindo agora, por ser Estado-limite de utilização que o valor de K_α a considerar na expressão (4.92) é k_{ser} .

4.4.7.1. Estado inicial

O estado inicial corresponde à flecha instantânea, w_{inst} , devendo por isso calcular-se a rigidez efectiva de flexão de acordo com a expressão (4.83) tendo em atenção que, por ser Estado-limite de utilização, o valor de K_α adquire o valor k_{ser} , enquanto os valores dos módulos de elasticidade de cada material adquirem o valor inicial.

O valor da flecha final deve encontrar-se de acordo com a flecha final admitida pelo Eurocódigo 5, ou seja, de acordo com os valores máximos definidos na tabela 4.9. No entanto, fica ao critério do projectista respeitar os limites impostos pelo Eurocódigo 5, visto se tratar de lajes mistas madeira-betão e não existir legislação que imponha limites para este tipo de pavimentos. Se o pavimento de madeira simples for alvo de reabilitação recorrendo à solução de pavimento misto, é importante referir que este já apresenta uma flecha e por esse motivo torna-se muito difícil o cumprimento dos limites impostos para o pavimento de madeira simples.

4.4.7.2. Situação a longo prazo

Em relação aos valores a longo prazo, a flecha final, w_{fin} , deve ser determinada admitindo:

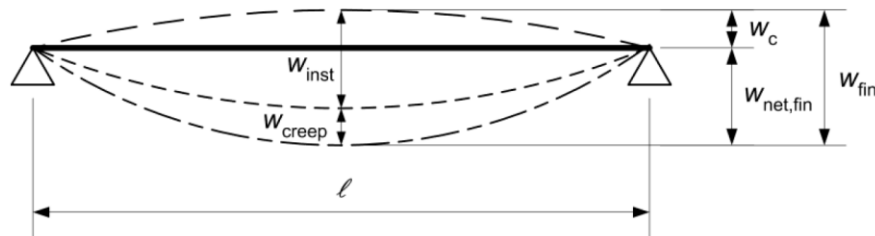


Fig. 4.15 - Componentes da flecha [53]

Relativamente aos limites, o Eurocódigo 5 adopta uma postura minimalista, definindo apenas limites para os casos da viga simplesmente apoiada e da consola. No caso de sistemas mistos madeira-betão o Eurocódigo 5 não prevê quaisquer limitações em Estados-limites de utilização, admitindo-se que aqueles valores apenas se aplicam a estruturas integralmente de madeira. Como já referido para o estado inicial, fica ao critério do projectista o cumprimento dos limites descritos no Eurocódigo 5[53].

4.4.8. CÁLCULO DA CARGA MÁXIMA ADMISSÍVEL

Na elaboração de uma reabilitação, surge a necessidade de quantificar a sobrecarga máxima que o pavimento reforçado poderá suportar, de modo a permitir ao projectista tomar decisões sobre o caminho mais interessante a seguir. No caso de se optar por outro tipo de sistema estrutural que não o antigo, as cargas impostas na estrutura são utilizadas no dimensionamento da estrutura, mas no caso de se pretender usar o sistema estrutural de madeira para se criar um novo tipo de estrutura, como é o caso das lajes mistas madeira-betão, já não é possível, dentro de certos parâmetros definir a sobrecarga que se pretende aplicar à estrutura. A carga total que a estrutura suporta passa assim a depender da estrutura pré-existente de madeira, não podendo variar parâmetros tais como classe da madeira e dimensões das secções entre outros.

Em situações de reabilitação de pavimentos existentes em madeira em que seja necessário aumentar a capacidade resistente, a solução a adoptar poderá passar por:

- transformar o pavimento num pavimento misto madeira-betão;
- colocar reforços (novas vigas metálicas ou em madeira) eventualmente num novo nível resistente;
- substituir as vigas existentes por outras de maior dimensão.

Mantendo a legislação em vigor as mesmas imposições para este tipo de estrutura como sendo uma estrutura nova é necessário definir todos os limites impostos:

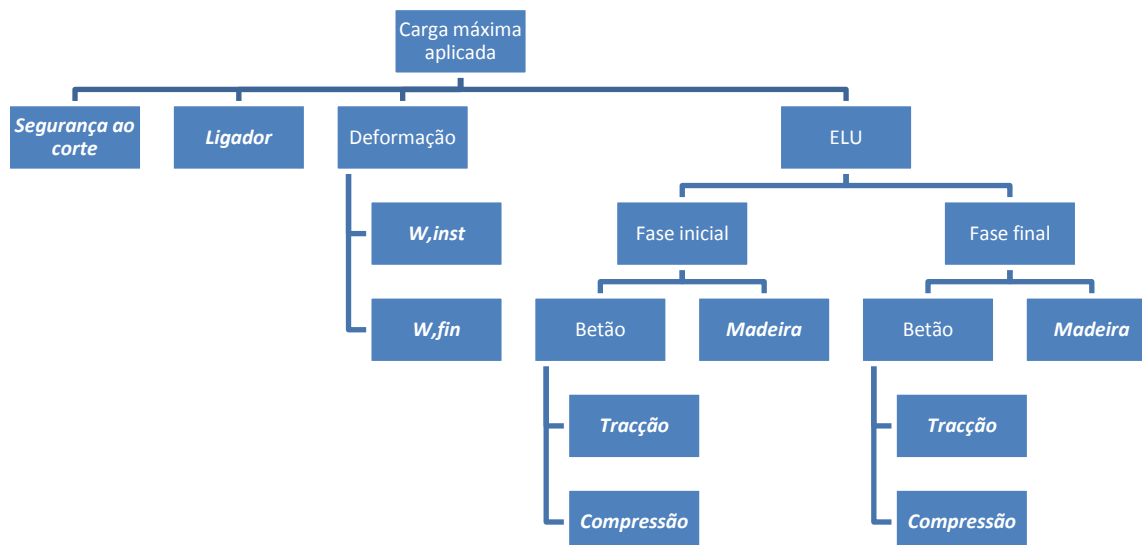


Fig. 4.16 - Esquema representativo das limitações impostas. Legenda: A *italico* encontra-se definido o fim da cadeia que permite determinar a carga aplicada máxima

Na figura 4.16 encontram-se representadas todas as verificações possíveis de se realizar num sistema misto madeira-betão. Contudo, nem todas as verificações são garantidas para este tipo de pavimentos. A deformação é a limitação mais influente no processo de determinação de cargas máximas uma vez que os limites se baseiam no Eurocódigo 5 que por sua vez se baseia em pavimentos simples de

madeira. Como estes valores apenas correspondem a pavimentos de madeira, neste tipo de estrutura são rapidamente atingidos os valores de deformação propostos. Tal facto leva a que a limitação por parte da deformação das vigas pode não ser levada em conta se se pretender alcançar resultados mais satisfatórios.

A compressão e a tracção do betão, bem como a tracção na madeira, têm o mesmo processo de cálculo tanto para o estado inicial como para a situação a longo prazo, ambos no Estado-limite último, variando apenas nos respectivos valores dos módulos de elasticidade dos materiais e no valor do módulo de deslizamento. É então possível quantificar o momento máximo para o Estado-limite último admissível para as condições previamente impostas quanto a:

(i) *Compressão do betão:*

$$M = f_{cd} \left(\frac{\gamma_B E_B a_B + 0,5 E_B h_B \gamma_B}{(EI)_{ef}} \right)^{-1} \quad (4.110)$$

(ii) *Tracção no betão:*

$$M = f_{ctmd} \left(\frac{0,5 E_B h_B \gamma_B - \gamma_B E_B a_B}{(EI)_{ef}} \right)^{-1} \quad (4.111)$$

(iii) *Madeira:*

$$M = \left(\frac{\gamma_M E_M a_M}{(EI)_{ef} f_{t,0,d}} + \frac{0,5 E_M h_M}{(EI)_{ef} f_{m,d}} \right)^{-1} \quad (4.112)$$

Nas expressões (4.110) a (4.112) os símbolos têm o seguinte significado:

M - Momento flector máximo, em N/mm;

E_B - Módulo de elasticidade do betão (depende da posição temporal), em N/mm²;

E_M - Módulo de elasticidade da madeira (depende da posição temporal), em N/mm²;

h_B - Altura do betão, em mm;

h_M - Altura da madeira, em mm;

$(EI)_{ef}$ - Rigidez efectiva à flexão (depende da posição temporal), em N/mm²;

f_{ctmd} - resistência à tracção do betão, em N/mm²;

$f_{m,d}$ - resistência à flexão do betão, em N/mm²;

$f_{t,0,d}$ - resistência à tracção na direcção das fibras da madeira, em N/mm².

O cálculo da sobrecarga que o pavimento é definido por:

$$Q_{máximo} = \frac{8}{\gamma_Q \cdot L^2} M - \frac{\gamma_G}{\gamma_Q} G \quad (4.1113)$$

, onde,

L - vão, em mm;

γ_G - coeficiente relativo às acções permanentes (valor recomendado 1,35);

γ_Q - coeficiente relativo às acções variáveis (valor recomendado 1,5);

G - Carga permanente, em N/mm;

$Q_{\text{máximo}}$ - Sobrecarga máxima, em N/mm.

Caso se pretenda considerar a limitação relativa ao Estado-limite de utilização, a sobrecarga é calculada segundo a seguinte expressão:

$$Q_{\text{máximo}} = \frac{384 \cdot (EI)_{ef} \cdot w}{5 \cdot L^4} - G \quad (4.114)$$

Os símbolos descritos na expressão (4.114) têm o seguinte significado:

w - Flecha máxima pretendida, pode ser a w_{inst} como a w_{fin} , em mm;

L - Vão, em mm.

A expressão pode ser utilizada tanto no estado inicial como para a flecha atingida ao longo do tempo.

Relativamente à segurança ao corte o valor pretendido provém do que já foi referido no ponto 4.4.3.1, devendo-se seguir a seguinte expressão:

$$V_{sd} = \frac{2 \cdot f_{vd} \cdot A_M}{3} \quad (4.115)$$

, e,

$$G_{\text{máximo}} = \frac{2}{\gamma_Q \cdot L} V_{sd} - \frac{\gamma_G}{\gamma_Q} G \quad (4.116)$$

, onde,

V_{sd} - Valor máximo do esforço transversal aplicado numa viga de madeira, em N;

f_{vd} - resistência ao corte da madeira, em N/mm²;

A_M - Área da madeira, em mm².

No caso da resistência do sistema de ligação, a sobrecarga é obtida de acordo com as seguintes expressões:

$$V_{sd} = \frac{F_{v,Rk}(EI)_{ef}}{\gamma_B E_B A_B a_B s} \quad (4.117)$$

, onde,

$F_{v,Rk}$ - Valor característico da capacidade resistente, em N;

$(EI)_{ef}$ - Rigidez efectiva à flexão (no estado inicial), em N/mm²;

E_B - Módulo de elasticidade do betão, em N/mm²;

A_B - Área do betão, em mm²;

s - Espaçamento entre ligadores, em mm.

O valor da sobrecarga adicional admissível para este caso é obtido da mesma forma do que foi obtido para a segurança ao corte.

4.5. PROGRAMA DE CÁLCULO

O estudo das lajes mistas madeira-betão, mesmo recorrendo ao método de cálculo simplificado⁶, torna-se um processo moroso, tendo em conta as muitas variáveis existentes. Para simplificar o processo de cálculo, foi implementado um programa informático que permite aprofundar o conhecimento de uma laje mista madeira-betão modificando criteriosamente os parâmetros que a definem, permitindo assim uma melhor aplicação prática.

No estudo deste tipo de solução, o objectivo principal pode passar pela verificação de segurança, onde são verificados todos os limites relativos aos materiais e às condições impostas pelo Eurocódigo, e o objectivo pode focar-se apenas na determinação da sobrecarga adicional máxima admissível resultante do reforço com a lâmina de betão.

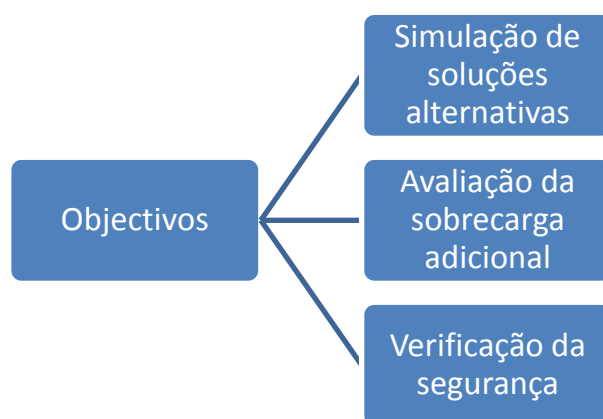


Fig. 4.17 - Funções principais do programa de cálculo

Durante o estudo das lajes mistas a escolha do sistema de ligação aplicado é um parâmetro importante no procedimento de cálculo já que este deve ter complementado a verificação da segurança da ligação o que se torna um processo repetitivo quando se varia de sistema de ligação. A aplicação do programa informático vem auxiliar este processo permitindo uma escolha adequada do sistema de ligação tendo em atenção a sua disposição construtiva, diminuindo assim erros que podem surgir durante a concepção do reforço bem como, e mais importante, diminuir o custo global de reabilitação.

O programa informático permite ainda ao utilizador definir o tipo de ligador que pretende usar no estudo, dando a oportunidade de escolher um ligador comercial, com os parâmetros mecânicos previamente definidos, ou de escolher um ligador tradicional, permitindo ao programa definir os valores mais adequados para o tipo de solução.

A apresentação inicial do programa encontra-se dividida por zonas de especificidade onde se encontram:

⁶ Método simplificado descrito no Eurocódigo 5, anexo B [53].

- Dados geométricos;
- Acções aplicadas;
- Propriedades dos materiais;
- Geometria da peça.

O programa informático foi elaborado em *Microsoft Excel*, com extensão em *.xlsx*, podendo ser utilizado por qualquer equipamento que suporte este tipo de ficheiro.

The screenshot displays the main interface of the calculation program, organized into several panels:

- Geometria (Geometry):** Includes input fields for Vão (6,4), Contraflecha (0 mm), Espessura do soalho original (25 mm), Espessura do isolamento (0 mm), Espessura da laje de betão (50 mm), Espaçamento entre vigas (400 mm), Altura das vigas de madeira (200 mm), Largura das vigas de madeira (100 mm), Cofragem vertical (20 mm), and dimensions for the effective width (60 mm) and height (25 mm) of the beam.
- Acções aplicadas (Applied Actions):** Lists actions for the final layer (0,50 KN/m²), pavement (0,00 KN/m²), dividers (0,15 KN/m²), and others (0,00 KN/m²). It also includes a load ψ_2 (0,3), service class (Classe 1), and duration class (Acção de média duração).
- Propriedades dos materiais (Material Properties):**
 - Betão (Concrete):** Classe C25/30, Fluência 2,25.
 - Madeira (Wood):** Classe C18.
 - Ligador (Glue):** Kser (comercial) 17200 N/mm, Ku (comercial) 7410 N/mm, F (comercial) 20900 N, Espaçamento (mm) 100 min to 100 max, Tipo de ligador Cavilhas, Diâmetro 12 mm.
- Factor de segurança parcial:** Acção permanente 1,35, Acção variável 1,5.
- Diagrama:** A cross-section diagram showing the concrete slab (AB, EB, IB) and the wooden beam (AM, EM, IM) with dimensions 400 mm, 150 mm, and 100 mm.
- Tabela de Propriedades:**

Betão		
fck		25 MPa
fck,cube		30 MPa
fcm		30 MPa
ftm		2,6 MPa
Ecm		31 GPa
Pmean		25 KN/m³

Madeira		
Propriedades resistentes		
Flexão	fm,k	18 MPa
Tracção	ft,0,k	11 MPa
Tracção	ft,90,k	0,5 MPa
Compressão	fc,0,k	18 MPa
Compressão	fc,90,k	2,2 MPa
Corte	fv,k	2 MPa
Propriedades de rigidez		
Módulo de elasticidade	E0,mean	9 GPa
M. de elast. (5ºpercentil)	E0,05	6 GPa
Módulo E	E90,mean	0,3 GPa
Módulo de distorção	G	0,56 GPa
Densidade		
Densidade	Pk	320 Kg/m³
Densidade média	Pmean	380 Kg/m³

Ligador		
Módulo de deslizamento	kser	7730 N/mm
	Ku	5153 N/mm
	Fd	8363 N

Fig. 4.18 - Janela principal do programa de cálculo

4.5.1. ENTRADA DE DADOS

4.5.1.1. Dados geométricos

A zona do programa relativa à entrada dos dados geométricos encontra-se subdividida em seis sectores.

O primeiro sector é relativo ao objectivo que se pretende atingir, ou a verificação de segurança, ou a quantificação da sobrecarga máxima.

O sector 2 é dedicado ao vão do pavimento bem como à contra-flecha, se aplicada. A contra-flecha apenas influencia o resultado final, nos limites máximos de flecha permitidos pelo Eurocódigo 5, se se pretender considerar essa limitação.

No terceiro sector é especificada a espessura do soalho original, que vai passar a trabalhar como cofragem, e a dimensão e o tipo de isolamento caso se aplique uma protecção acústica ou sonora. A escolha da protecção deve ser ponderada quanto à sua dimensão, não devendo ser utilizadas espessuras elevadas. O programa permite ainda a escolha do tipo de madeira do soalho. Neste sector é definida também a espessura da camada de betão devendo ter o cuidado desta absorver todo o ligador bem como, devido à difícil execução, admitir camadas múltiplas de 10mm.

A secção das vigas de madeira e o espaçamento entre eixos destas deve ser referido no sector 4. A secção da madeira deve ser a secção útil que provém da análise prévia das condições existentes e o espaçamento entre eixos pode ser considerado o existente, caso se mantenha a disposição das vigas, ou pode ser o calculado de acordo com a largura efectiva do betão descrita neste capítulo, caso se opte por uma nova disposição ou se opte por utilizar vigas novas.

O sector 5 é contabilizado apenas quando se pretende colocar o ligador directamente na viga e se tem soalho original e isolamento no sistema misto. Conforme indica a figura 4.19, o soalho sobre a viga é retirado e é fixado o ligador na viga de madeira. Posteriormente é colocada uma cofragem vertical para que durante a betonagem da laje não se perca água nem goma do betão pelas ligações.

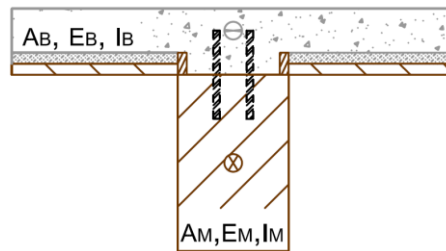


Fig. 4.19 - Cofragem vertical

Por último, o sector 6 é dedicado ao Estado-limite de deformação definido no Eurocódigo 5. O valor para cada flecha é relativo ao valor divisor, referido no Eurocódigo 5, onde o dividendo é o vão da peça.

Geometria			
2	Vão	6,4	Objectivo: ☒ Verificação de segurança ☐ Quantificação das acções
	Contraflecha	0 mm	
3	Espessura do soalho original	25 mm	Madeira leve 3,0 kN/m ³
	Espessura do isolamento	0 mm	Isol. 1 0,3 kN/m ³
	Espessura da laje de betão	50 mm	
4	Espaçamento entre vigas	400 mm	
	Altura das vigas de madeira	200 mm	
	Largura das vigas de madeira	100 mm	
	Cofragem vertical	20 mm	
5			uinst 300
	Largura efectiva da viga	60 mm	unet,fin 250
	Altura de betão sobre a viga	25 mm	ufin 150

Fig. 4.20 - Zona do programa de cálculo relativa à geometria do sistema misto

4.5.1.2. Acções aplicadas

A zona dedicada às acções aplicadas engloba as acções permanentes, as acções variáveis, a classe de serviço, a classe de duração bem como os factores de segurança parciais relativos à combinação de acções fundamental. As acções permanentes, tal como o próprio nome indica, correspondem às cargas aplicadas no pavimento para além do peso próprio, estando meramente divididas para facilidade de compreensão. As cargas variáveis encontram-se de acordo com o Eurocódigo 0, podendo ser

admitidos diferentes tipos de utilização, como habitação, escritórios, escolas, teatros e igrejas, discotecas e bibliotecas. O programa informático dá ainda a opção de carga unitária para uma adaptação à realidade da reabilitação, ou seja, caso o projectista necessite, pode estudar a solução para uma carga unitária.

A classe de serviço bem como a classe de duração são definidas de forma a utilizar os valores do factor de modificação k_{mod} , e do factor de deformação k_{def} , podendo ser definida uma das três classes de serviço e uma das cinco classes de duração das acções.

Os coeficientes de segurança parciais encontram-se pré-definidos de acordo com o Eurocódigo 0, havendo a possibilidade de serem modificados, caso o utilizador o pretenda.

Acções aplicadas		
Camada final	0,50	KN/m2
Pavimento	0,00	KN/m2
Divisórias	0,15	KN/m2
Outras	0,00	KN/m2
Sobrecarga	Habitação	
Categoria	A	
Carga	2,00	KN/m2
ψ_2	0,3	
Classe de serviço	Classe 1	
Classe de duração	Acção de média duração	
k_{mod}	0,80	
k_{def}	0,60	
Factor de segurança parcial		
Acção permanente	1,35	
Acção variável	1,5	

Fig. 4.21 - Zona do programa de cálculo relativa às acções aplicadas

4.5.1.3. Propriedades dos materiais

Na zona relativa às propriedades dos materiais, existem três secções. Cada uma específica os três materiais do sistema misto madeira-betão.

Propriedades dos materiais		
Betão	Classe	C25/30
	Fluência	2,25
Madeira	Classe	C22
Ligador ☐ Comercial ☒ Tradicional	Kser(comercial)	17200 N/mm
	Ku(comercial)	7410 N/mm
	F(comercial)	20900 N
	Espaçamento (mm)	80 min 240 máx
	Tipo de ligador	Cavilhas
	Diâmetro	10 mm

Fig. 4.22 - Zona do programa de cálculo relativa às propriedades dos materiais

A secção reservada ao betão permite a alteração da classe do betão e permite a alteração, caso o utilizador pretenda, do coeficiente de fluência. Para uma melhor consulta das propriedades do betão seleccionado, a janela principal do programa dedica uma zona específica ao betão.

Betão		
fck		25 MPa
fck,cube		30 MPa
fcm		30 MPa
fctm		2,6 MPa
Ecm		31 GPa
Pmean		25 KN/m3

Fig. 4.23 - Propriedades do betão seleccionado

Na secção da madeira, apenas é permitido variar a classe da madeira, classe essa que deve ser previamente identificada de acordo com o descrito no capítulo 2. Tal como o betão, a madeira possui uma zona dedicada às suas propriedades.

Madeira		
Propriedades resistentes		
Flexão	fm,k	22 MPa
Tracção	ft,0,k	13 MPa
Tracção	ft,90,k	0,5 MPa
Compressão	fc,0,k	20 MPa
Compressão	fc,90,k	2,4 MPa
Corte	fv,k	2,4 MPa
Propriedades de rigidez		
Módulo de elasticidade	E0,mean	10 GPa
M. de elast. (5ºpercentil)	E0,05	6,7 GPa
Módulo E	E90,mean	0,33 GPa
Módulo de distorção	G	0,63 GPa
Densidade		
Densidade	Pk	340 Kg/m3
Densidade média	Pmean	410 Kg/m3

Fig. 4.24 - Propriedades da madeira seleccionada

No caso do ligador, o programa permite ao utilizador um maior controlo das propriedades deste. Inicialmente deve ser definido o tipo de ligador, podendo optar-se por um ligador comercial ou por um ligador tradicional. No caso de se recorrer a um ligador comercial, deve ser definido o módulo de deslizamento, k_{ser} , o módulo de deslizamento último, k_u , e a força máxima do ligador, F .

Ligador ☒ Comercial ☐ Tradicional	Kser(comercial)	17200 N/mm
	Ku(comercial)	7410 N/mm
	F(comercial)	20900 N
	Espaçamento (mm)	80 min
		240 máx

Fig. 4.25 - Programa de cálculo considerando ligador comercial

No caso de se optar por um ligador tradicional, é necessário proceder à identificação do tipo de ligador, ou seja se são cavilhas, pregos ou outros. É necessário também definir o diâmetro do ligador bem como os espaçamentos máximo e mínimo destes.

Ligador ☐ Comercial ☒ Tradicional	Espaçamento (mm)	80 min
		240 máx
	Tipo de ligador	Cavilhas
	Diâmetro	10 mm

Fig. 4.26 - Programa de cálculo considerando ligador tradicional

A escolha do tipo de ligador tradicional é limitada aos ligadores definidos no Eurocódigo 5 tendo em atenção a verificação de segurança do ligador. No programa de cálculo apenas é confirmada a verificação no caso de cavilhas e pregos. No caso de ser seleccionado um ligador para o qual o programa não verifica a segurança, é dada uma mensagem, contudo não é limitativo da continuação da verificação global do sistema nem do objectivo de determinar a máxima carga aplicada.

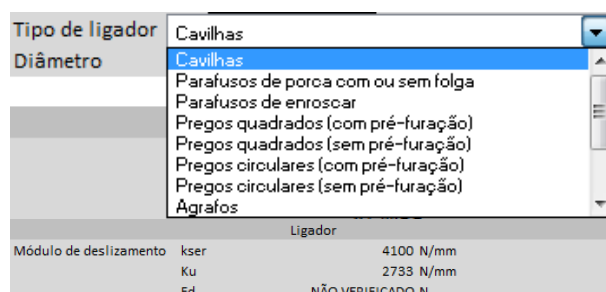


Fig. 4.27 - Tipo de ligador possível de seleccionar no programa de cálculo

O programa pede também os espaçamentos máximo e mínimo entre ligadores. É dado ao utilizador a opção de definir previamente o espaçamento máximo e mínimo ou se preferir, o programa na saída de dados sugere os espaçamentos desde que seja, na entrada de dados, colocado o valor 0 nas células correspondentes.

Da mesma forma que é possível verificar as propriedades do betão e da madeira, podem-se verificar as propriedades do ligador que vão ser utilizadas pelo programa de cálculo.

Ligador		
Módulo de deslizamento	kser	7219 N/mm
	Ku	4813 N/mm
	Fd	6327 N

Fig. 4.28 - Propriedades do ligador seleccionado

4.5.2. SAÍDA DE RESULTADOS

A saída de resultados apresenta uma organização diferente da entrada de dados não sendo possível nesta parte do programa alterar nenhum parâmetro. A verificação de segurança é o objectivo que apresenta maior zona de saída de dados enquanto que a sobrecarga máxima admissível apenas ocupa uma secção.

Materiais				Verificação a curto prazo				Verificação a longo prazo			
Betão	C25/30			Verificação ao corte				Tensões Normais			
Madeira	C18			tmáx 0,50 N/mm ²				Betão			
Ligador	Cavilhas			fv,d 1,23 N/mm ² ok				t1 2,55 N/mm ²			
Tipo				Verificação da ligação				tm,1 3,12 N/mm ²			
Diametro	12 mm			Fd 3,19 kN				t2 2,55 N/mm ²			
Espaçamento máximo	100 cm			Rd 6,36 kN ok				tm,2 3,83 N/mm ²			
Espaçamento mínimo	100 cm			Tensões Normais				M Madeira			
Espaçamento equivalente	100 cm			Betão				t1 2,55 N/mm ²			
Kser	7730 N/mm			t2 2,55 N/mm ²				tm,1 2,32 N/mm ²			
Ku	5153 N/mm			Verificação dos materiais				t2 2,55 N/mm ²			
F	8363 N			Betão				tm,2 3,83 N/mm ²			
Cargas aplicadas				tc,topo 5,67 N/mm ² < 16,67 ok				Verificação dos materiais			
Peso Próprio	0,64 kN/m			tc,base 0,57 N/mm ² < 1,73 ok				Betão			
Permanentes	Valor pedido			M Madeira				tc,topo 4,87 N/mm ² < 16,67 ok			
Variáveis	0,80 kN/m			0,70 < 1 ok				tc,base 0,23 N/mm ² < 1,73 ok			
Carga total por metro linear				Deformação				M Madeira			
Disposições construtivas				uinst 10,81 mm < 21,33 mm ok				Tipo de ligação			
smáx	100 mm			unetfin 25,60 mm < 25,90 mm ok				Encontra-se de acordo com os regulamentos			
smin	100 mm			ufin @@@ mm > @@@ mm Sem Contraflecha				Deformação			
seq	100 mm							Deformada aceitável			
Sobrecarga máxima admissível											
Carga máxima											
Limitação imposta por:											
Serviço flecha final											
Carga máxima não admitindo a deformação											
Limitação imposta por:											
Tempo infinito madeira											
uinst 14,78 mm											
L/ 433											
ufin 34,98 mm											
L/ 183											

Fig. 4.29 - Janela principal de saída de dados

4.5.2.1. Verificação de segurança

A verificação de segurança, conforme descrito no subcapítulo relativo ao método simplificado, subdivide-se em verificação ao Estado-limite último e verificação ao Estado-limite de utilização, em específico à deformação.

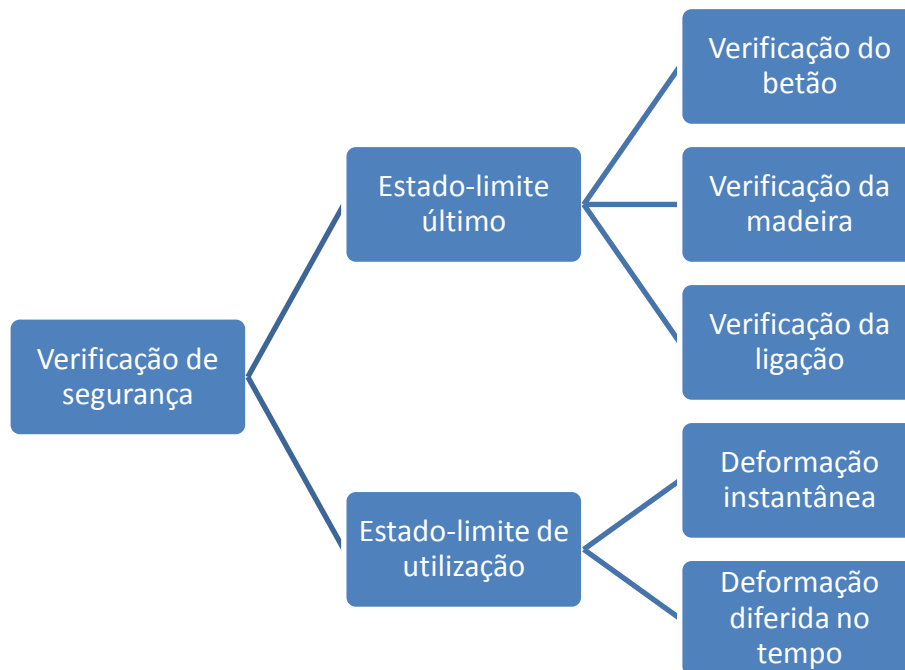


Fig. 4.30 - Forma de actuação para verificação de segurança

O programa informático, à medida que realiza as verificações de segurança, vai criando notas na zona dedicada para verificações. Esta zona encontra-se dividida em quatro secções sendo uma dedicada ao betão, outra à madeira, outra dedicada ao tipo de ligação e por fim uma secção relativa à deformação.

Na secção do betão, o programa diz ao utilizador se o betão cumpre todas as condições impostas em relação à tracção e em relação à compressão. No caso da madeira, é dito se a classe seleccionada resiste aos esforços. O tipo de ligação é testado de acordo com o imposto pelo Eurocódigo 5 e na secção correspondente é indicado se este tipo de ligação é válido para as condições impostas. Relativamente à deformação, o programa calcula as flechas máximas e garante a segurança, ou não, destas.

Verificações	
Betão	
Compressão	Betão resiste à compressão imposta
Tracção	Betão resiste à tracção imposta
Madeira	
	Aceite relativamente ao corte
	Classe da madeira aceite
Tipo de ligação	Encontra-se de acordo com os regulamentos
Deformação	Deformada aceitável

Fig. 4.31 - Descrição das verificações efectuadas

4.5.2.2. Sobrecarga máxima admissível

No caso da determinação da sobrecarga máxima admissível, o programa informático realiza o procedimento inverso da verificação de segurança, considerando como dados os valores associados à madeira e às acções permanentes e tratando, caso a caso, diversas simulações de ligador, classe de betão e espessura da camada de betão.

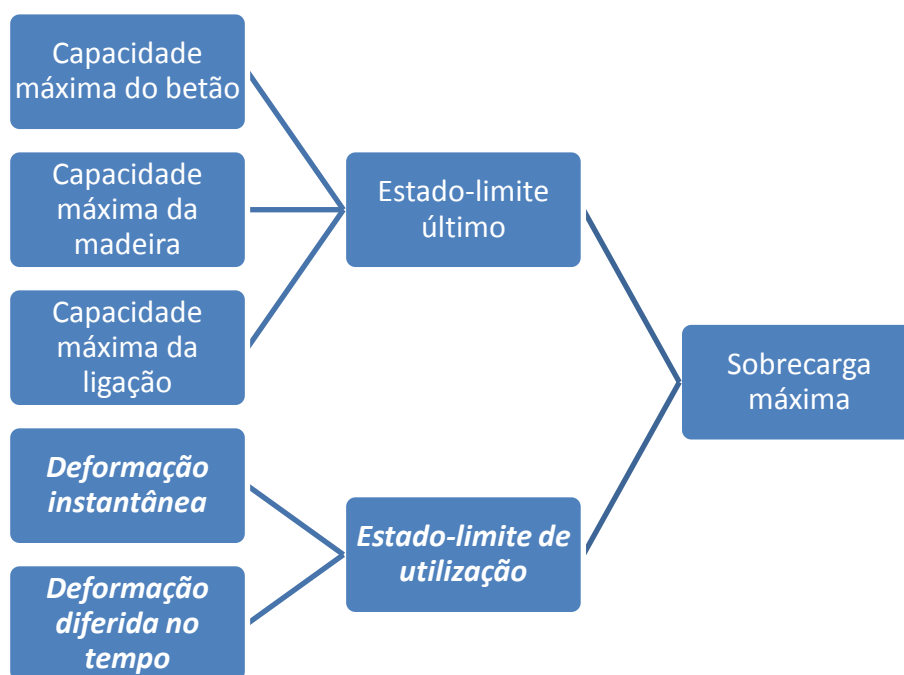


Fig. 4.32 - Forma de actuação para quantificação das sobrecargas⁷

⁷ A *itálico* encontram-se as limitações impostas por o Estado-limite de utilização sendo dado ao projectista a possibilidade de escolha do cumprimento das flechas estipuladas para as estruturas de madeira definidas no Eurocódigo 5 [53].

Como já referido anteriormente, o programa apenas dá o valor da sobrecarga admissível estando garantidos todas as imposições impostas.

Sobrecarga máxima admissível	
Carga máxima	2,00 KN/m ²
Limitação imposta por:	Serviço flecha final
Carga máxima não admitindo a deformação	3,32 KN/m ²
Limitação imposta por:	Tempo infinito madeira
uinst	14,78 mm
uinst máximo	21,33 mm
	L/ 433
ufin	34,98 mm
ufin máximo	25,60 mm
	L/ 183

Fig. 4.33 - Saída de dados relativa à quantificação da sobrecarga admissível

No caso de não se considerarem limitações associadas à deformação, o programa indica o valor numérico de deformação e a respectiva fracção do vão para melhor facilitar a tomada de decisões pelo projectista.

A quantificação da sobrecarga máxima não contabiliza os valores propostos pelo projectista para as cargas impostas pela camada final, pavimento, divisórias e outros, contabilizando a sobrecarga total possível de aplicar no pavimento em estudo. O projectista deverá, se necessário, contabilizar o valor referente a acabamentos e verificar a segurança de acordo com o uso que é previsto para o espaço.

Para facilidade de compreensão do processo de obtenção da sobrecarga máxima, o programa discrimina as limitações impostas de forma ao utilizador perceber qual o material que se encontra no limite da sua resistência. A descrição da limitação permite não só alterar os materiais caso seja necessário atingir uma sobrecarga superior, mas permite também a alteração das propriedades geométricas do sistema como a espessura da camada entre outros.

5

CASO DE ESTUDO

5.1. INTRODUÇÃO

Actualmente uma das necessidades da construção passa pela velocidade de realização de projectos bem como o controlo dos custos de execução. Com a introdução de ferramentas de cálculo automático a realização de projectos tornou-se mais prática de executar permitindo uma melhoria significativa ao nível dos tempos de execução e consequentemente uma redução de custos globais. Os custos globais não passam só pela redução de tempo dedicado à parte de projecto de estruturas mas também aos custos inerentes à optimização das estruturas. É possível, com programas de cálculo automático, reduzir secções de forma a obter a secção mínima mais económica com total segurança.

Neste capítulo é apresentado um caso de estudo de um edifício que apresenta pavimentos de madeira e, recorrendo ao método de cálculo apresentado no capítulo 4, é sugerido um sistema de laje mista madeira-betão, sendo verificada posteriormente a segurança. Pretende-se também com a ajuda do programa de cálculo automático perceber a influência dos vários parâmetros englobados no dimensionamento, permitindo encontrar a solução óptima para o sistema misto madeira-betão em estudo e também descobrir tendências qualitativas associadas a esses mesmos parâmetros, ou seja, avaliar a influência da espessura da camada de betão, da classe do betão e do tipo e espaçamento dos ligadores, entre outros.

5.2. APRESENTAÇÃO DETALHADA DO EDIFÍCIO ESTUDADO

5.2.1. APRESENTAÇÃO GERAL

O edifício em estudo é constituído por R/C e piso elevado acessível pelo exterior a partir de uma escada térrea, que tem um pequeno edifício anexo à empena Norte. Tanto a largura como o comprimento do edifício é sensivelmente igual a 14,7m o que equivale sensivelmente a uma área de implantação de 215m². Faz parte de um conjunto mais alargado de edifícios, actualmente em processo de reabilitação e situa-se na ilha de São Miguel, nos Açores.

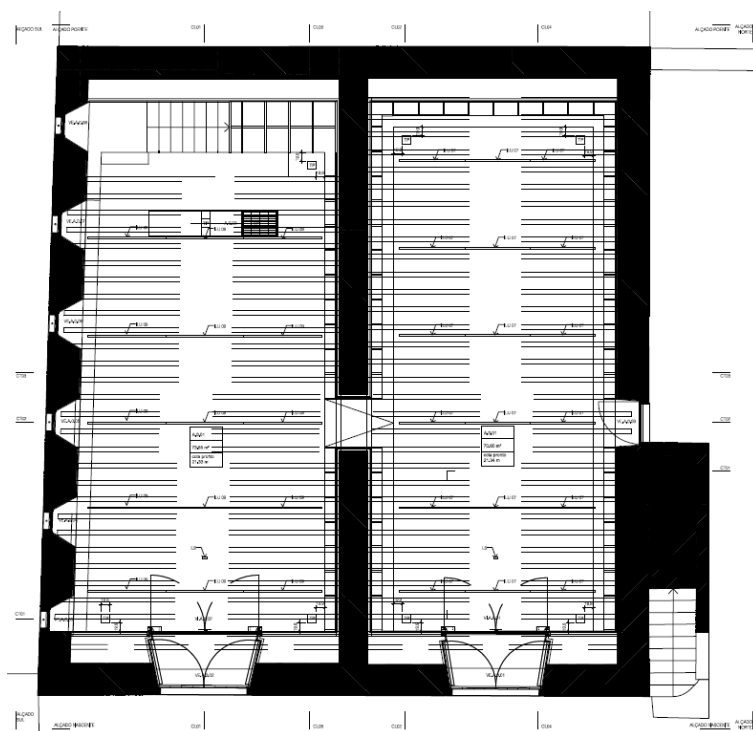


Fig. 5.1 - Planta de arquitectura do 1º piso⁸

A nível construtivo, o edifício é constituído por paredes de alvenaria resistente realizada a partir de pedra local, nascendo de uma fundação contínua pouco profunda e realizada a partir de um alargamento da parede. O edifício apresenta ainda uma parede resistente interior que divide, em toda a sua altura, sensivelmente a meio os pisos do edifício. A cobertura é formada por duas águas realizada por asnas de madeira sendo o cume coincidente com a parede interior estrutural. As paredes encontram-se rebocadas pelo exterior nos alçados Nascente, Sul e Poente enquanto o alçado Norte está em pedra à vista. A cobertura encontra-se revestida a telha cerâmica e interiormente as paredes encontram-se rebocadas e caiadas.

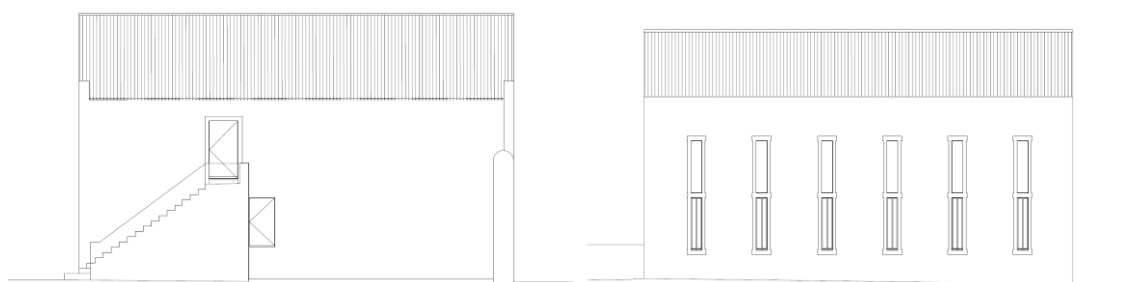


Fig. 5.2 - Alçado norte e sul do edifício

⁸ Planta de solução de reabilitação proposta usando vigas de madeira todas novas

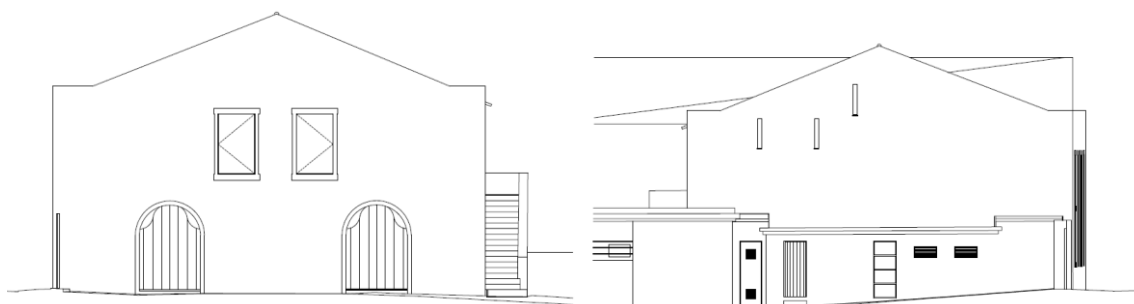


Fig. 5.3 - Alçado Nascente e poente do edifício

5.2.2. PAVIMENTO EXISTENTE EM MADEIRA

Os pavimentos são constituídos por vigas de madeira revestidas com soalho de madeira e apenas existe ao nível do 1º piso. Em relação ao estado de conservação, estes encontravam-se em mau estado devido aos ataques por agentes biológicos. Do ponto de vista da utilização, constata-se a existência de flechas excessivas, não respeitando os regulamentos em vigor, e em termos de segurança, os pavimentos não respeitam as imposições para este tipo de pavimento. Em termos de vibração, é notado um acentuado desconforto na utilização (desconforto antropodinâmico). Nas ligações às paredes resistentes são visíveis ligeiros desacertos de cotas o que provoca desconforto aos utilizadores, tanto na circulação como na sensação de falta de segurança associada ao uso.

5.2.3. ARQUITECTURA

O edifício em análise é constituído por paredes verticais estruturais em todo o seu contorno e por uma parede estrutural no centro do edifício. A parede central desenvolve-se desde as fundações até à cobertura, dividindo os dois pisos em duas zonas de áreas aproximadamente iguais, conforme é possível identificar na figura 5.4. O primeiro piso é constituído por dois compartimentos principais, ambos com portas para o exterior. As portas principais encontram-se voltadas a nascente, uma em cada compartimento principal, não havendo ligação pelo interior entre os dois compartimentos, apenas existindo uma janela na parede central estrutural que permite a passagem de luz. A sul, o piso do R/C apresenta seis janelas enquanto a norte apenas apresenta uma.

No compartimento mais a sul encontram-se, junto à parede poente, as escadas de acesso ao primeiro piso do edifício. O piso 1 apresenta a mesma divisão de compartimentos do piso do R/C com a particularidade deste ter mais dois compartimentos de dimensões mais reduzidas. Os compartimentos encontram-se a poente do compartimento que não tem escadas de acesso interior e são constituídos por uma casa de banho e um compartimento de serviço. No compartimento principal referido há ainda o acesso à cobertura, através de umas escadas interiores situadas junto ao compartimento de serviço, bem como a umas escadas exteriores situadas no alçado norte.

Ainda no piso 1, no alçado nascente, ambos os compartimentos principais possuem uma janela. A parede estrutural interior que faz a divisão dos dois compartimentos principais permite a passagem entre compartimentos através de duas aberturas de iguais dimensões e uma terceira abertura de maior dimensão.

A cobertura funciona apenas como área técnica, estando o seu uso reservado a trabalhos de serviço. Este piso possui três entradas de luz natural existentes, no alçado poente.

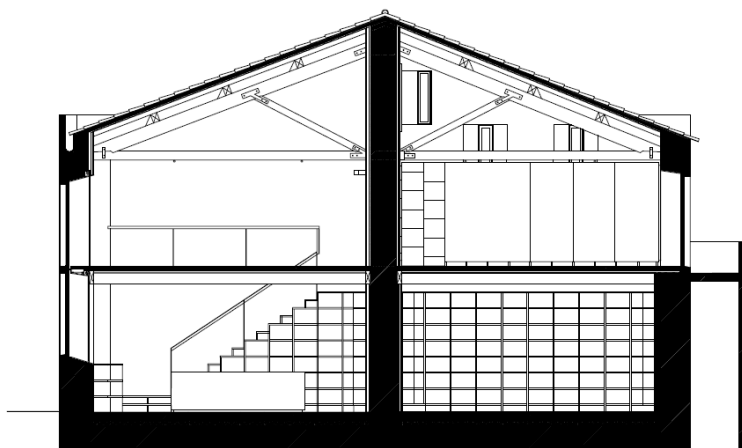


Fig. 5.4 - Corte no sentido nascente poente do edifício

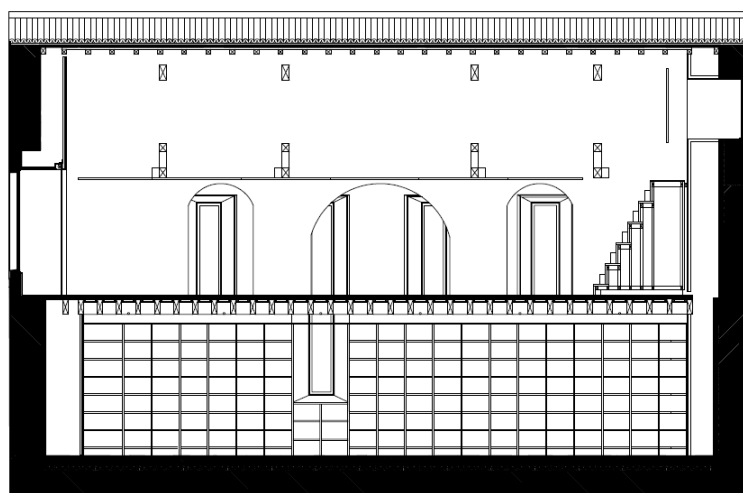


Fig. 5.5 - Corte no sentido norte sul do edifício

5.3.PAVIMENTOS MISTOS MADEIRA-BETÃO – CONDIÇÕES INICIAIS

5.3.1. DADOS GEOMÉTRICOS

Uma vez que não é possível aproveitar o pavimento existente devido à sua má condição, optou-se por adoptar um novo sistema de pavimento, baseado no anterior, possibilitando a utilização dos apoios existentes, devidamente recuperados, de forma a não se alterar a parede estrutural já existente. Optou-se por utilizar vigas de madeira de pinho da classe C18 devendo estas ter um comprimento de 6,40m sendo 6,00m de vão efectivo e 0,40m de apoio na parede estrutural. A secção da viga proposta é de 100x200mm, estando espaçadas de 40cm, entre eixos. O soalho proposto tem uma espessura de 25mm. Visto se tratar de uma reabilitação que passa por retirar todos os pavimentos antigos bem como o soalho, pode-se recorrer a cofragem recuperável para executar a laje de betão, mas neste caso pretende-se que o soalho tenha dupla função, a de cofragem e a de manter o aspecto visual. Optou-se assim por um soalho de madeira com 25mm de espessura ao longo de todo o pavimento.

5.3.2. CARGAS APLICADAS

O objectivo principal do estudo é a determinação das sobrecargas máximas admissíveis na estrutura, admitindo um valor estável para as cargas permanentes, associadas a soluções arquitectónicas de baixo peso.

A classe de serviço proposta tem em consideração a exposição da madeira às condições ambientais, não havendo neste caso grande risco, optando-se pela classe 1. Em relação à classe de duração foi admitida a situação de acções de média duração.

5.3.3. PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

A madeira, como anteriormente definido, é classificada como sendo de pinho C18. Quanto ao betão, visto não se justificarem classes de betão elevadas, como demonstraremos, optou-se por admitir C25/30. O coeficiente de fluência do betão manteve-se igual ao pré-definido pelo programa de cálculo. Relativamente aos ligadores, decidiu-se adoptar o uso de cavilhas, uma vez que são fáceis de aplicar e de obter.

Os respectivos valores das propriedades dos materiais devem ser confirmados nos quadros existentes na entrada de dados de forma a garantir a correcta escolha das classes destes e todos os valores numéricos necessários ao cálculo.

5.4. ESTUDO EFECTUADO

Como atrás se refere, o pavimento existente no edifício encontrava-se em muito mau estado não se justificando a sua recuperação.

Por esse motivo, assumiu-se a aplicação de vigas de madeira maciça em tudo semelhantes às existentes de modo a poder simular o reforço, recorrendo a um pavimento misto madeira-betão nas situações em que não é possível ou conveniente demolir os elementos existentes.

O estudo efectuado envolveu assim o estudo do efeito dos diversos parâmetros de dimensionamento de um pavimento misto de madeira-betão, considerando em geral a impossibilidade de actuar sobre os elementos de madeira existentes.

Foram assim efectuadas diversas simulações, fixando alguns parâmetros e fazendo variar, em cada iteração, apenas um deles. Os parâmetros que influenciam o dimensionamento, considerando como dados os que resultam da solução arquitectónica base de reabilitação são os seguintes:

- classe de betão usado;
- espessura da lâmina de betão;
- tipo e espaçamento dos ligadores;
- classe de resistência das peças de madeira.

A geometria da solução, as cargas permanentes e a sobrecarga constituirão valores fixos resultantes das opções arquitectónicas a seguir. No Anexo B, apresentam-se alguns exemplos de entrada e saída de dados das simulações efectuadas.

A discussão completa do programa desenvolvido consta do capítulo anterior (ver 4.5, capítulo 4).

Para ilustrar ainda as possibilidades da folha de cálculo fez-se uma verificação simples de segurança, fixando todos os parâmetros de dimensionamento em valores próximos dos óptimos resultantes das simulações efectuadas. Uma ilustração deste estudo inclui-se também nos Anexos C e D.

Nos pontos seguintes apresentam-se, de forma resumida, os principais resultados obtidos e as conclusões específicas e gerais que daí resultam.

5.5. INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE DIMENSIONAMENTO

No dimensionamento deste tipo de estrutura, para vigas de pavimentos existentes, bem como para vigas de secção igual à existente, o que é o caso, os limites das flechas máximas são muito limitativos. Por esse motivo optou-se por estudar a carga máxima possível de aplicar apenas admitindo o Estado-limite último até porque se entende que a verificação de limitação de deformação no caso de estados limites de utilização não é exigível para pavimentos mistos madeira-betão, já que o Eurocódigo 5[53], parte 1, refere especificamente que as limitações se aplicam a estruturas de madeira. No estudo efectuado, referem-se as situações limitadas pelo Estado-limite de utilização.

Como principais parâmetros de dimensionamento, considerou-se a espessura do betão, uma vez que é fácil de controlar na execução, o diâmetro do ligador e o espaçamento entre ligadores. A classe do betão bem como a classe da madeira foram também alvo de um estudo comparativo de sensibilidade do dimensionamento.

5.5.1. ESPESSURA DE BETÃO

Numa primeira fase, optou-se por apenas variar a espessura de betão de forma a obter as cargas máximas possíveis de aplicar, obtendo a espessura ideal para as condições impostas. A variação da espessura encontra-se definida em intervalos de 10mm uma vez que se adequa mais à realidade da construção visto em obra ser muito difícil controlar, durante a betonagem, a espessura do betão.

A variação da espessura do betão não é proporcional ao aumento da capacidade resistente do pavimento uma vez que o aumento da espessura pode influenciar o comportamento dos restantes materiais. Por esse motivo adicionou-se nos gráficos seguintes a indicação do factor que limita a carga máxima permitindo assim perceber o comportamento global do sistema misto.

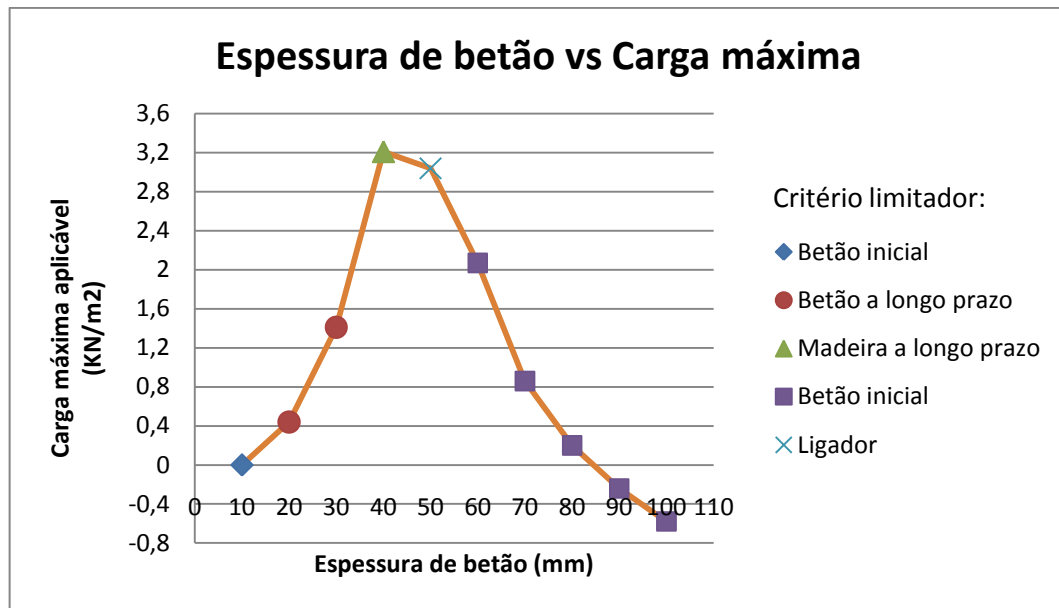


Fig. 5.6 - Carga máxima possível de aplicar de acordo com a espessura de betão

O gráfico foi obtido a partir da tabela seguinte (Tabela 5.1).

Tabela 5.1 - Carga máxima possível de aplicar de acordo com a espessura de betão

Espessura do betão (mm)	Carga máxima (KN/m ²)	Limitação
10	0,00	Betão inicial
20	0,44	Betão a longo prazo
30	1,41	
40	3,21	Madeira a longo prazo
50	3,04	Ligador
60	2,07	Betão inicial
70	0,86	
80	0,20	
90	-0,24	
100	-0,58	

Como é visível nos dados anteriores, a espessura da laje de betão que permite obter melhores resultados é a de 40mm para cavilhas de 10mm de diâmetro. É também perceptível o intervalo de valores entre os quais, para as condições referidas, se pode variar a espessura da laje de betão [10mm;80mm]. É importante conhecer este intervalo quando se procede ao dimensionamento de lajes mistas porque, por limitação de cotas, pode não ser possível aplicar a espessura que permite melhores resultados, pelo que a escolha deve recair em valores dentro do intervalo proposto.

O valor da carga máxima obtido para uma laje de 40mm de espessura é de 3,21KN/m², valor este limitado pelo comportamento da madeira a longo prazo. No caso de não ser satisfatório o valor obtido, pode-se alterar a classe da madeira, o que, para o caso de se optar por uma classe C22, o incremento é de 0,23KN/m² resultando num valor final de 3,44KN/m². Neste caso passa a ser o ligador o material a

limitar o valor da carga máxima o que pode ser reajustado de forma a aumentar ainda mais a capacidade resistente do pavimento.

5.5.2. DIÂMETRO DO LIGADOR

O diâmetro do ligador é outro parâmetro que pode sofrer variações, podendo admitir diâmetros de 8mm, 10mm, 12mm, 16mm e 20mm. Valores superiores não são aconselhados uma vez que o custo aumenta consoante o diâmetro bem como, não são aconselhados neste tipo de estrutura visto que poderão por em causa a segurança da viga devido ao grande diâmetro de furação. Como anteriormente se definiu a espessura ideal de 40mm, neste caso, fixou-se a espessura nesse valor.

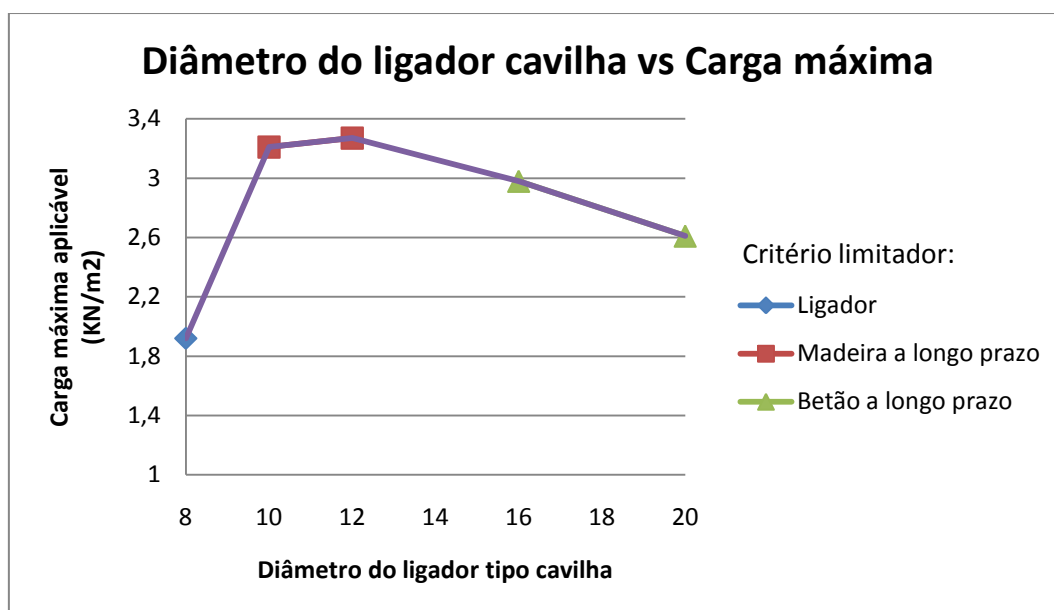


Fig. 5.7 - Carga máxima possível de aplicar de acordo com o diâmetro do ligador

Os valores descritos no gráfico provêm da tabela 5.2 abaixo.

Tabela 5.2 - Carga máxima possível de aplicar de acordo com a espessura de betão

Diâmetro do ligador cavilha (mm)	Carga máxima (KN/m ²)	Limitação
8	1,92	Ligador
10	3,21	Madeira a longo prazo
12	3,27	
16	2,98	
20	2,61	Betão a longo prazo

O gráfico indica um aumento da carga máxima possível de aplicar na estrutura associada ao aumento do diâmetro do ligador. Mas este comportamento não é linear consoante o aumento do diâmetro do ligador, porque a partir do momento em que a carga máxima é limitada pela capacidade resistente do betão a longo prazo, o aumento do diâmetro do ligador origina um decréscimo do valor da carga máxima. Este facto acontece devido à variação da rigidez que se deve apenas à alteração da espessura

e da classe do betão (sobretudo da espessura) e a rigidez conferida pelos dois materiais não aumentar proporcionalmente com a rigidez efectiva do sistema misto, conforme indica a tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Variação dos parâmetros que influenciam a diminuição da carga máxima devido ao diâmetro do ligador

Diâmetro	Unidades	16 mm	20 mm
k_u	N/mm ²	6871	8588
γ_B		0,45	0,50
a_B	mm	77,44	73,22
γ_M		1,00	1,00
a_M	mm	67,56	71,78
$(EI)_{ef}$	N.mm ²	$2,04 \times 10^{12}$	$2,136 \times 10^{12}$
psd	KN/m	2,52	2,30
Carga máxima por metro de vão	KN/m	1,19	1,05

Conforme a tabela 5.3 indica, o parâmetro a_B diminuí e o parâmetro γ_B aumenta, ambos relativos ao betão, bem como a rigidez efectiva à flexão aumenta, o que, motivado pela conjugação de valores, é influenciado o comportamento global da estrutura mista.

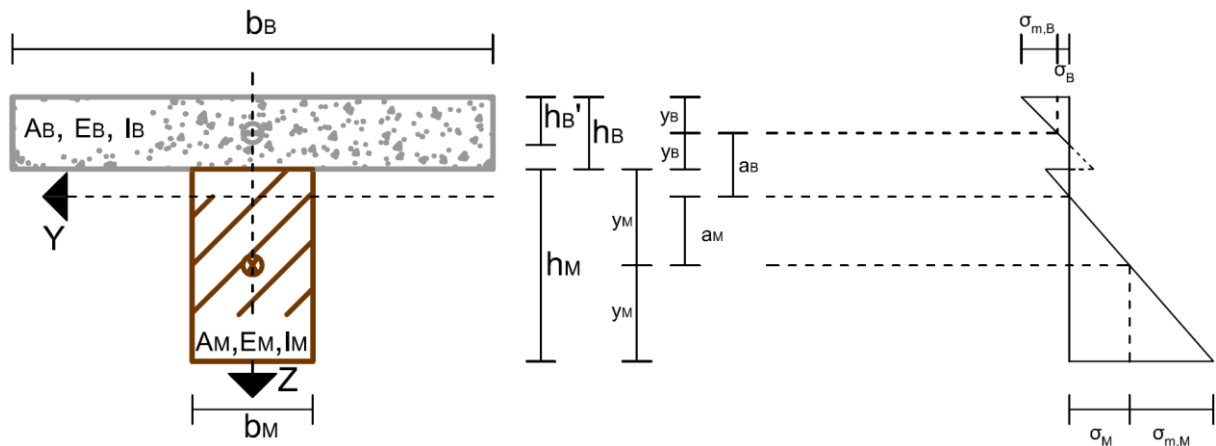


Fig 5.8 - Parâmetro correspondente à variação da rigidez garantida apenas pelo betão e a rigidez conferida por os dois materiais

Neste caso não há um valor ideal para o diâmetro do ligador, sendo o mais aconselhado o diâmetro de 10mm visto ser um diâmetro corrente no mercado e permitir uma furação adequada à viga de madeira. O valor obtido para o diâmetro de 12mm é de 3,27KN/m² (situação mais favorável). De qualquer forma, raciocinando na perspectiva custo/benefício a solução ideal poderá ser a de 10mm já que a diferença de carga adicional que se obtém não justifica, em princípio, a alteração. Acima de 10mm inclusive, o efeito ligador é relativamente reduzido.

5.5.3. ESPAÇAMENTO ENTRE LIGADORES

O espaçamento entre ligadores é algo que deve ser levado em conta no dimensionamento, devendo este parâmetro ser definido com valores adequados para uma fácil execução em obra. Não se deve optar por valores demasiado reduzidos, uma vez que a furação muito próxima pode trazer problemas de segurança, bem como um espaçamento muito elevado pode originar problemas de segurança, visto que, se um ligador não trabalhar adequadamente, os ligadores mais próximos poderão não compensar a falta deste. Deve-se ainda ter em conta a escala de espaçamento uma vez que em obra se torna difícil medir valores inferiores à dezena de centímetros. Estudaram-se assim espaçamentos a variar de 20 em 20mm, tendo-se chegado ao valor óptimo de 100mm.

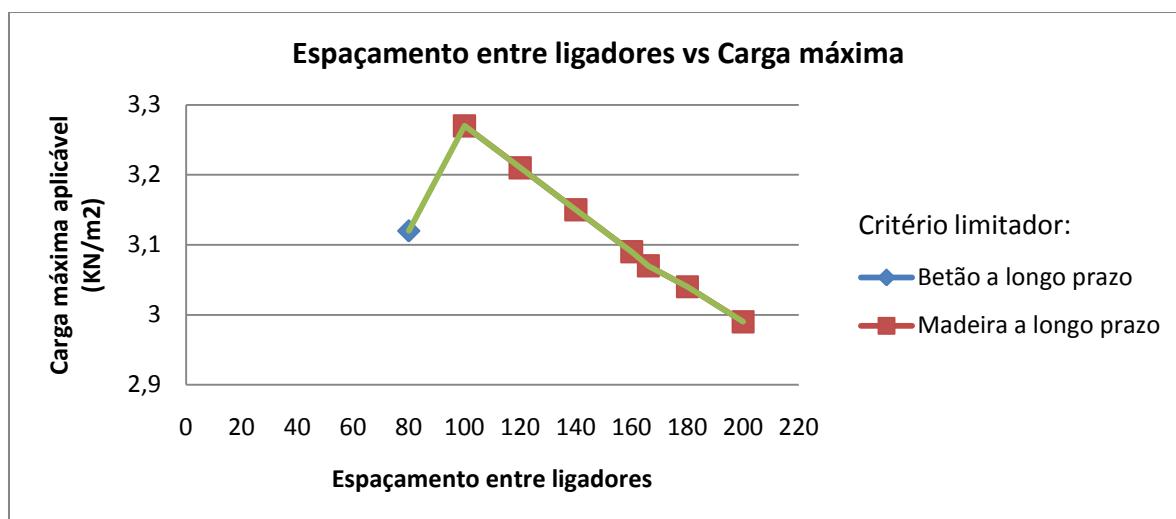


Fig. 5.9 - Carga máxima possível de aplicar de acordo com o espaçamento do ligador

Na elaboração do gráfico foi definido também um espaçamento de 166mm apenas por ser este o espaçamento sugerido pelo programa de cálculo, não devendo ser admitido como valor real, mas podendo ser utilizado como ponto de referência para a atribuição de um espaçamento.

O gráfico anterior tem como base a tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Carga máxima possível de aplicar de acordo com a espessura de betão

Espaçamento entre ligadores (mm)	Carga máxima (KN/m ²)	Limitação
80	3,12	Betão a longo prazo
100	3,27	
120	3,21	Madeira a longo prazo
140	3,15	
160	3,09	
166	3,07	
180	3,04	
200	2,99	

O gráfico anterior indica que, sendo a limitação imposta pela madeira a longo prazo, a carga máxima tende a descer à medida que aumenta o espaçamento entre ligadores. Para pequenos diâmetros, a

limitação é imposta pela capacidade resistente do betão à tracção que impede que a carga máxima admissível seja superior.

O valor aconselhado, de acordo com o que é demonstrado anteriormente é de 100mm justificando-se eventualmente o espaçamento de 140mm ou até mesmo de 200mm, valores que deverão ser validados por critérios económicos.

Concluindo, a solução ideal resulta do espaçamento de 100mm para um diâmetro de ligador de 12mm aplicado num sistema misto onde a espessura do betão é de 40mm.

5.5.4. SISTEMA DE LIGAÇÃO

No caso de se pretender recorrer a um ligador existente no mercado o programa de cálculo permite também quantificar a carga máxima admissível quando se recorre a este tipo de ligação. O ligador estudado é um dos comercializados pela empresa *Tecnaria* [77] e tem como nome “*Base connector*”. Os respectivos valores de cálculo encontram-se descritos no capítulo 3.

O projectista poderia também optar por outros sistemas de ligação. Para avaliar esse efeito, comparou-se o comportamento de ligadores tipo prego com os valores obtidos com cavilhas e com o ligador comercial.

Tabela 5.5 – Carga máxima associada à variação do tipo de ligação

	Prego circular sem pré-furação		Cavilhas		Base connector	
	Flecha limitada	Flecha não limitada	Flecha limitada	Flecha não limitada	Flecha limitada	Flecha não limitada
Carga máxima (KN/m ²)	0,33	0,33	1,88	3,04	2,40	3,44

Os valores obtidos quando se recorre ao ligador comercial são superiores aos restantes para as mesmas condições, mas há que referir que, tanto as propriedades das cavilhas como as dos pregos, são obtidas através das expressões sugeridas no Eurocódigo 5 o que origina valores bastante conservativos.

No estudo dos ligadores foram consideradas cavilhas de 10mm de diâmetro com um espaçamento de 100mm entre cada elemento. O diâmetro do ligador comercial, apenas como referência, é de 12mm. No caso dos pregos, foi considerado um diâmetro de 6mm, diâmetro este que não obriga a pré-furação e o espaçamento entre os pregos foi considerado 100mm. A comparação entre os pregos e os restantes ligadores não é válida para estas condições iniciais dos materiais, contudo é referida para a exemplificação da inferioridade dos pregos num sistema misto madeira-betão.

5.5.5. CLASSE DO BETÃO (BETÃO NORMAL)

O betão a considerar no dimensionamento pode apresentar diferentes classes parecendo assim interessante a variação da carga máxima em função da classe de betão respectiva.

Para isso procedeu-se ao estudo de sistemas mistos madeira-betão compostos por betão de classe C16/20, C20/25, C25/30 e C30/37, mantendo os restantes factores fixos com as características definidas no final do ponto 5.4.3, acima, excepto na espessura da camada de betão. Os resultados encontram-se na tabela seguinte (Tabela 5.6).

Tabela 5.6 – Variação da carga máxima com a classe de betão

	C16/20		C20/25		C25/30		C30/37	
	Flecha limitada	Flecha não limitada	Flecha limitada	Flecha não limitada	Flecha limitada	Flecha não limitada	Flecha limitada	Flecha não limitada
Carga máxima (KN/m ²)	1,95	3,30	1,98	3,31	2,00	3,32	2,05	3,35

A variação de resultados é mínima quando se varia a classe de betão o que leva à conclusão de que a classe de betão não é relevante no dimensionamento de uma laje mista madeira-betão. As variações de carga podem ser superiores no caso de o betão ser a limitação imposta, quando sujeito à tracção. Contudo nesse caso o incremento de carga obtido não é nunca elevado.

O estudo referente à classe do betão foi realizado utilizando ligadores tipo cavilhas de 12mm com um espaçamento entre estes de 100mm. A espessura da camada de betão foi de 50mm.

5.5.6. CLASSE DA MADEIRA

Contrariamente ao betão, a classe da madeira influencia bastante o resultado final quando é esta a limitação que impede valores superiores de carga máxima. Procedeu-se a uma análise de sensibilidade, considerando betão da classe C25/30 com 50mm de espessura e cavilhas de 12mm de diâmetro espaçadas entre si 100mm. Os resultados apresentam-se na tabela 5.7.

Tabela 5.7 - Variação da carga máxima com a classe da madeira

Classe da madeira	C16	C18	C20	C22	GL24h
Carga máxima (KN/m ²)	2,91	3,32	3,77	4,23	4,88

A tabela 5.7 mostra que a variação da classe da madeira origina uma grande variação da carga máxima que oscila entre os 2,91KN/m² e os 4,88KN/m². Para o valor mais elevado, considerou-se madeira lamelada colada que demonstra que o projecto de soluções novas de pavimentos mistos madeira-betão constitui uma via interessante para o projecto. Acresce ainda que, neste caso a limitação passa a ser imposta pelo ligador, o que ainda permite um eventual ganho adicional usando, por exemplo, ligadores comerciais.

A variação da classe apenas permitiu conhecer a variação da carga máxima mas não é relevante para o caso de estudo apresentado neste capítulo uma vez que se definiu inicialmente que a madeira deveria ser maciça de classe C18.

5.5.7. QUANTIFICAÇÃO DA SOBRECARGA MÁXIMA

A quantificação da carga máxima admissível deve ser definida considerando os valores ideais de cada parâmetro, devendo ser repetido o processo até se obter a melhor solução. Como no caso presente se optou por iniciar o processo com um diâmetro de 10mm para a determinação da espessura do betão, há a necessidade de reavaliar a espessura que garanta melhores resultados, admitindo agora um diâmetro de 12mm. O estudo indica que a melhor espessura passa a ser de 50mm e não os 40mm anteriormente referido.

Concluindo, uma solução que garante bons resultados resulta da escolha de um espaçamento de 100mm, valor de fácil execução, para um diâmetro de 12mm aplicado num sistema misto onde a espessura do betão é de 50mm.

Definindo no programa de cálculo todos os parâmetros como o acabado de referir, a carga máxima possível de aplicar no pavimento, independentemente das zonas, é de 2,00 KN/m² quando se considera a limitação imposta pelo Estado-limite de utilização. No caso de não se pretender controlar a flecha máxima de acordo com o Eurocódigo 5, o valor máximo da sobrecarga admissível é de 3,32KN/m² tendo como limitação a resistência da madeira a longo prazo.

Sobrecarga máxima admissível	
Carga máxima	2,00 KN/m ²
Limitação imposta por:	Serviço flecha final
Carga máxima não admitindo a deformação	3,32 KN/m ²
Limitação imposta por:	Tempo infinito madeira
u _{inst}	14,78 mm
u _{inst} máximo	21,33 mm
	L/ 433
u _{fin}	34,98 mm
u _{fin} máximo	25,60 mm
	L/ 183

Fig. 5.10 - Sobrecarga máxima admissível no pavimento

No caso de não se considerar a limitação imposta pela flecha, o programa informático indica a flecha que o pavimento atinge, tanto no início de vida do pavimento, como a longo prazo.

É possível ainda concluir-se que a capacidade resistente da madeira constitui um factor fundamental de dimensionamento, conforme se refere em 5.5.6. A alteração das condições de serviço das peças de madeira para tracção em quase toda a altura permite ainda uma maior segurança na avaliação pelo projectista já que a influência dos defeitos existentes nas peças é bastante mais fácil de avaliar.

5.5.8. EFEITO DA LIMITAÇÃO DA DEFORMAÇÃO

A limitação da deformada é um condicionalismo importante no dimensionamento de um sistema misto madeira-betão uma vez que é o parâmetro mais limitativo no processo de cálculo. Para o comprovar, o gráfico seguinte mostra a influência da limitação da deformação (Figura 5.11).

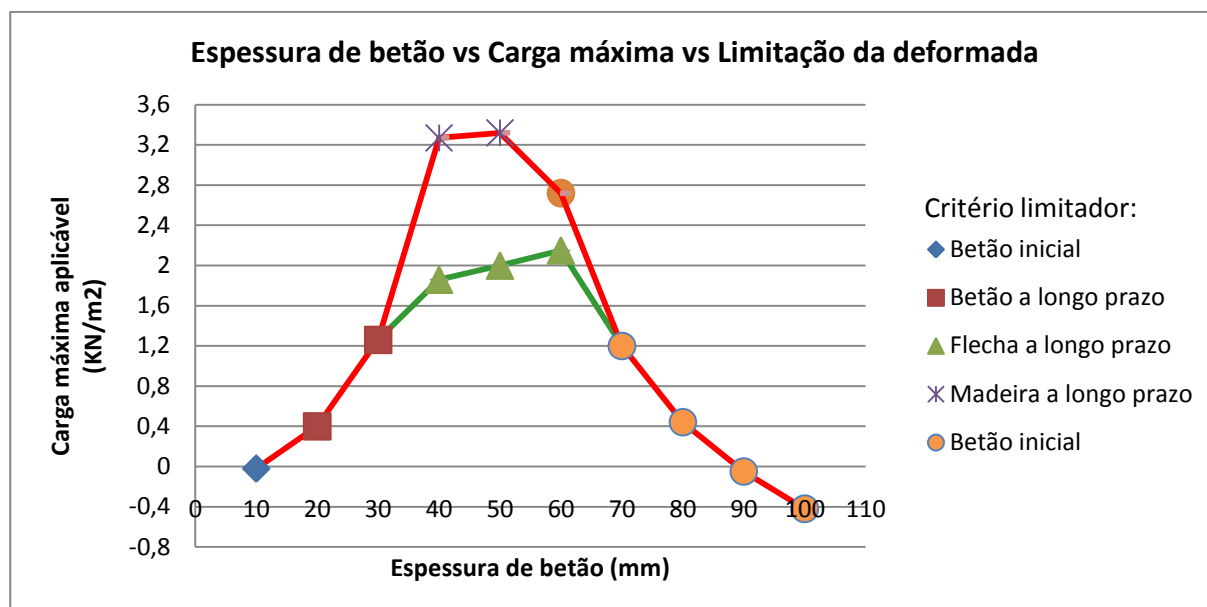


Fig. 5.11 - Comparação entre carga aceites admitindo a deformação como limitação e não admitindo a deformação como limitação

Como é visível no gráfico da figura 5.11, a deformação limita em cerca de 40% a carga máxima admissível numa estrutura de condições semelhantes às anteriormente descritas. Para uma leitura mais rigorosa dos valores obtidos, apresenta-se a tabela 5.8 abaixo.

Tabela 5.8 - Valores da carga máxima aceitável admitindo a deformação como limitação e não admitindo a deformação como limitação

Espessura do betão (mm)	Carga máxima considerando a deformação como limitação (KN/m ²)	Limitação	Carga máxima não considerando a deformação como limitação (KN/m ²)	Limitação
10	-0,02	Betão inicial	-0,02	Betão inicial
20	0,4	Betão a longo prazo	0,4	Betão a longo prazo
30	1,26		1,26	
40	1,86		3,27	Madeira a longo prazo
50	2	Flecha a longo prazo	3,32	
60	2,15		2,72	
70	1,2		1,2	
80	0,44		0,44	Betão inicial
90	-0,05	Betão inicial	-0,05	
100	-0,42		-0,42	

A diferença de valores acontece no intervalo de valores entre a espessura de 40mm e a espessura de 60mm. A partir da espessura de 70mm é indiferente quanto à máxima deformação da estrutura, estando os valores limitados pelo comportamento à tracção do betão.

5.6. UTILIZAÇÃO DE BETÃO LEVE

No dimensionamento dos pavimentos mistos madeira-betão recorrendo a betão leve, foram estudadas três classes diferentes de massa volúmica deste material com a mesma classe de resistência. A fim de se obterem resultados passíveis de comparação, a classe de resistência do betão leve foi de LC20/22 enquanto a classe de resistência do betão normal foi de C20/25. As classes de massa volúmica escolhidas foram 1.2, 1.4 e 1.6. A tabela seguinte apresenta as principais características dos betões considerados.

Tabela 5.9 - Características dos betões leves

Propriedade	Unidades	LC20/22		
		Classe 1.2	Classe 1.4	Classe 1.6
Massa volúmica	Kg/m ³	1250	1450	1650
ρ_{superior}	Kg/m ³	1200	1400	1600
η_1		0,73	0,78	0,84
η_E		0,30	0,40	0,53
f_{ck}	MPa	20	20	20
f_{ctm}	MPa	1,6	1,7	1,8
α_{icc}	MPa	0,85	0,85	0,85
f_{icd}	MPa	11,33	11,33	11,33
f_{ctmd}	MPa	0,91	0,97	1,04
E_{lcm}	GPa	8,93	12,15	15,87

O betão normal apresenta as características descritas na tabela 5.10.

Tabela 5.10 - Características dos betões normais

Propriedade	Unidades	C20/25
Massa volúmica	Kg/m ³	2500
f_{ck}	MPa	20
f_{ctm}	MPa	2,2
f_{cd}	MPa	13,33
f_{ctmd}	MPa	1,47
E_{cm}	GPa	30

Admitindo as mesmas condições, espaçamento de 400mm entre vigas, vão de 6,4m, soalho/cofragem de espessura de 25mm e definindo uma secção de 100x200mm para as vigas de madeira C18 comparou-se o comportamento de uma solução que recorreu ao betão leve e outra que recorreu a betão normal, conforme o indicado nas tabelas 5.9 e 5.10.

Para a ligação foram admitidas cavilhas de diâmetro de 10mm com um espaçamento de 100mm. As cargas máximas para os diferentes tipos de betão encontram-se representadas na figura seguinte.

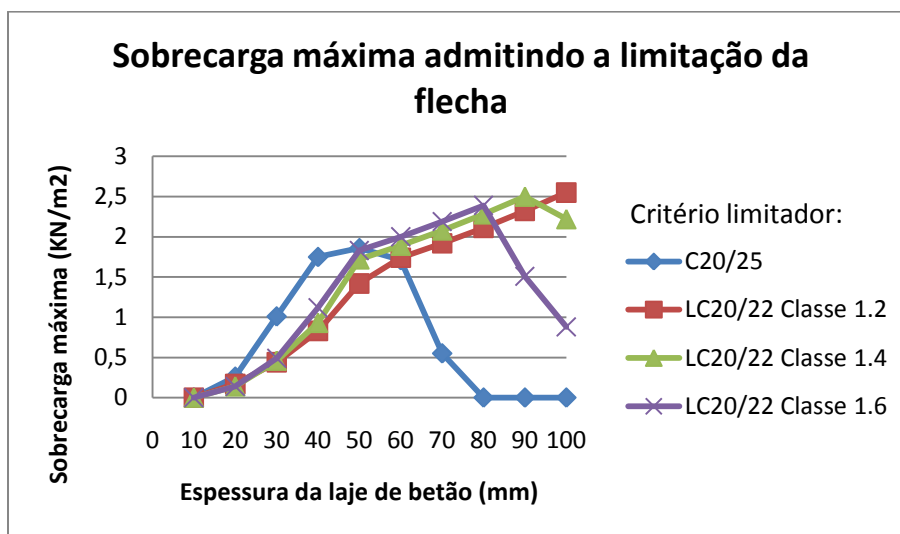


Fig. 5.12 - Comparação do comportamento de um sistema misto madeira-betão usando betão normal e betão leve admitindo a limitação da flecha

Na figura 5.13 encontram-se representados os diferentes comportamentos de pavimentos mistos quando a sobrecarga máxima não é limitada pela flecha máxima.

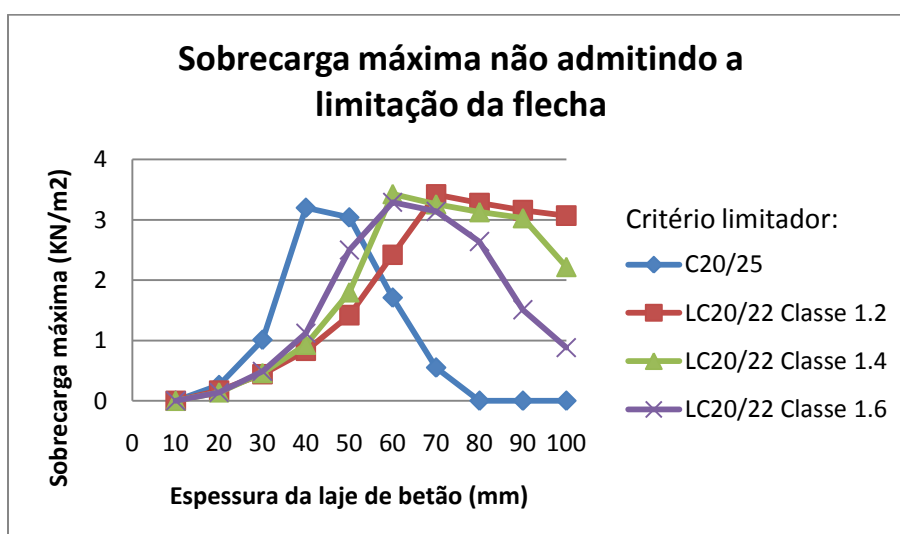


Fig. 5.13 - Comparação do comportamento de um sistema misto madeira-betão usando betão normal e betão leve não admitindo a limitação da flecha

Os valores que se encontram representados nas figuras 5.12 e 5.13 estão descriminados na tabela seguinte (Tabela 5.11).

Tabela 5.11 - Comparação do comportamento de um sistema misto madeira-betão usando betão normal e betão leve com diferentes classes de massa volúmica

Espessura (mm)	C20/25		LC20/22 Classe 1.2		LC20/22 Classe 1.4		LC20/22 Classe 1.6	
	Com limitação	Sem limitação	Com limitação	Sem limitação	Com limitação	Sem limitação	Com limitação	Sem limitação
10	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0,26	0,26	0,17	0,17	0,14	0,14	0,14	0,14
30	1,01	1,01	0,44	0,44	0,46	0,46	0,49	0,49
40	1,75	3,20	0,83	0,83	0,93	0,93	1,12	1,12
50	1,86	3,04	1,42	1,42	1,72	1,80	1,83	2,50
60	1,71	1,71	1,74	2,42	1,89	3,43	2,00	3,29
70	0,55	0,55	1,92	3,42	2,08	3,26	2,19	3,14
80	0	0	2,11	3,28	2,28	3,13	2,39	2,64
90	0	0	2,32	3,16	2,50	3,03	1,51	1,51
100	0	0	2,55	3,07	2,22	2,22	0,88	0,88

Como se pode concluir, o betão normal, para as condições acima referidas, apresenta um melhor comportamento para espessuras de betão até 50mm. A partir desse valor, o betão leve de classe de massa volúmica 1.6 admite valores superiores de sobrecarga até a uma espessura de 60mm, no caso em que não se admite flecha máxima, passando agora a limitar a tracção no betão no início do tempo de vida da estrutura. enquanto até este valor, era o ligador a limitação. No caso ser imposta a limitação da flecha, o comportamento do betão leve de massa volúmica 1.6 só é alterado para espessuras superiores a 80mm onde a limitação é imposta pelo betão à tracção no início do seu tempo de vida.

5.7. GANHO EM RELAÇÃO AO PAVIMENTO NÃO REFORÇADO

É importante conhecer a ordem de grandeza do ganho em resistência que resulta da adopção de uma solução mista madeira-betão. Para isso é necessário verificar a segurança do sistema existente considerando a sobrecarga admissível como variável. As secções das vigas existentes de madeira são de 100x200mm e o soalho tem uma espessura de 25mm sendo o espaçamento entre vigas de 400mm. O vão a considerar, como anteriormente referido, é de 6,40mm.

Estes são os valores adoptados para os elementos de madeira do pavimento misto, e a sobrecarga máxima representa o valor a determinar, como no caso anterior.

Os valores de cálculo tanto da resistência ao corte como da resistência à flexão são determinados com base nos valores descritos na tabela 5.12.

Tabela 5.12 - Valores de cálculo da resistência

	Valores de cálculo	Unidades
f_{mk}	18,0	MPa
f_{vk}	2,0	MPa
k_{mod}	0,80	
γ_M	1,3	
f_{md}	11,0	MPa
f_{vd}	1,23	MPa

Admitindo,

$$\sigma_{md} = f_{md} \quad (5.1)$$

, e definindo,

$$\sigma_{md} = \frac{M_{sd}}{I_y} \cdot Z \Leftrightarrow 11000 = \frac{M_{sd}}{6,67 \times 10^{-5}} \times \frac{0,2}{2} \Leftrightarrow M_{sd} = 7,33 \text{ KN} \cdot \text{m} \quad (5.2)$$

, onde,

I_y - Inércia da peça de madeira, $I_y = 6,67 \times 10^5 \text{ m}^4$;

Z - distância entre as fibras exteriores e o eixo neutro, $Z = 0,10 \text{ m}$.

O momento permite determinar a sobrecarga máxima possível de aplicar na estrutura.

$$M_{sd} = \frac{Q_{sd} \times L^2}{8} \Leftrightarrow 7,33 = \frac{Q_{sd} \times 6,4^2}{8} \Leftrightarrow Q_{sd} = 1,43 \text{ KN/m} \quad (5.3)$$

No caso dos Estados-limite últimos a combinação de acções a empregar é obtida pela combinação de acções fundamental:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \Psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (5.4)$$

O peso próprio para uma vigas de madeira de classe de resistência C18 (EN338) com a secção de 100x200mm é de:

$$PP = (b \times h) \times \rho_{média} = 0,144 \text{ KN/m} \quad (5.5)$$

,onde:

b - base da secção da peça de madeira, $b = 0,10 \text{ m}$;

h - altura da secção da peça de madeira, $h = 0,20 \text{ m}$;

$\rho_{média}$ - massa volúmica, $3,80 \text{ KN/m}^3$ (EN338).

O valor da sobrecarga máxima possível de aplicar é de $2,13 \text{ KN/m}^2$.

Relativamente à resistência ao corte da madeira considera-se:

$$\sigma_{vd} = \frac{3V_{sd}}{2bh} \Leftrightarrow 1230 = \frac{3V_{sd}}{2 \times 0,10 \times 0,20} \Leftrightarrow V_{sd} = 16,40 \text{KN} \quad (5.6)$$

, obtendo-se posteriormente,

$$V_{sd} = \frac{Q_{sd} \times L}{2} \Leftrightarrow 16,40 = \frac{Q_{sd} \times 6,4}{2} \Leftrightarrow Q_{sd} = 5,13 \text{KN/m} \quad (5.7)$$

Como o valor obtido é superior ao obtido através do momento flector, admite-se o valor obtido pelo momento flector como o valor limitador.

Obteve-se um valor de 2,13KN/m² o que implica que o ganho associado à solução mista é de cerca de 1,2KN/m² que, como se viu, poderia aumentar muito, usando madeira mais resistente.

Efectuou-se ainda o estudo da variação da sobrecarga admissível, com o vão, para três situações diferentes (ver figura 5.14). As três estruturas referidas no gráfico correspondem a:

- Estrutura simples em madeira com soalho pregado (sobrecarga máxima designada por Qsimples);
- Estrutura em madeira com soalho pregado revestida com camada de betão simples sem sistema de ligação (sobrecarga máxima designada Qbetão);
- Estrutura mista de madeira-betão com soalho pregado (sobrecarga máxima designada Qmisto).

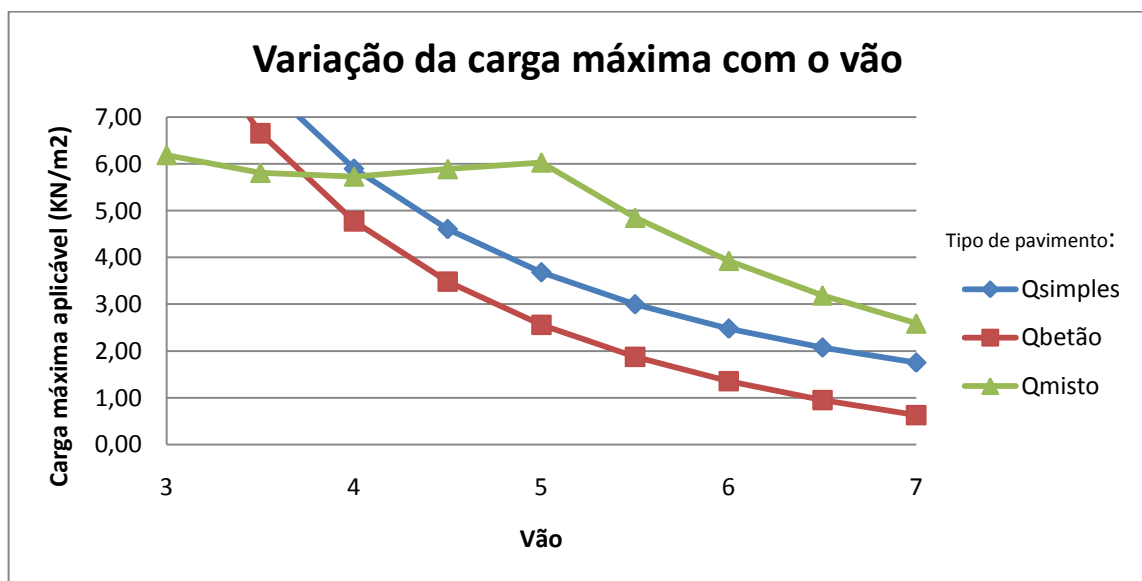


Fig. 5.14 - Efeito do vão para vários tipos de pavimento

O gráfico da figura 5.14 indica que, para as condições impostas a estrutura que apresenta melhor comportamento é a relativa à estrutura mista madeira-betão para um vão de 5m. Para vãos maiores a estrutura mista continua a ser a que melhores resultados apresenta embora o incremento de carga vá diminuindo rapidamente. No caso dos vãos serem de reduzidas dimensões, a estrutura mais eficaz é a que é constituída por vigas de madeira com soalho pregado, enquanto que a estrutura mista madeira-betão tem a desvantagem do peso próprio do betão que influencia o comportamento global. Para vãos inferiores a 4,0 metros, o comportamento da solução de vigas de madeira com a camada de betão deveria corresponder à solução mista madeira-betão e só não é referido no gráfico porque a análise do sistema misto engloba a verificação da fissuração do betão o que limita os valores da carga máxima obtida para a solução mista.

A variação brusca visível no gráfico relativa ao sistema misto madeira-betão é influenciada pela limitação relativa à fissuração do betão até os 5,0 metros enquanto que, para vãos maiores, a limitação é imposta pela madeira.

Esta análise permite ainda confirmar o efeito muito positivo que se pode esperar da utilização de madeira mais resistente.

5.8. VERIFICAÇÃO SIMPLES DE SEGURANÇA

O programa desenvolvido permite também verificar a estabilidade de soluções correntes o que se simulou de forma sintética e se descreve nos parágrafos seguintes.

5.8.1. PAVIMENTOS EM ZONAS CORRENTES

No caso das zonas correntes a proposta de intervenção sugere um revestimento em soalho de madeira pregado em ripas que se encontram fixas à camada de betão. Como se trata de um espaço multiusos não se admitem divisórias permanentes nos espaços correntes podendo haver pequenas divisórias pontuais que se encontram englobadas em cargas variáveis. Caso se pretendesse, o pavimento poderia ter a mesma cota em todos os espaços, independentemente destes serem zonas especiais ou zonas correntes, bastando aplicar uma camada de regularização sobre a camada de betão, camada esta que poderia ser em argila expandida, sendo esta camada admitida no programa de cálculo como camada final. No presente caso não se optou por ter a mesma cota em todas as divisões visto a soleira da porta a norte já se encontrar a uma cota superior à das escadas de entrada, bem como ser possível o disfarce pelas portas das diferenças de cota interiores.

Para carga variável admitiu-se o valor de $3,00\text{KN/m}^2$, valor este que se enquadra com o estudo anteriormente descrito. Para cargas aplicadas nas zonas correntes consideram-se os valores indicados na Tabela 5.13.

Tabela 5.13 - Cargas permanentes aplicadas em zonas correntes

Material	Carga aplicada	Carga aplicada
	(Kg/m ²)	(KN/m ²)
Soalho em madeira	10	0,10
Ripado em madeira	3,00	0,03
Divisórias	15	0,15

A aplicação destas cargas é considerada no programa de cálculo na entrada de dados na zona de cargas aplicadas.

Camada final	0,10	KN/m ²
Pavimento	0,00	KN/m ²
Divisórias	0,15	KN/m ²
Outras	0,03	KN/m ²

Fig. 5.15 - Cargas aplicadas em zonas correntes

Uma vez introduzidos todos os parâmetros relativos ao pavimento em estudo e definindo o objectivo de verificar a segurança do pavimento, o programa de cálculo comenta todas as verificações realizadas (Figura 5.16).

Verificações	
Betão	Compressão Betão resiste à compressão imposta
	Tracção Betão resiste à tracção imposta
Madeira	Aceite relativamente ao corte
	Classe da madeira aceite
Tipo de ligação	Encontra-se de acordo com os regulamentos

Fig. 5.16 - Verificações realizadas ao pavimento relativo às zonas correntes

Como é visível na figura 5.16, o pavimento previsto cumpre todas as verificações impostas na legislação em vigor. Mais detalhadamente, o programa indica quais as tensões e deformações discriminando relativamente ao Estado-limite último e ao Estado-limite de utilização, e subdividindo o Estado-limite último em estado inicial e em comportamento ao longo do tempo.

A figura seguinte é relativa ao Estado-limite último:

Verificação a curto prazo			
Verificação ao corte			
$\tau_{\text{máx}}$	0,68 N/mm ²		
$f_{v,d}$	1,23 N/mm ²	ok	
Verificação da ligação			
F_d	4,37 kN		
R_d	8,36 kN	ok	
Tensões Normais			
Betão			
τ_1	3,50 N/mm ²		
$\tau_{m,1}$	4,28 N/mm ²		
Madeira			
τ_2	3,50 N/mm ²		
$\tau_{m,2}$	4,97 N/mm ²		
Verificação dos materiais			
Betão			
$\tau_{c,\text{topo}}$	7,78 N/mm ²	Máximo	16,67 ok
$\tau_{c,\text{base}}$	0,78 N/mm ²		1,73 ok
Madeira			
	0,97		1 ok

Verificação a longo prazo			
Tensões Normais			
Betão			
τ_1	3,50 N/mm ²		
$\tau_{m,1}$	3,19 N/mm ²		
Madeira			
τ_2	3,50 N/mm ²		
$\tau_{m,2}$	5,25 N/mm ²		
Verificação dos materiais			
Betão			
$\tau_{c,\text{topo}}$	6,68 N/mm ²	Máximo	16,67 ok
$\tau_{c,\text{base}}$	0,31 N/mm ²		1,73 ok
Madeira			
	0,99		1 ok

Fig. 5.17 - Verificação para o Estado-limite último em zonas correntes

Para o Estado-limite de utilização, mais concretamente para o Estado-limite de deformação, o programa apresenta os resultados ilustrados na figura 5.18.

Deformação				
u_{inst}	14,65 mm	<	21,33 mm	ok
u_{netfin}	34,67 mm	>	25,60 mm	KO
u_{fin}	@@@ mm	>	@@@ mm	Sem Contraflecha

Fig. 5.18 - Verificação para o Estado-limite de deformação em zonas correntes

Conforme o programa indica a solução encontra-se em segurança dentro dos parâmetros impostos pelo Estado-limite de utilização, enquanto que para o Estado-limite de utilização a verificação da flecha máxima não é respeitada para a situação a longo prazo. Neste caso poderá o não cumprimento da flecha máxima pode trazer problemas ao nível do tecto falso visto que há uma flecha central elevada quando comparada com a flecha inicial.

5.8.2. PAVIMENTOS EM ZONAS ESPECIAIS

No caso dos pavimentos em zonas especiais, como próprio nome indica, o estudo tem um carácter especial. O uso pretendido nestes espaços não é igual ao que se pretende para os espaços correntes uma vez que a estes só correspondem as casas de banho. Por esse motivo, admitiu-se apenas uma carga variável de $2,00\text{KN/m}^2$, e são consideradas as cargas impostas pelo sistema de suporte do novo pavimento e o peso próprio do novo pavimento somando um peso próprio de $0,50\text{KN/m}^2$. As divisórias são também consideradas nas zonas especiais obtendo-se as cargas descritas na figura 5.19.

Cargas aplicadas	
Peso Próprio	0,64 KN/m
Permanentes	0,26 KN/m
Variáveis	0,80 KN/m
Carga total por metro linear	1,70 KN/m

Fig. 5.19 - Cargas aplicadas em zonas especiais por metro de viga

As verificações relativas ao Estado-limite último encontram-se na figura 5.20.

Verificação a curto prazo			
Verificação ao corte			
$\tau_{\text{máx}}$	0,59 N/mm ²		
$f_{v,d}$	1,23 N/mm ²	ok	
Verificação da ligação			
F_d	3,79 KN		
R_d	8,36 KN	ok	
Tensões Normais			
Betão			
τ_1	3,03 N/mm ²		
$\tau_{m,1}$	3,71 N/mm ²		
Madeira			
τ_2	3,03 N/mm ²		
$\tau_{m,2}$	4,31 N/mm ²		
Verificação dos materiais			
Betão			
$\tau_{c,\text{topo}}$	6,74 N/mm ²	< 16,67	ok
$\tau_{c,\text{base}}$	0,68 N/mm ²	< 1,73	ok
Madeira			
	0,84	< 1	ok

Verificação a longo prazo			
Tensões Normais			
Betão			
τ_1	3,03 N/mm ²		
$\tau_{m,1}$	2,76 N/mm ²		
Madeira			
τ_2	3,03 N/mm ²		
$\tau_{m,2}$	4,55 N/mm ²		
Verificação dos materiais			
Betão			
$\tau_{c,\text{topo}}$	5,79 N/mm ²	< 16,67	ok
$\tau_{c,\text{base}}$	0,27 N/mm ²	< 1,73	ok
Madeira			
	0,86	< 1	ok

Fig. 5.20 - Verificação do Estado-limite último em zonas especiais

A figura seguinte é relativa à deformação do sistema misto quando sujeito às cargas impostas em zonas especiais como é o caso da casa de banho.

Deformação				
uinst	12,76 mm	<	21,33 mm	ok
unetfin	30,21 mm	>	25,60 mm	KO
ufin	@@@ mm	>	@@@ mm	Sem Contraflecha

Fig. 5.21 - Verificação para o Estado-limite de deformação em zonas especiais

5.9. VALORES DE REFERÊNCIA

Uma das grandes limitações para os projectistas é o não conhecimento das capacidades possíveis de obter com o recurso a soluções mistas como é o caso de pavimentos mistos madeira-betão. Para combater essa falta de informação é proposto na tabela seguinte diversos valores de sobrecarga máxima possível de aplicar em diversos pavimentos. Os parâmetros que se pretendem variar são:

- Vão do pavimento;
- Classe da madeira;
- Secção das vigas de madeira;
- Diâmetro do ligador;
- Espessura de betão;
- Estado-limite de deformação.

Os restantes parâmetros de dimensionamento são considerados constantes, admitindo uma classe de betão de C25/30 e um ligador tipo cavilha com um espaçamento 100mm. O soalho tem 25mm de espessura. É considerada uma classe de serviço como classe 1 e admitindo acções de média duração. Os limites das flechas são os referidos no capítulo 4.

Tabela 5.14 - Sobrecarga máxima usando um betão C25/30

	Vão (m)	Classe da madeira	Secção da peça(mm ²)	10mm				12mm			
Diâmetro do ligador											
Espessura do betão				40mm		50mm		40mm		50mm	
Limitação da flecha				Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não
3	C14	80x160	2,59	2,59	1,66	1,66	3,11	3,11	1,99	1,99	
		100x200	6,09	6,09	3,89	3,89	7,41	7,41	4,59	4,59	
	C16	80x160	3,14	3,14	2,02	2,02	3,78	3,78	2,41	2,41	
		100x200	7,36	7,36	4,62	4,62	9,07	9,07	5,46	5,46	
	C18	80x160	3,59	3,59	2,30	2,30	4,34	4,34	2,75	2,75	
		100x200	8,43	8,43	5,22	5,22	10,49	10,49	6,19	6,19	
4	C14	80x160	2,09	2,09	1,02	1,02	2,59	2,59	1,28	1,28	
		100x200	6,25	6,25	3,11	3,11	6,94	6,94	3,85	3,85	
	C16	80x160	2,70	2,70	1,35	1,35	3,38	3,38	1,68	1,68	
		100x200	7,11	7,11	3,89	3,89	8,32	8,32	4,85	4,85	
	C18	80x160	3,25	3,25	1,64	1,64	4,12	4,12	2,03	2,03	
		100x200	7,38	7,38	4,56	4,56	9,23	9,23	5,73	5,73	
5	C14	80x160	1,34	1,82	0,61	0,61	1,44	2,12	0,82	0,82	
		100x200	3,62	4,16	2,83	2,83	3,82	4,25	3,63	3,63	
	C16	80x160	1,61	2,57	0,94	0,94	1,71	2,71	1,21	1,21	
		100x200	4,13	4,83	3,79	3,79	4,35	5,21	4,73	4,95	
	C18	80x160	1,84	3,01	1,24	1,24	1,96	3,08	1,59	1,59	
		100x200	4,57	4,99	4,70	4,70	4,82	5,83	5,24	6,03	
6	C14	80x160	0,35	1,15	0,31	0,31	0,40	1,17	0,39	0,48	
		100x200	1,76	2,64	1,86	2,66	1,86	2,70	1,99	2,71	
	C16	80x160	0,52	1,57	0,52	0,64	0,57	1,60	0,58	0,86	
		100x200	2,07	3,33	2,21	3,32	2,18	3,40	2,35	3,46	
	C18	80x160	0,66	1,83	0,69	0,96	0,72	1,87	0,76	1,25	
		100x200	2,35	3,66	2,52	3,42	2,47	3,84	2,67	3,93	
7	C14	80x160	-	0,57	-	0,08	-	0,59	-	0,20	
		100x200	0,72	1,68	0,72	1,64	0,78	1,72	0,78	1,67	
	C16	80x160	-	0,89	-	0,39	-	0,91	-	0,56	
		100x200	0,92	2,21	0,94	2,20	0,98	2,25	1,02	2,24	
	C18	80x160	-	1,09	-	0,72	0,04	1,11	-	0,97	
		100x200	1,10	2,54	1,15	2,54	1,17	2,49	1,23	2,59	

Na tabela seguinte (Tabela 5.15), encontram-se os valores da sobrecarga máxima relativos ao betão leve LC20/22 de classe de massa volúmica 1.6. Os parâmetros relativos aos restantes materiais, são os considerados para a tabela anterior (Tabela 5.14) para uma melhor comparação.

Tabela 5.15 - Sobrecarga máxima usando um betão LC20/22 de classe de massa volúmica 1.6

	Vão (m)	Classe da madeira	Secção da peça(mm ²)	10mm				12mm			
Diâmetro do ligador				40mm		50mm		40mm		50mm	
Espessura do betão				Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não
Limitação da flecha				Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não
3	C14	80x160		5,61	5,61	3,12	3,12	7,00	7,00	3,79	3,79
		100x200		11,8	11,8	7,31	7,31	12,1	12,1	9,25	9,25
	C16	80x160		7,21	7,21	3,79	3,79	8,29	8,29	4,65	4,65
		100x200		12,4	12,4	9,02	9,02	14,1	14,1	11,7	11,7
	C18	80x160		8,64	8,64	4,34	4,34	9,14	9,14	5,38	5,38
		100x200		13,0	13,0	10,5	10,5	15,6	15,6	13,9	13,9
	C14	80x160		3,17	3,79	2,88	2,88	3,33	3,87	3,65	3,65
		100x200		6,08	6,08	6,91	6,91	6,96	6,96	7,25	7,25
	C16	80x160		3,57	4,58	3,78	3,78	3,75	4,68	4,20	4,92
		100x200		7,52	7,52	7,23	7,23	7,39	7,39	8,62	8,62
	C18	80x160		3,93	5,08	4,38	4,64	4,11	5,20	4,61	5,49
		100x200		7,84	7,84	7,51	7,51	7,02	7,02	9,47	9,53
4	C14	80x160		1,38	2,25	1,53	2,33	1,45	2,29	1,62	2,37
		100x200		3,39	3,75	3,41	4,42	3,22	3,22	3,89	4,51
	C16	80x160		1,60	2,80	1,78	2,92	1,67	2,85	1,87	2,97
		100x200		3,40	3,40	4,18	5,00	2,97	2,97	4,37	5,46
	C18	80x160		1,79	3,14	2,00	3,28	1,87	3,20	2,10	3,34
		100x200		3,26	3,26	4,59	5,18	2,86	2,86	4,79	6,07
	C14	80x160		0,50	1,37	0,54	1,38	0,53	1,39	0,58	1,41
		100x200		1,71	1,71	1,86	2,88	1,52	1,52	1,95	2,93
	C16	80x160		0,63	1,77	0,69	1,81	0,66	1,74	0,73	1,84
		100x200		1,57	1,57	2,14	3,55	1,41	1,41	2,24	3,14
	C18	80x160		0,75	1,75	0,82	2,07	0,78	1,54	0,87	2,10
		100x200		1,51	1,51	2,40	3,35	1,36	1,36	2,49	2,86
5	C14	80x160		0,02	0,82	-	0,79	0,04	0,83	0,01	0,80
		100x200		0,78	0,81	0,84	1,90	0,72	0,72	0,89	1,87
	C16	80x160		0,10	0,97	0,09	1,11	0,12	0,86	0,11	1,13
		100x200		0,73	0,73	1,02	1,82	0,66	0,66	1,07	1,59
	C18	80x160		0,18	0,84	0,17	1,31	0,19	0,75	0,20	1,33
		100x200		0,70	0,70	1,18	1,65	0,63	0,63	1,23	1,44

A escolha da classe de massa volúmica de 1.6 do betão leve deve assenta na escolha da classe de resistência do betão leve uma vez que não é aceitável admitir classes de massa volúmica 1.0 e 1.2 para betões de resistência à compressão de 20 a 25 MPa. Para se obter um valor de massa volúmica baixo, na produção do betão é necessário introduzir uma grande quantidade de ligante na amassadura e de superplastificantes que permitem reduzir a quantidade de água.

A variação dos valores das sobrecargas máximas possíveis de aplicar na estrutura mista nem sempre é a previsível. Um exemplo disso acontece quando se usa um betão de classe LC20/22 de classe volúmica 1.6 com uma espessura de 40mm, usando uma cavilha de 10mm, num vão de 6m e uma secção de 100x200mm, onde a sobrecarga máxima para uma viga de madeira de classe C16 é de $1,57\text{KN/m}^2$ e, como seria de esperar, o aumento de classe implicaria um aumento de sobrecarga máxima possível de aplicar ao pavimento. Como se pode ver na tabela 5.15 isso não acontece, havendo uma redução para $1,51\text{KN/m}^2$. O motivo desta redução prende-se com o facto de, conforme o justificado no ponto 5.4.2 deste capítulo, a conjugação dos parâmetros de cálculo do sistema misto influenciarem o comportamento global da estrutura mista madeira-betão.

Na comparação dos dois tipos de betão obtiveram-se as seguintes conclusões:

- o incremento de sobrecarga máxima admissível provocado pela utilização do betão leve é vantajoso para qualquer vão, contudo é mais visível em vão de reduzidas dimensões uma vez que a sobrecarga máxima é superior. Para uma comparação mais correcta, é necessário um estudo económico para perceber qual a solução que melhores resultados apresenta;
- a variação entre valores de sobrecargas máximas possíveis de aplicar no pavimento, como o aumento de vão, é muito mais significativa quando a distância entre vão é menor, apesar da variação provocada pelo aumento da classe da madeira ser semelhante em qualquer distância entre eixos das peças de madeira;
- A secção da viga de madeira, como seria de esperar, é um factor muito importante na quantificação da sobrecarga máxima, uma vez que, independentemente da classe da madeira como do vão, o incremento de carga é significativo.
- A variação do diâmetro do ligador provoca a mesma evolução de cargas para betão normal e betão leve, apenas variando as sobrecargas de acordo com o tipo de betão;
- a espessura de betão, em qualquer tipo de betão, apresenta o comportamento esperado.

5.10.PROPOSTA DE INTERVENÇÃO - PORMENORES CONSTRUTIVOS

Tendo como objectivo principal a optimização do desempenho global do edifício com recurso ao mínimo investimento, procurou-se desenvolver soluções de pormenorização associadas à melhoria do pavimento nas três áreas principais da Física das Construções (Segurança contra incêndios, térmica e acústica).

5.10.1. PAVIMENTOS EM ZONAS CORRENTES

Quando um edifício antigo é sujeito a intervenções de reabilitação pretende-se, normalmente, preservar a identidade deste, tentando manter os elementos construtivos ou simplesmente, quando não é possível, alterando-os para elementos que provoquem o mesmo impacto visual.

No caso de estudo referido neste capítulo, como não foi possível manter o pavimento existente, procedeu-se à alteração deste por um que apresentasse as mesmas características dimensionais, mantendo assim as entregas das vigas nas paredes estruturais. Como o pavimento do piso 1 não tem uma forma perfeitamente rectangular, num dos compartimentos, as vigas não poderão ter o mesmo comprimento devendo ser dimensionadas e adquiridas em grupos de comprimentos. Para simplificação, tanto o dimensionamento apresentado anteriormente, como a proposta de intervenção consideram-se apenas vigas de 6,40m de dimensão, uma vez que este é o caso mais gravoso.

As zonas correntes são constituídas por vigas de madeira de secção 100x200mm que apoiam directamente nas paredes estruturais. Sobre as vigas é aplicado o soalho directamente, soalho esse que tem uma espessura de 25mm. Neste caso prático, o soalho não se encontra à vista pelo lado inferior, mas caso seja pedido, deve-se aplicar o soalho com a melhor face voltada para baixo. Na face superior do soalho deve-se aplicar uma tela impermeabilizante que permita a protecção da madeira contra a água do betão e impeça a perda da goma do betão. A colocação dos ligadores pode suceder ou anteceder a colocação da tela devendo ter-se em atenção a possibilidade de rotura da tela na zona dos ligadores. Os ligadores considerados apresentam um diâmetro de 12mm e um espaçamento de 100mm entre estes. O comprimento do ligador é de 180mm devendo o diâmetro da pré-furação ser inferior ao diâmetro do ligador. Uma vez que o ligador deve estar envolto em betão, este deve ser dobrado a 90° de forma a deixar cerca de 10mm de recobrimento no mínimo. O betão deve ser aplicado com uma espessura de 50mm, valor de acordo com o dimensionamento anteriormente referido.

O revestimento de piso superior é livre e deve ser obviamente especificado pela arquitectura.

Neste caso, o isolamento é colocado entre as vigas de madeira e pode ser colocado posteriormente à execução do pavimento. O isolamento deve ser fixo às vigas de madeira através de cavilhas apropriadas resistentes à corrosão. Há a possibilidade de colocar o isolamento em toda a extensão do pavimento sendo fixado nas vigas de madeira, embora esta solução seja mais dispendiosa e provoque uma perda de pé-direito. O revestimento inferior pode ser em placas de gesso cartonado, por exemplo, permitindo a posterior pintura das mesmas.

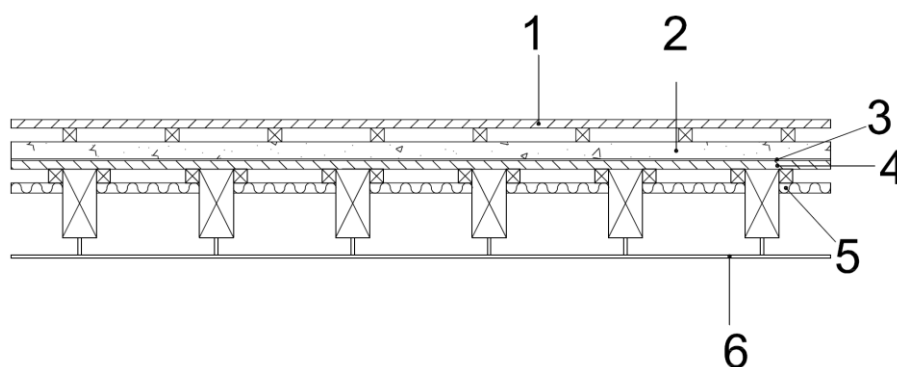


Fig. 5.22 - Pormenor construtivo do pavimento em zonas correntes. Legenda: 1. Revestimento de piso (acabamento); 2. Laje de betão; 3. Membrana impermeabilizante; 4. Soalho (cofragem); 5. Isolamento (acústico e/ou térmico); 6. Revestimento de tecto.

5.10.2. PAVIMENTOS EM ZONAS ESPECIAIS

Entende-se como zonas especiais, zonas onde haja movimentação de água e uma vez que no caso de estudo se encontra projectada uma casa de banho deve-se admitir nesta zona um pavimento especial à base de revestimentos impermeáveis. Como se trata de um pavimento de casa de banho, este deve incluir as tubagens, o que neste caso, a altura é atingida com o recurso a suportes metálicos. A altura dos suportes deve ser definida pelo projectista de forma a garantir a altura mínima para a colocação das tubagens necessárias.

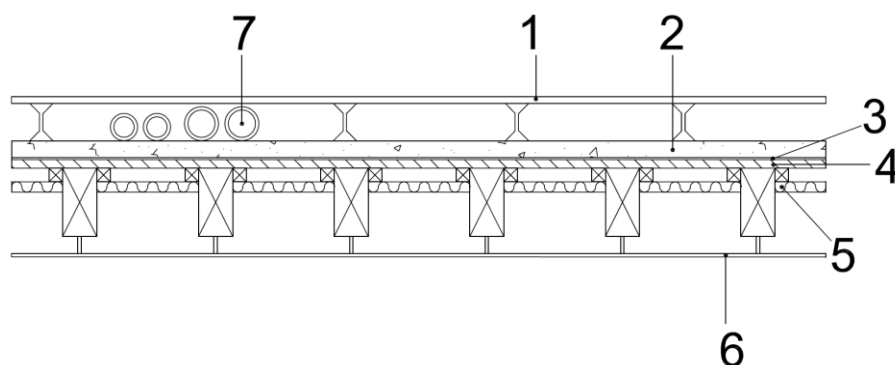


Fig. 5.23 - Pormenor construtivo do pavimento em zonas especiais. Legenda: 1. Revestimento de piso (acabamento); 2. Laje de betão; 3. Membrana impermeabilizante; 4. Soalho (cofragem); 5. Isolamento (acústico e/ou térmico); 6. Revestimento de tecto; 7. Tubagens.

5.10.3. LIGAÇÃO ENTRE PAVIMENTO EM ZONA CORRENTE E PAVIMENTO EM ZONA ESPECIAL

A ligação entre diferentes tipos de zonas provoca um desfaseamento de cotas entre o pavimento das casas de banho e o pavimento das zonas correntes. Neste caso a variação é de 65mm o que é aceitável visto se formar um pequeno degrau que se encontra disfarçado pela da porta. No presente caso optou-se pela colocação de uma régua de madeira na ligação, de forma a eliminar a abertura provocada pela diferença de cotas. A colocação de uma régua de madeira pode ser alterada por outro tipo de sistema de remate embora esta seja uma solução visualmente mais agradável. No caso da zona corrente ter uma movimentação mais intensiva, o remate deve ser estanque a sujidade, visto esta se poder acumular na caixa de ar existente, devido aos suportes (Figura 5.24).

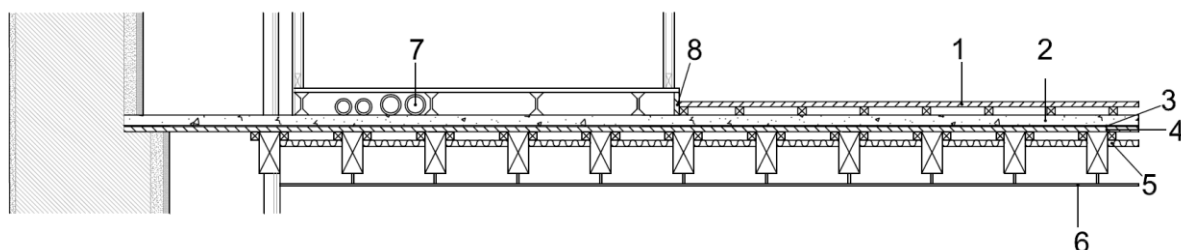


Fig. 5.24 - Pormenor construtivo do pavimento em zonas especiais. Legenda: 1. Revestimento de piso (acabamento); 2. Laje de betão; 3. Membrana impermeabilizante; 4. Soalho (cofragem); 5. Isolamento (acústico e/ou térmico); 6. Revestimento de tecto; 7. Tubagens; 8. Remate de madeira.

5.10.4. LIGAÇÃO ÀS PAREDES DE ALVENARIA RESISTENTE

A ligação à parede é um pormenor que deve ser considerado uma vez que o betão é um novo elemento do sistema e este encontra-se em contacto com as paredes estruturais. A existência de uma viga de madeira próxima da parede permite que o pavimento trabalhe sem qualquer transferência de esforços para as paredes estruturais a nascente e poente do edifício.

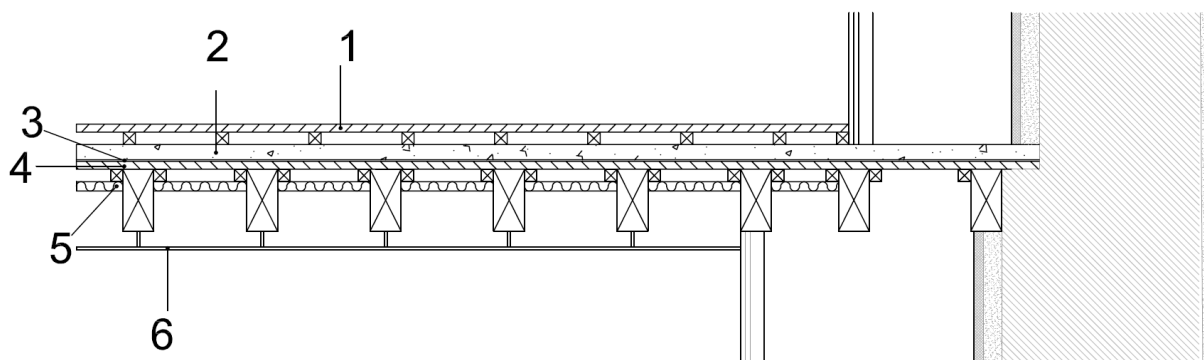


Fig. 5.25 - Pormenor construtivo da ligação do pavimento às paredes estruturais. Legenda: 1. Revestimento de piso (acabamento); 2. Laje de betão; 3. Membrana impermeabilizante; 4. Soalho (cofragem); 5. Isolamento (acústico e/ou térmico); 6. Revestimento de tecto.

5.10.5. LIGAÇÃO A PORTAS

A ligação à porta é importante na medida em que é a soleira da porta que define a cota possível do pavimento interior. Não é aconselhável aumentar em excesso a altura da soleira visto que pode tornar-se desconfortável ao uso a passagem pelas portas exteriores.

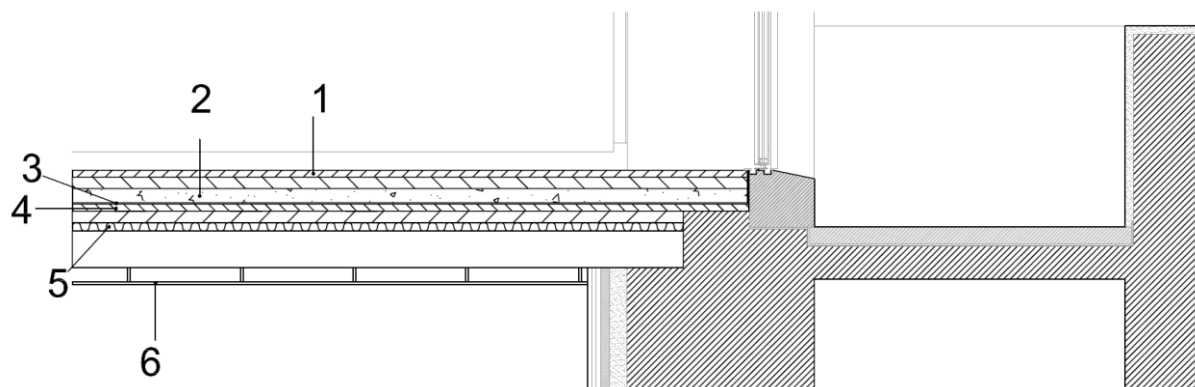


Fig. 5.26 - Pormenor construtivo da ligação à parede junto a uma porta exterior. Legenda: 1. Revestimento de piso (acabamento); 2. Laje de betão; 3. Membrana impermeabilizante; 4. Soalho (cofragem); 5. Isolamento (acústico e/ou térmico); 6. Revestimento de tecto.

5.11. SÍNTESE DAS PRINCIPAIS CONCLUSÕES

Os estudos de sensibilidade efectuados permitem retirar uma série de conclusões qualitativas com carácter preliminar que deveram ser validadas através da realização de muitos mais estudos de caso semelhantes ao descrito neste capítulo.

Julga-se no entanto poder retirar as seguintes conclusões relativamente aos parâmetros de dimensionamento de um pavimento misto madeira-betão:

- O betão a adoptar deverá ser de classe média ou média-baixa (sugere-se C25/30 ou C20/25) já que não se retiram grandes ganhos de melhoria das propriedades do betão associadas a qualidades superiores;

- a espessura da camada ideal varia entre 40 e 70 mm não ocorrendo em geral qualquer ganho, para espessuras superiores a 70mm;
- a influência do ligador não é desprezável tanto ao nível do tipo de ligador como ao nível do espaçamento entre ligadores; sugere-se a título indicativo, o uso de ligadores comerciais com características bem refutadas experimentalmente com corpo principal de diâmetro maior ou igual a 10mm e espaçadas entre 100 e 200mm;
- a capacidade resistente das peças de madeira tem uma enorme influência no desempenho global; sugere-se assim para soluções novas a aplicação de madeira maciça certificada de boa qualidade, da classe C24 ou superior, ou madeira lamelada colada de classe GL24h ou superior; As vigas deverão ser espaçadas de valores não muito elevados, sugerindo-se valores entre 400 e 500mm entre eixos das peças;
- os pavimentos mistos madeira-betão são muito indicados para vãos entre os 5 e os 6,5 metros,
- na reabilitação de soluções existentes, poderá não ser possível aumentar a capacidade de carga existente mais do que 1,0 e 1,5KN/m² o que pode inviabilizar a solução quando se altera significativamente o uso dos espaços, aumentando muito as sobrecargas de utilização;
- a opção de utilização de betão leve deve ser considerada uma vez que apresenta resultados mais satisfatórios, contudo deverá ser realizado um estudo económico para perceber se é viável optar pelo betão leve. Se não se justificar a utilização de betão leve, pode-se optar por a alteração de alguns parâmetros de projecto para incrementar a sobrecarga admissível, aproximando o valor do obtido pelo betão leve;
- uma das grandes vantagens deste tipo de pavimento associa-se ao grande aumento de flexibilidade que trazem à arquitectura, nomeadamente ao nível das soluções de paredes divisórias e de revestimentos de pavimentos, paredes e tectos o que torna a solução muito apropriada para situações em que a estrutura existente é aproveitada, procedendo-se à revisão muito significativa das soluções arquitectónicas projectadas; em situações de restauro, o problema complica-se muito devido à necessidade muitas das pré-existências, o que envolve problemas de cotas e eventual depredação de elementos construtivos não estruturais existentes e com médio a elevado valor patrimonial.

6

CONCLUSÃO

6.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Os objectivos propostos no capítulo 1 foram desenvolvidos ao longo dos capítulos seguintes, sendo de destacar o desenvolvimento de processos de cálculo para estruturas mistas madeira-betão com ligação deformável entre os materiais, quando as estruturas estão submetidas à flexão. O estudo permitiu criar soluções de reforço de pavimentos antigos de forma a estes serem capazes de responder às actuais exigências de segurança, mantendo o aspecto inicial, e utilizando os materiais existentes. O recurso a este tipo de solução permite a manutenção de tectos que se encontram fixados no pavimento superior. A criação do programa informático permitiu conhecer melhor o comportamento dos pavimentos mistos madeira-betão, através dos muitos estudos efectuados, variando os parâmetros de cálculo e comparando os resultados obtidos.

As ligações madeira-betão podem ser divididas de acordo com o modo de ligação, a rigidez da ligação, a geometria da zona de ligação ou ainda a disposição do ligador. Relativamente ao modo de ligação, as ligações podem ser definidas como pontuais ou continuas, consoante o ponto de ligação. A rigidez da ligação permite classificar a ligação como rígida, como é o caso das colas, ou semi-rígida, como a maior parte dos sistemas de ligação pontual. A geometria da ligação é importante ao nível da transmissão de esforços permitindo, por exemplo, que o esforço de corte seja absorvido pelo betão e pela madeira. Alguns investigadores estudaram as vantagens de modificar a disposição dos ligadores, chegando a resultados que permitem concluir que a disposição dos ligadores influencia de forma directa o comportamento da ligação.

A falta de um regulamento específico para ligações entre madeira e betão obriga à adaptação das normas relativas a ligação madeira-madeira, como é o caso da EN26891 [58] e da adaptabilidade dos valores relativos ao módulo de deslizamento descrito no Eurocódigo 5 [53] para as ligações madeira-madeira.

Na pesquisa de mercado realizada há que referir a discrepância temporal na concepção e estudo dos sistemas bem como o conhecimento existente em cada fase de criação de cada ligador. Com a evolução do conhecimento, houve a necessidade de fazer evoluir os desenhos dos ligadores para assim dar resposta a novas exigências bem como à necessidade de evoluir para ligações mais económicas e de mais fácil execução. No mercado mundial, são encontradas diversas formas de ligação para sistemas mistos madeira-betão, devendo referir-se contudo que não se sentiu um interesse comparável ao que ocorre com outros tipos de ligação. É de referir que a própria informação técnica, em muitos casos, não é completa, o que origina, por parte dos projectistas, alguma dificuldade no uso desta forma de construção/reconstrução. De notar que, em países como a Itália e a Alemanha, o mercado é muito mais vasto que o mercado português, impulsionando assim, o recurso a este tipo de solução.

A ligação, como anteriormente referido, pode ser classificada como rígida ou semi-rígida. No caso de se optar por uma ligação rígida, o método de dimensionamento pode passar pela homogeneização dos materiais. Caso se opte por um sistema de ligação semi-rígida, o modelo de cálculo pode passar pelo modelo teórico apresentado no capítulo 4, ou pode-se optar pelo modelo apresentado por Ario Ceccotti (STEP2) [2], modelo este que é baseado no Anexo B do Eurocódigo 5[53]. O erro entre os modelos apresentados não é significativo, conforme o autor do modelo teórico o demonstra no seu estudo [7]. Este método sugere a utilização de equações simplificadas, baseadas no cálculo da rigidez efectiva à flexão e na distribuição das tensões obtidas em função da rigidez da ligação entre os dois materiais.

A fluência dos materiais tem um papel importante no comportamento a longo prazo da estrutura, uma vez que a variabilidade do parâmetro põe em causa a segurança da estrutura.

Para o processo de cálculo foi criado um programa informático baseado no modelo de cálculo apresentado no STEP2[2]. O programa de cálculo, além de permitir verificar a segurança da estrutura, permite determinar a sobrecarga máxima possível de aplicar à estrutura em segurança. Esta opção é talvez a mais necessária em reabilitação, uma vez que o vigamento é reaproveitado e apenas é possível variar o sistema de ligação e as características e espessura do betão.

A análise das propriedades mecânicas descrita no capítulo 5, indica que existem algumas diferenças entre o betão normal e o betão leve. No entanto, existe alguma controvérsia por parte de alguns autores, na caracterização de algumas características do betão leve, como por exemplo a fluência. No estudo do betão leve verificou-se que o decréscimo da resistência do betão leve não está associado ao decréscimo da sua massa volúmica, ou seja, que as classes de resistência são completamente independentes das classes da massa volúmica. A escolha da classe da massa volúmica 1.6 para o betão leve usado no estudo referido no capítulo 5, deve-se ao facto de não ser aceitável admitir classes de massa volúmica 1.0 e 1.2 para betões de resistência à compressão de 20 a 25 MPa. Esta escolha assenta no facto de um betão de elevada resistência apresentando também baixa massa volúmica, obriga à introdução de uma grande quantidade de ligante na amassadura e de superplastificantes que permitem reduzir a quantidade de água, provocando um aumento significativo do preço do betão leve.

O uso de betões leves de baixa massa volúmica em estruturas mistas madeira-betão deve ser ponderado, considerando o abaixamento da resistência à tracção do betão bem como o abaixamento do módulo de elasticidade. De referir que a resistência à tracção e o módulo de deslizamento têm um papel importante no dimensionamento da estrutura mista.

Concluindo, as principais vantagens de betão leve resultam da sua baixa massa volúmica, o que diminui os esforços na estrutura, sendo de salientar os ganhos de desempenho associados às características térmicas e acústicas que o betão leve apresenta bem como ao seu bom comportamento ao fogo.

6.2.DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Na sequência do estudo efectuado, algumas linhas de investigação despertaram interesse, não tendo sido possível desenvolvê-las atendendo ao âmbito limitado do trabalho.

O conhecimento do efeito da fadiga nos pavimentos mistos madeira-betão é uma matéria de especial interesse visto tratar-se de um aspecto decisivo na segurança a longo prazo deste tipo de estruturas. Tal como é considerada a fadiga em pontes, como referido no Eurocódigo 5 parte 2 [61], a fadiga pode ter um papel importante no comportamento e segurança de um sistema misto madeira-betão.

Uma vez que o Eurocódigo 5 [53] é vago quanto à precisão do comportamento dos diversos sistemas de ligação, é necessário continuar a campanha experimental levada a cabo por diversos investigadores por forma a serem criados métodos que prevejam, o mais rigorosamente possível, o comportamento do sistema de ligação. Só assim se conhece o comportamento rigoroso das soluções de pavimentos mistos madeira-betão, permitindo a comparação entre os diversos sistemas existentes.

Outro aspecto que adquire grande importância no modelo de cálculo de estruturas mistas madeira-betão é a fluência dos materiais. Estudar o modo como os materiais com diferentes valores de fluência se comportam quando se encontram num sistema misto constitui assim uma tarefa fundamental, uma vez que o comportamento a longo prazo dos materiais não é o mesmo quando trabalham em conjunto com outros materiais, ou quando trabalham isoladamente.

Os pavimentos mistos, ao nível térmico e acústico, apresentam melhorias quando comparados com pavimentos simples de madeira. Contudo, a variação das espessuras dos materiais constituintes do sistema, bem como a possibilidade de se optar por diferentes características dos materiais, torna difícil quantificar a melhoria incrementada pelo pavimento. É necessário proceder ao estudo específico das variações ocorridas, permitindo assim otimizar as soluções.

No que respeita às condições iniciais do pavimento, é necessário definir ensaios não destrutivos de forma a fornecer informação quantitativa mais rigorosa na avaliação das propriedades mecânicas dos elementos de madeira antiga.

É necessário proceder também ao estudo dos reforços do pavimento, mais concretamente na ligação à parede, garantindo a boa transmissão de esforços entre elementos estruturais. O reaproveitamento dos elementos de madeira estrutural poderá obrigar ao reforço de algumas vigas, através de elementos de aço ou madeira, devendo ser estudado o seu comportamento quando englobadas num sistema misto.

Um estudo importante refere-se ao comportamento sísmico dos pavimentos mistos madeira-betão visto este tratar-se de um conhecimento e exigência actuais e que devem ser garantidos pelo pavimento podendo haver a necessidade de se proceder ao seu reforço sísmico.

Por fim, devem ser estudadas formas de adequar os pavimentos às novas infra-estruturas (redes de abastecimento de água, redes de drenagem de águas residuais, gás, electricidade, entre outras) e deverão ser estudadas formas de melhoria no que se refere a conforto não estrutural, como por exemplo, segurança contra incêndios ou segurança na utilização, entre outros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Miotto, J., Dias, A. A., *Reforço e recuperação de estruturas de madeira*. Ciências exactas e tecnológicas, Londrina, v.27, n.º2, 2006, p.163-174.
- [2] Ceccotti, A. *Timber-concrete composite structures*. STEP-Timber Engineering 2, Almere Centrum Hout: 1995: E13/1–E13/12.
- [3] Dias, T. *Pavimentos de madeira em edifícios antigos. Diagnóstico e intervenção estrutural*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Reabilitação do Património Edificado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008.
- [4] Botelho Júnior, J. *Avaliação não destrutiva da capacidade resistente de estruturas de madeira de edifícios antigos*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Reabilitação do Património Edificado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2006.
- [5] Negrão J., Faria, J. Amorim. *Projecto de Estruturas de Madeira*. Publindústria, Edições Técnicas, Porto, 2009.
- [6] Dias, A. M. P. G. *Mechanical behaviour of timber-concrete joints*. PhD Thesis. Delft University Press, 2005.
- [7] Ros, J. Pardo. *Estructuras Mixtas de Hormigón - Madera Aplicadas a la Rehabilitación de Forjados*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, 1997
- [8] Van der Linden, M. L. R. *Timber-concrete composite floor systems*. PhD Thesis. Delft University Press, 1999.
- [9] Jorge, L. Carvalho. *Estruturas mistas madeira-betão com a utilização de betões de agregados leves*. Doutoramento em Engenharia Civil na Especialidade de Estruturas, FCTUC, Coimbra, 2005.
- [10] Pereira, S. *Avaliação experimental das principais propriedades mecânicas de peças estruturais em madeira antiga*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil - Especialização em Construções Cíveis, MIEC, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2009.
- [11] Carvalho, A., *Madeiras Portuguesas - Vol.I*. Instituto Florestal, Lisboa, 1996.
- [12] Benoit, Y., *Le guide des essences de bois*. CTBA, Paris, 1997.
- [13] Arriaga, F., Peraza, F., Esteban, M., Bobadilla, I., Garcia, F. *Intervención en estructuras de madera*. AITIM, Madrid, 2002, ISBN 84-87381-24-3.
- [14] Ceccotti, A. *Composite concrete-timber structures*. Progress in Structural Engineering and Materials, Ed. by Nethercot, D. et al., Vol. 4, N.º 3, (2002), 264-275.
- [15] Teixeira, J. J. L., *Descrição do sistema construtivo de casa burguesa do Porto entre os séculos XVII e XIX. Contributo para uma história da construção arquitectónica em Portugal*. Provas de aptidão pedagógica e capacidade científica. FAUP, Porto, 2004.
- [16] Segurado, J. E. S., *Trabalhos de carpintaria civil*. Biblioteca de Instrução Profissional. Livraria Bertrand, Lisboa, 1942.
- [17] Feio, A., *Inspection and Diagnosis of Historical Timber Structures: NDT Correlations and Structural Behaviour*. Tese de Doutoramento. Universidade do Minho, Guimarães, 2005.

- [18] Costa, A., Arêde, A., Guedes, J., Paupédio, E., *Metodologia de Intervenção no Património Edificado*. 2º Seminário. A Intervenção no Património, Práticas de Conservação e Reabilitação, Porto, 2005.
- [19] Costa, L. *Tipificação de soluções de reabilitação de pavimentos estruturais em madeira em edifícios antigos*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil - Especialização em Construções Cíveis, MIEC, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2009.
- [20] Dias, A., Jorge, L., *Estruturas mistas madeira-betão*. Seminário Internacional sobre Ligações Estruturais, UNL, 2007.
- [21] Schanzlin, J., Sigrist C., Kuhlmann, U., Enjily, V., Ceccotti, A., Aicher, S., *Timber-Concrete Floors*. Preliminary, incomplete draft version, Otto-Graf-Institute, University of Stuttgart, 2003.
- [22] Natterer, J., *A way to sustainable architecture by now technologies for engineered timber structures*. WCTE, 2004.
- [23] Gelfi, P., Giuriani, E. *Structural Studies, Repairs and Maintenance of Historical Buildings VI*. WITPress, 1999, p. 565 - 578.
- [24] Cruz, H., Richter, K. *Bonding Of Wood*. European Commission, 2007.
- [25] Pigozzo, J. César. *Estudos e aplicação de barras de aço coladas, como conectores em placas mistas de madeira e concreto para tabuleiros de pontes*. Doutoramento em Engenharia de Estruturas, EESC, Universidade de São Paulo, 2004.
- [26] Monteiro, V. *Madeira-chapa dobrada submetida à flexão simples*. Mestrado em Estruturas em Engenharia Civil, UFG, Goiânia, 2007.
- [27] Branco, J. M., Cruz, P. J., *Lajes Mistas de Madeira-Betão*. Número 15, Engenharia Civil, Universidade do Minho, 2002
- [28] Segundinho, P. Alcântara, Matthiesen, J. *Análise Teorico-Experimental de um tabuleiro Misto Madeira-Concreto composto por vigas circulares*. Mestrado em Estruturas em Engenharia Civil, FEIS-ENESP, São Paulo, 2005.
- [29] Dias, A. M. P. G., Kuilen, J. W. G., Cruz, H., Lopes, S., *Densified Veneer Wood For Notched Joints in Timber Concrete composite Structures*. WCTE, 2006.
- [30] Molina, J. C. *Análise do comportamento dinâmico da ligação formada por barras de aço coladas para tabuleiros mistos de madeira e concreto para pontes*. Mestrado em Estruturas em Engenharia Civil, EESC, São Paulo, 2008.
- [31] Kavaliauskas, S., Kvedaras, A. Kazimieras, Valiunas, B. *Mechanical Behaviour of timber-to-concrete connections with inclined screws*. Vilnius Gediminas Technical University, Journal of Civil Engineering and Management, Vol XIII, Nº. 3, 193-199, 2007.
- [32] Branco, J. Cruz P., Piazza, M. *Experimental analysis of laterally loaded nailed timber-to-concrete connections*.
- [33] Gelfi, P., Giuriani, E., Asce, M., Marini, A., *Stud Shear Connection Design for Composite Concrete Slab and Wood Beams*. Journal of structural Engineering, vol. 128, 2002.
- [34] Bastera, A., Calle, N., Gangas, E. Relea. *Estudio comparativo del comportamiento de forjados mixtos madera-hormigón y su simulación infografica por el MEF*. I jornadas de investigación en construcción, Madrid, 2005.

- [35] Van der Linden, M. L. R. *Timber-concrete composite beams*. Delft University of Technology / TNO Building & Construction Research, HERON, Vol. 44, N° 3, 1999
- [36] Kuhlmann, U., Michelfelder, B., *Grooves as shear-connectors in timber-concrete composite structures*. WCTE, 2004.
- [37] Aicher, S., Klock, W., Dill-Langer, G., Radovic, B., *Nails and nailplates as shear connectors for timber-concrete composite constructions*. Otto-Graf-Journal, Vol. 14, 2003, p.189 - 210.
- [38] Bathon, Leander, A., Graf, Markus. *A continous wood-concrete-composite system*. WCTE, Whistler, Canada, 2000, paper 8-2-2
- [39] Benitez, M., *Development and testing of timber/concrete shear connectors*. WCTE, Canada, 2000, paper 8-3-2
- [40] Branco, J., Fontes, A. C. *A Casa da Renda*. A madeira na construção, Tema 5- realizações, p. 879-886
- [41] Carrasco, E. Mantilha, Oliveira, A. Crespo. *Análise do comportamento de vigas mistas laminada colada e concreto*. Engenharia Civil, UM, Número 18, 2003.
- [42] Faggiano, B., Marzo, A., Mazzolani, F., Calado, L. *Analysis Rectangular-Shaped Collar Connectors for Composite Timber-Steel-Concrete Floors: Phush-Out Tests*. Vilnius Gediminas Technical University, Journal of Civil Engineering and Management, 2009, 15(1): 47- 58.
- [43] Faria, J. Amorim. *"Tecnologias de Sistemas Construtivos"*, Apontamentos da disciplina do MIEC – FEUP. FEUP, Porto, 2004. (disponível apenas para alunos da disciplina)
- [44] Gelfi, P., Giuriani, E. *Behaviour of stud connectors in wood-concrete composite beams*. Structural Studies, Repair and Maintenance of Historical Buildings VI: proceedings of the sixth international conference (Stremah 99), Dresden, Germany, Wit Press, 1999, p. 565-578.
- [45] Gelfi, P.; Giuriani E.; Marini A., *Stud Shear Connection Design for Composite Concrete Slab and Wood Beams*. ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 128, No 12, pag. 1544-1550, December 2002, ISSN 0733-9445.
- [46] Gurksnys, K., Kvedaras A., Kavaliauskas S. *Behaviour evaluation of "sleeved" connectors in composite timber-concrete floors*. Vilnius Gediminas Technical University, Journal of Civil Engineering and Management, Vol XI, N° 4, 277-282, 2005.
- [47] Gutkowski, R., Balogh, J., Brown K., Koike E., Etournaud, P. *Laboratory tests of composite wood-concrete beam and floor specimens*. WCTE, Whistler, Canada, 2000, paper 8-2-1.
- [48] Martitegui, F. A. *Intervención en estructuras de madera*. Ministerio de Fomento Espanha, Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera Y Corcho, 2002
- [49] Moreira, L. Nunes. *Dimensionamento à Flexão de Vigas Mistas Madeira/Concreto*. Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, 2001.
- [50] Segundinho, P. Alcântara, Matthiesen, J. *Análise experimental de um modelo reduzido de uma ponte mista de madeira-concreto utilizando vigas de madeira roliça*. IX encontro Brasileiro em madeiras e em estruturas de Madeira, Cuiabá, 2004.
- [51] Stojic, D., Cvetkovic, R. *Analysis of a Composite Timber-Concrete Structures According to the Limit States*. Facta Universitatis, Architecture and Civil Engineering, Vol. 2, N°3, 2001, pp. 169 - 184.

[52] Stojic, D., Cvetkovic, R. *Design of Connections on Composite Timber-Concrete Structures*. Facta Universitatis, Architecture and Civil Engineering, Vol. 4, Nº.2, 2006, p. 127 - 138.

NORMAS CONSULTADAS OU REFERIDAS

[53] EN 1995-1-1, *Eurocódigo 5: Projecto de estruturas de madeira. Parte 1-1: Regras comuns e regras para edifícios*. CEN, 2004.

[54]. IPQ. NP EN 206-1. *Betão. Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade*. 2005.

[55] EN 1992-1-1, *Eurocódigo 2: Projectos de estruturas para betão Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios*. CEN, 2004.

[56]. EN 338, *Structural Timber*. CEN, 2003.

[57]. IPQ NP 4305, *Madeira serrada de pinheiro bravo para estruturas. Classificação visual*. 1995.

[58]. EN 26891, *Timber structures - joints made with mechanical fasteners - General principles for the determination of strength and deformation characteristics*. CEN, 1991.

[59]. EN 13381, *Métodos de ensaio - Determinação da resistência ao fogo de elementos estruturais*. CEN, 2010.

[60]. EN 13891 *Tensional strapping - Guide to selection and use of tensional strapping*. CEN, 2003.

[61]. EN 1995-2. *Eurocódigo 5: Projecto de estruturas de madeira - Parte 2: Pontes*. CEN, 2004.

[62]. EN 912, *Ligações para madeira - Especificações de ligadores para madeira*. CEN, 1999.

[63]. EN 1990, *Eurocódigo 0: Bases para o projecto de estruturas*. CEN, 2002.

[64]. EN 1194, *Estruturas de madeira. Madeira lamelada-colada. Classes de resistência e determinação dos valores característicos*. CEN, 2002.

[65]. EN13271, *Timber fasteners. Characteristic load-carrying capacities and slip-moduli for connector joints*. CEN, 2001.

[66]. EN 1991-1-1, *Eurocódigo 1: Acções em estruturas – Parte 1-1: Acções gerais – pesos volúmicos, pesos próprios, sobrecargas em edifícios*. CEN, 2002.

[67]. EN 383, *Timber Structures - Test methods - Determination of embedment strength and foundation values for dowel type fasteners*. CEN, 2007.

[68]. EN 408, *Timber structures - Structural timber and glued laminated timber - Determination of some physical and mechanical properties*. CEN, 2003.

[69]. EN 409, *Timber structures - Test methods - Determination of the yield moment of dowel type fasteners*. CEN, 2009.

[70]. EN 1195, *Timber structures - Test methods - Performance of structural floor decking*. CEN, 2008.

[71]. EN 13271, *Timber fasteners - Characteristic load-carrying capacities and slip-moduli for connector joints*. CEN, 2001.

[72]. EN 14251, *Structural round timber - Test methods*. CEN 2003.

[73]. EN 14545, *Timber structures - Connectors - Requirements*. CEN, 2002.

- [74]. EN 14592, *Timber structures - Dowel-type fasteners - Requirements*. CEN, 2007.
- [75]. EN 14592, *Timber structures - Dowel-type fasteners - Requirements*. CEN, 2008.
- [76]. EN 1912, *Structural timber - Strength classes - Assignment of visual grades and species*. CEN, 2004.

PESQUISA BIBLIOGRÁFICA NA INTERNET

- [77] <http://www.tecnaria.com/legno/>, Fevereiro, 2010.
- [78] http://oak.arch.utas.edu.au/research/conc.enhance_timber.asp, Fevereiro, 2010.
- [79] http://www.bostik.pt/Produtos/colas_base_resina_epoxica.htm, Março, 2010.
- [80] http://www.sika.pt/5-39-sikadur_31_cf.pdf, Março, 2010.
- [81] <http://www.rotafix.co.uk/products-timber.htm>, Fevereiro, 2010.
- [82] <http://www.habitatlegno.it/en/hsb/>, Março, 2010.
- [83] <http://www.petercoxitalia.it/home.asp>, Fevereiro, 2010.
- [84] <http://www.rdb.it/VediMacro.phtml?IdPreview=1094>, Fevereiro, 2010.
- [85] http://www.sfsintec.biz/Internet/SFSintEN.nsf/PageID/System_VB, Março, 2010.
- [86] http://www.hbv-systeme.de/HBV-Systeme/index_e.htm, Março, 2010.
- [87] <http://www.crsoft.it/user/articoli/n5/legno-cls.asp>, Março, 2010.
- [88] http://www.woodbeton.it/idee_miglioramento.aspx, Março, 2010.
- [89] <http://www.archtp.info/main.php?langid=29&pageid=2>, Março, 2010.
- [90] <http://www.texsa.pt/>, Março, 2010.
- [91] <http://building.dow.com/europe/pt/>, Março, 2010.
- [92] http://www.biohabitat.pt/sites/biohabitat.pt/files/bht_thermo-hemp.pdf, Março, 2010.

ANEXO A

SISTEMAS DE LIGAÇÃO

1.1.SISTEMA DE LIGAÇÃO

No capítulo 3 são apresentados diferentes tipos de sistemas de ligação, encontrando-se estes divididos em sistemas de ligação tradicionais e sistemas de ligação comerciais. O uso da letra *T* antes do código do ligador indica que este é um sistema *tradicional*, enquanto a letra *C*, indica que este é *comercial*. No código de cada sistema de ligação, as restantes duas siglas correspondem ao modo de ligação, conforme é indicado no ponto 3.6.2 do capítulo 3.

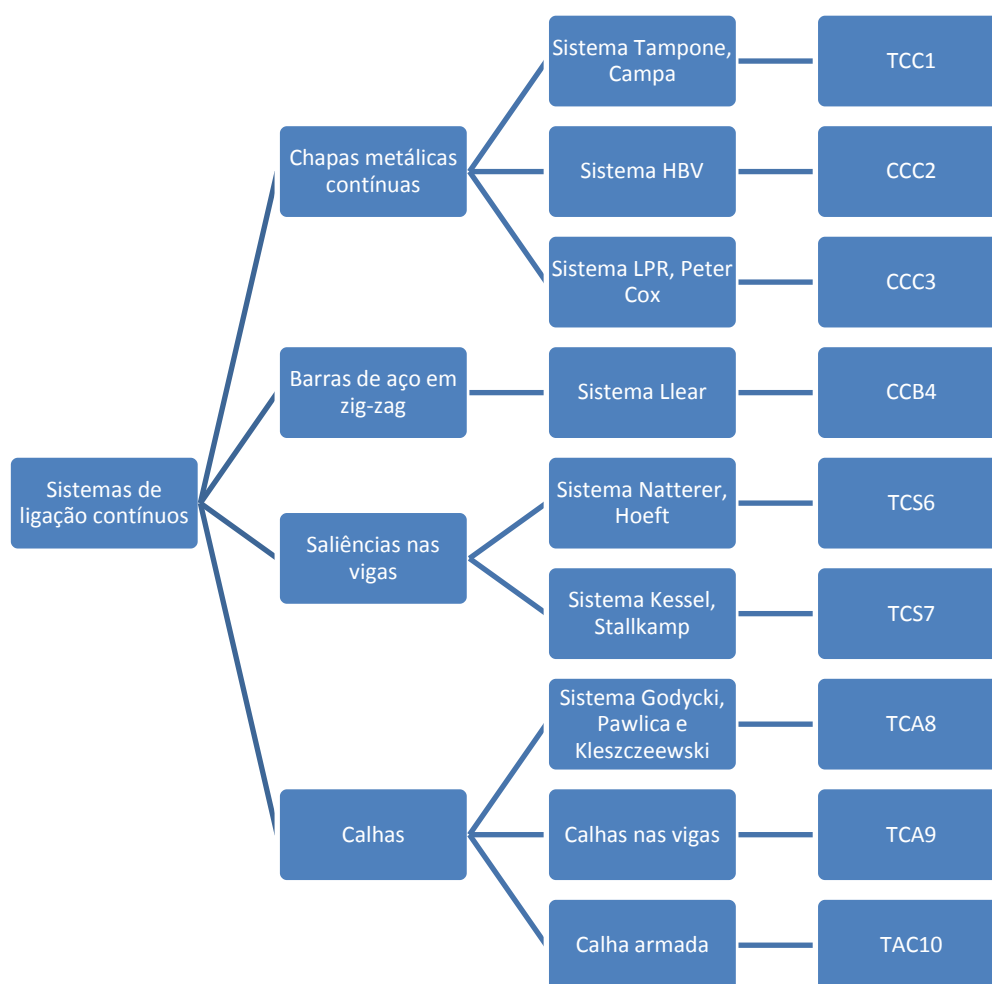


Fig. A.1 - Sistemas de ligação contínuos

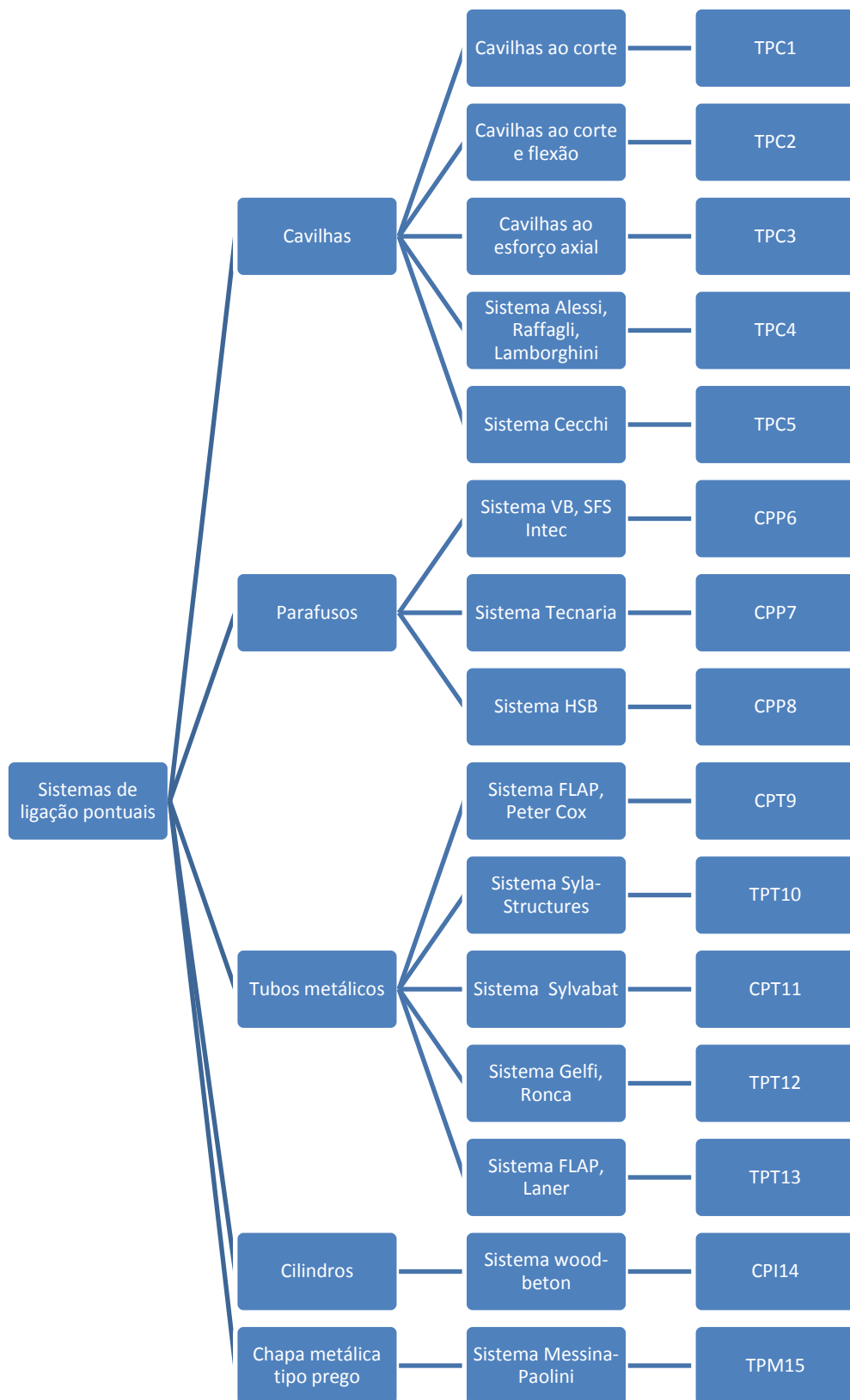


Fig. A.2 - Sistemas de ligação pontuais

1.1.1. SISTEMAS DE LIGAÇÃO CONTÍNUA

a) Capas metálicas contínuas

- **TCC1 - Sistema Tampone-Campa**

O sistema Tampone-Campa é um ligador contínuo. Neste sistema é introduzida uma placa de metal em altura e comprimento igual à viga de madeira. Esta está destinada a aumentar a resistência do elemento de madeira. As placas de metal, que podem ser introduzidas individualmente ou em conjunto, têm uma resistência à instabilidade lateral limitada sendo necessário associar essas placas com a estrutura de madeira para eliminar esse defeito. Esta lâmina vem dar uma maior resistência à compressão e tracção nas zonas onde é mais necessário. A disposição das placas ou parafusos pode variar dependendo das necessidades. Os parafusos são utilizados para evitar o escorregamento na zona de ligação madeira-aço e são utilizadas peças em aço para fazer a ligação aço-betão.

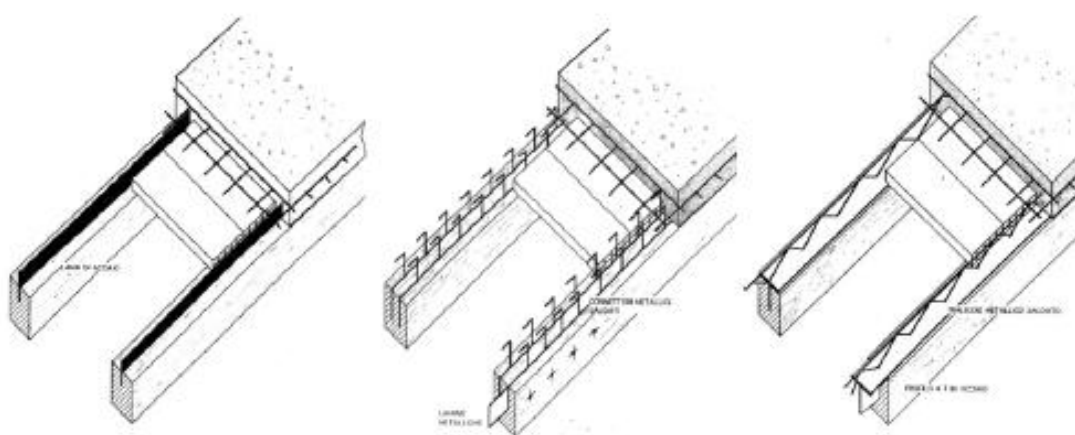


Fig. A.3 - Possíveis ligações no sistema Tampone-Campa

- **CCC2 - Sistema HBV**

Neste sistema, os ligadores HBV são embutidos nas vigas de madeira. O ligador consiste numa chapa metálica perfurada, criando uma espécie de rede metálica. Este tipo de padrão permite uma ligação ao betão mais resistente e mais coesa.

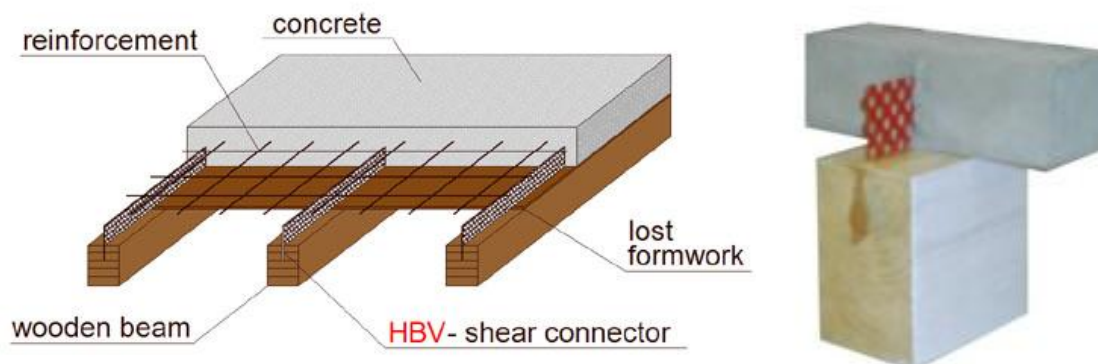


Fig. A.4 - Sistema HBV

Este sistema está patenteado segundo a norma alemã DIBT Z – 9.1 – 557. Esta norma contém informação sobre materiais, secções e valores de projecto. O DIBT (*Deutsches Institut für Bautechnik*) é um instituto que certifica tecnologias de acordo com as normas europeias.

- **CCC3 - Sistema LPR, Peter Cox**

Existe um sistema patenteado (LPR, Peter Cox) que utiliza como conector um perfil metálico com secção em V invertida, alveolado e perfurado para introduzir os parafusos de ligação na madeira. A colocação deste ligador é rápida e fácil no caso de vigas que tenham uma superfície medianamente nivelada. A solução típica tem uma altura de cerca de 10 cm e deixa um espaço vazio sobre o soalho que é preenchido por um material de isolamento térmico.

Este sistema permite a conservação dos elementos originais do pavimento obtendo uma solução sólida e agradável esteticamente.



Fig. A.5 - Sistema LPR, Peter Cox

b) Barras de aço em Zig-Zag

Também se encontram inserida nas vigas de madeira. Conseguem melhor ligação com a madeira e com o betão e é um ligador mais leve.

- **CCB4 - Sistema Llear, RDB**

O sistema “Llear” da empresa “RDB” consiste na aplicação de uma treliça em aço nas vigas e pela sobreposição de elementos cerâmicos e uma camada de betão armado. A ligação entre a madeira e o betão é feita pela treliça em aço, que está segura à madeira por colas epoxi. Os elementos cerâmicos resultam da extrusão de argilas ricas em óxido de ferro. Estes elementos levam uma pintura impermeabilizante que os impede de absorver água, mantendo a sua permeabilidade ao vapor.

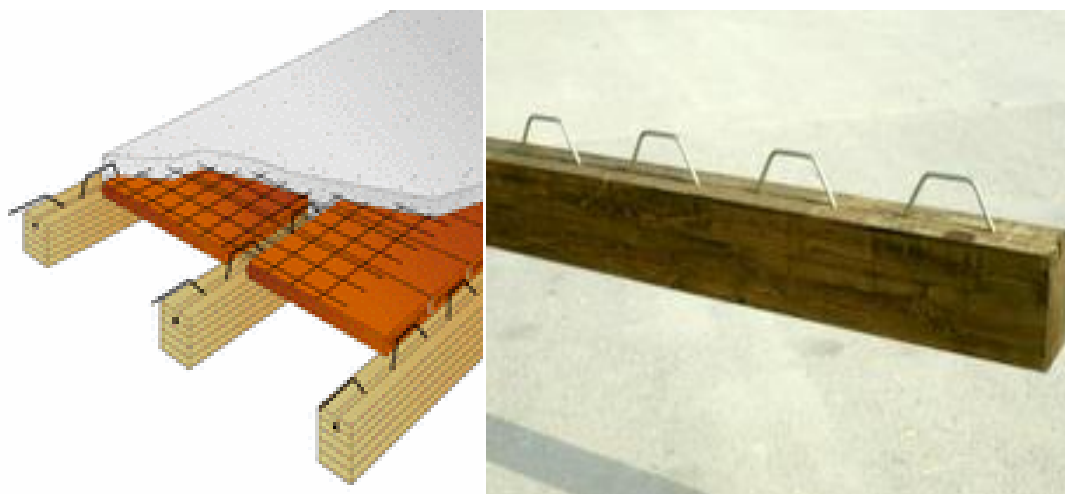


Fig. A.6 - Sistema Llear, RBD

Execução do sistema:

As vigas têm que estar espaçadas de 55 cm e têm que estar apoiadas nas paredes cerca de 10 cm. Deverá ser colocada uma protecção nas vigas de madeira durante a fase de instalação dos blocos e de betonagem.

Os elementos cerâmicos do sistema têm que estar postos lado a lado ao longo do comprimento da viga. Deve ser posta uma protecção para proteger os elementos cerâmicos da humidade derivada da betonagem. Deverá ser introduzido um elemento de suporte a meio vão para vãos até 5 m e dois para vãos superiores.



Fig. A.7 - Aplicação dos blocos cerâmicos e aspecto final do pavimento

Quando a colocação dos elementos cerâmicos estiver concluída é colocada uma rede metálica sobre as treliças e é efectuada a betonagem de modo a perfazer uma camada de betão com cerca de 4 a 5 cm.



Fig. A.8 - Betonagem do pavimento

Uma vez concluída a betonagem, a protecção das vigas deverá ser retirada.

c) Saliências nas vigas

Este tipo de solução para ligar a madeira ao betão aparece sempre complementado a outro tipo de ligador (pregos ou parafusos). Estes ligadores complementares permitem absorver os efeitos de separação entre os dois materiais, enquanto as saliências absorvem os esforços rasantes num sentido e não são capazes de transmitir pequenas tracções que se desenvolvem para que ambas as secções flictam igualmente.

- **TCS6** - Sistema Natterer, Hoeff

Neste sistema são formadas cunhas incrustadas na madeira de maneira a transmitir os esforços rasantes.



Fig. A.9 - Saliências nas vigas (Netterer, Hoefft)

- **TCS7** - Sistema Kessel, Stallkamp

São efectuados cunhas na madeira das vigas para transmitir o esforço rasante e são utilizados pregos para não ocorrer o desprendimento dos dois materiais.

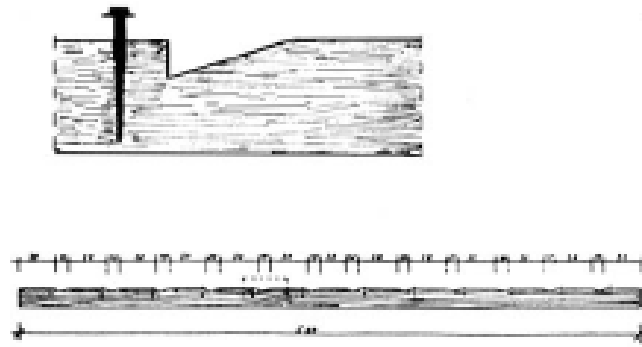


Fig. A.10 - Saliências nas vigas (Kessel, Stallkamp)

e) Calhas

- **TCA8** - Sistema Godycki, Pawlica e Kleszczewski

Neste sistema são criados ressaltos na superfície superior das vigas de madeira de maneira a transmitir o esforço rasante, complementando-se com a utilização de pregos em ambas as secções.

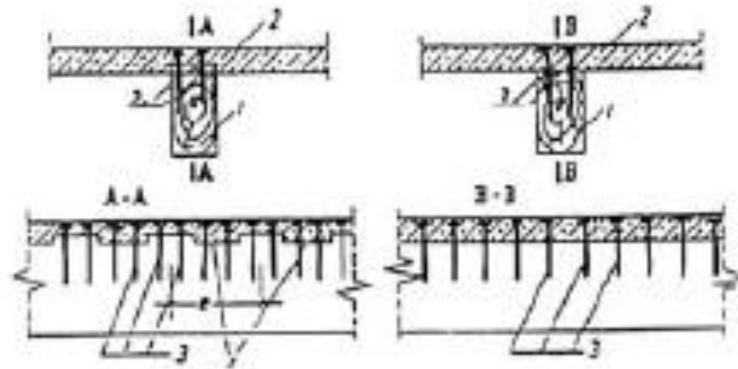


Fig. A.11 - Saliências nas vigas (Godycki, Pawlica e Kleszczewski)

- **TCA9** - Calha nas vigas

Outro sistema de ligação entre a madeira e o betão consiste em abrir calhas na madeira. Assim são criadas ranhuras onde o betão penetra de modo a transmitir os esforços rasantes através de pressão directa entre as superfícies de madeira e betão. A capacidade de carga deve ser comprovada no betão e na madeira. As ranhuras podem ser de secção circular ou rectangular. Para evitar o levantamento da camada de betão, colocam-se pregos de modo a fortalecer a união. Também se pode recorrer a sistemas em que se usa secções trapezoidais nestas ranhuras e a ligação entre os dois materiais é feita por barras previamente inseridas na madeira através de colas. Depois de colocado o betão estas barras são tensionadas de modo a aumentar o atrito entre os dois materiais.

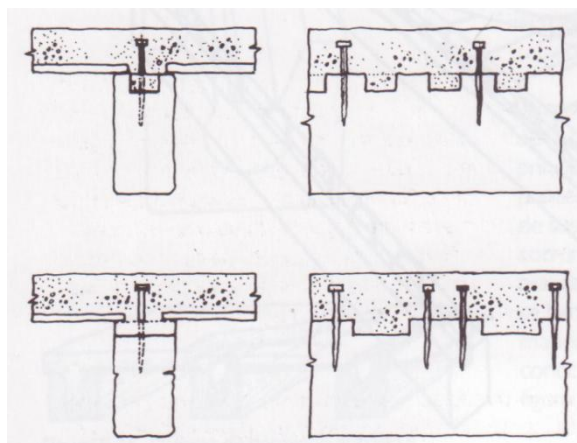


Fig. A.12 - Ligação por calhas complementada com pregos

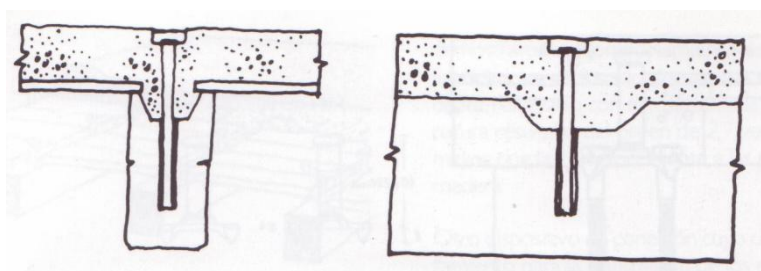


Fig. A.13 - Ligação por calhas com secção trapezoidal e calhas tensionadas

- **TCA10** - Calha armada

Existe uma outra técnica que consiste numa estrutura de betão armado com um recobrimento da madeira, simulando as vigas. Neste modelo é aberto na viga de madeira uma calha que vai albergar uma armadura de aço. O betão coloca-se nesta calha e faz-se uma camada superior de compressão. Neste caso a madeira não possui uma função estrutural, apenas decorativa.

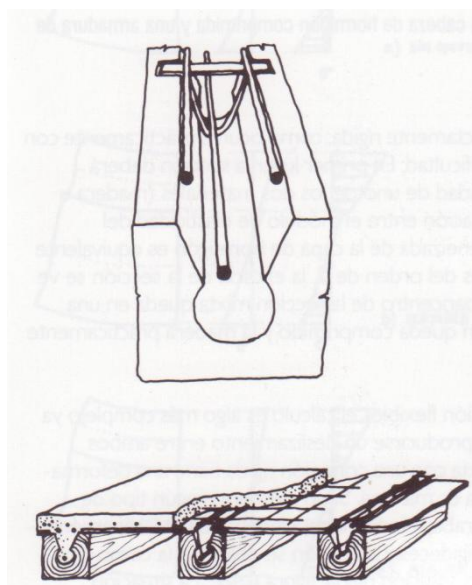


Fig. A.14 - Calha armada

1.1.2. SISTEMAS DE LIGAÇÃO PONTUAIS

a) Cavilhas

Os ligadores tipo cavilha são os elementos de fixação mais simples, como pregos, parafusos e barras de ferro dobradas. Podem ser instalados perpendicularmente ao plano de contacto entre o betão e a madeira, conferindo maior resistência ao corte. Segundo o Eurocódigo 5, este tipo de ligadores incrementam a capacidade de carga cerca de 20 % e cerca de 100% na rigidez da união. Caso exista uma camada intermédia, como por exemplo nos casos em que é aproveitado o soalho para cofragem, o ligador resiste ao corte e à flexão. Nestes casos as barras de ferro são dobradas nas pontas superiores, voltados para os apoios.

A ligação entre os ligadores metálicos e a madeira pode ser feita usando resinas epoxi ou enchendo a ranhura com argamassa de baixa retracção.

- **TPC1** - Cavilhas ao corte

Neste sistema o esforço rasante que se desenvolve na fibra de contacto entre a madeira e o betão é absorvido pela cavilha, que trabalha exclusivamente ao corte. Neste sistema o betão está em contacto directo com as vigas de madeira.

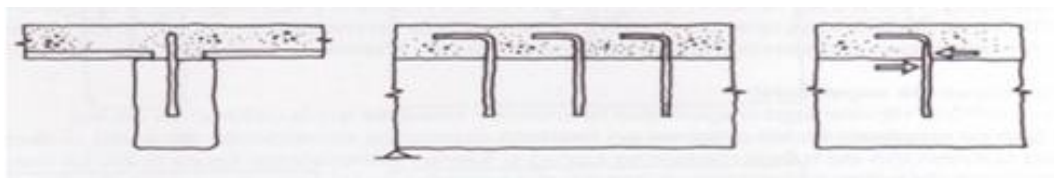


Fig. A.15 - Cavilhas resistentes ao corte

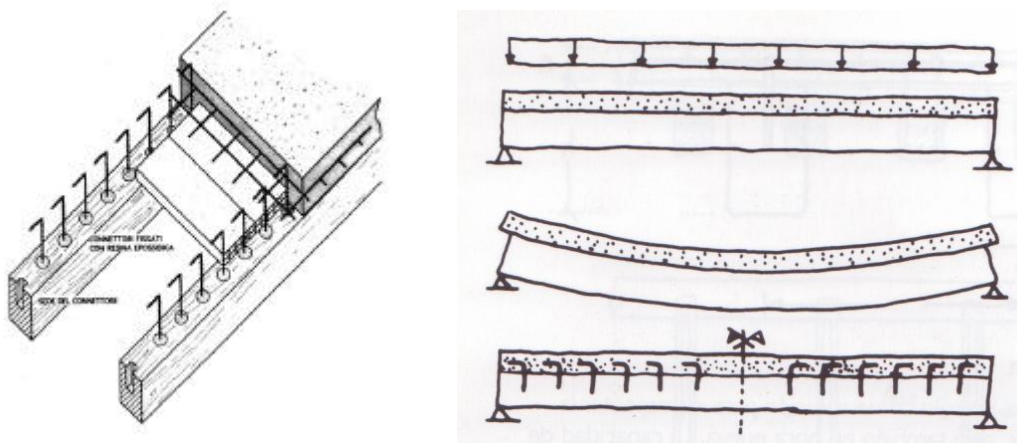


Fig. A.16 - Cavilhas resistentes ao corte

- **TPC2** - Cavilhas ao corte e flexão

Neste caso, as vigas de madeira e o betão não estão em contacto directo devido ao aproveitamento do soalho existente para fins de cofragem. O esforço rasante que se desenvolve nas duas fronteiras (betão - soalho e soalho - vigas de madeira) provoca esforços de corte e de flexão devido à sua excentricidade.

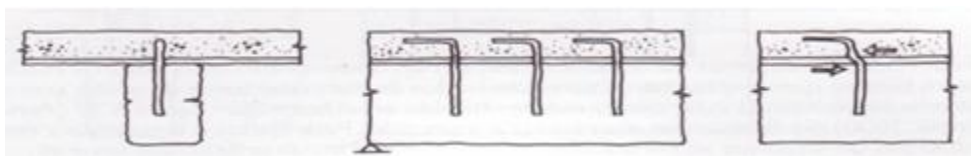


Fig. A.17 - Cavilhas ao corte e à flexão

- **TPC3** - Cavilhas ao esforço axial

Os ligadores em cavilha também podem ser dispostos obliquamente, ficando assim submetidos a esforços axiais. Caso se apliquem as cavilhas com inclinações opostas, o esforço rasante decompõe-se em duas forças, uma de compressão e outra de tracção.

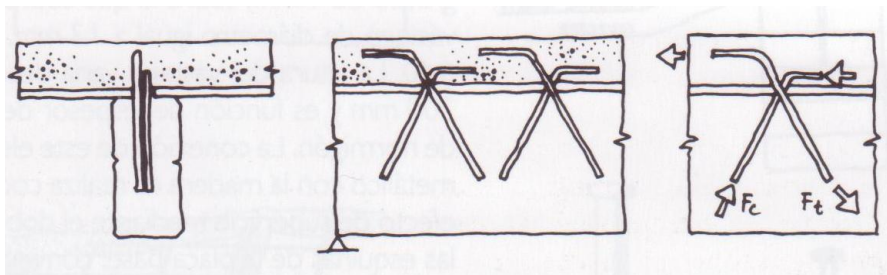


Fig. A.18 - Cavilhas ao esforço axial

- **TPC4** - Sistema Alessi, Raffagli, Lamborghini

Sistema formado por barras rectas de aço incrustadas na viga de madeira fixadas com uma resina sintética. A ligação ao betão é feita com duas barras dispostas longitudinalmente dentro da camada deste material.

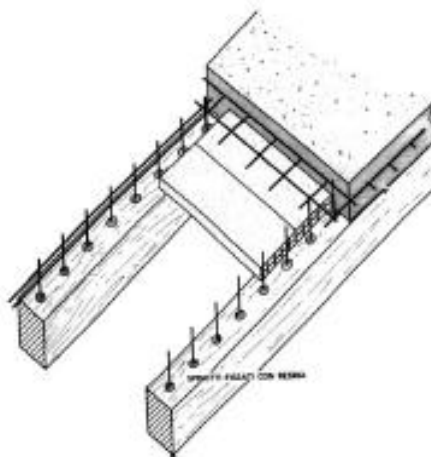


Fig. A.19 - Sistema Alessi, Raffagli, Lamborghini

- **TPC5** - Sistema Cecchi

Sistema de ligadores tipo barra que vão desde a viga à soleira. A laje está sobreposta a um conjunto de ripas que assentam sobre a viga. Existe uma zona intermédia do pavimento onde não existe betão. Os ligadores trabalham ao corte e à flexão.

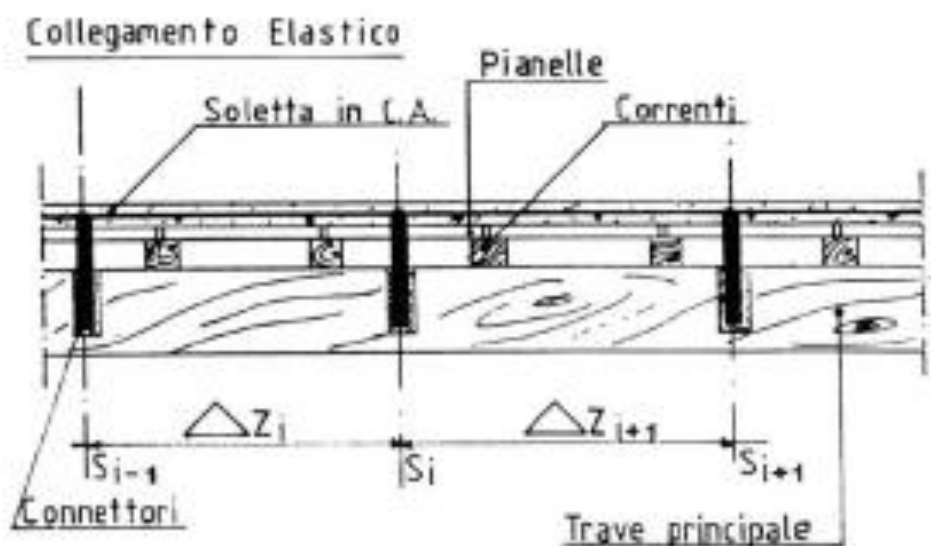


Fig. A.20 - Sistema tipo Cecchi

b) Parafusos

- **CPP6** - Sistema VB, SFS intec

O ligador metálico System VB da empresa SFS intec é um ligador que está parcialmente inserido na madeira, enquanto uma outra parte está solidarizada com o betão.



Fig. A.21 - System VB, SFS intec

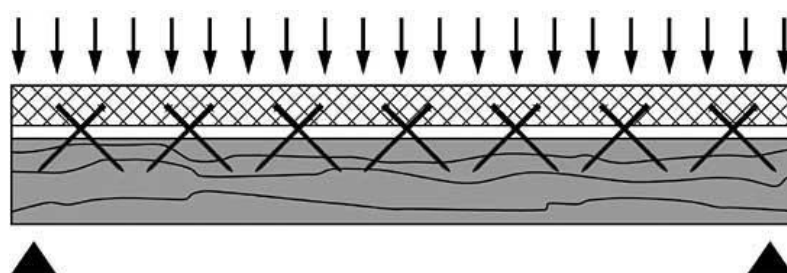


Fig. A.22 - Esquema de montagem dos ligadores SFS (disposição de cargas)

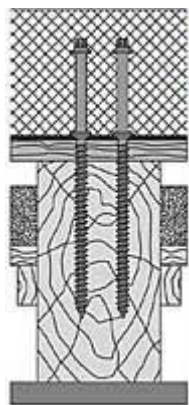


Fig. A.23 - Posicionamento de ligadores SFS

- **CPP7 - Sistema Tecnaria**

Este sistema de conexão consiste numa mistura entre ligadores de superfície e ligadores do tipo cavilha, elaborado pela empresa italiana Tecnaria.

A Tecnaria é uma empresa que fornece sistemas de ligação para lajes mistas madeira-betão e aço-betão. São sistemas usados para reforçar pavimentos existentes e em construções novas e podem ser aplicados directamente nas vigas ou no soalho.

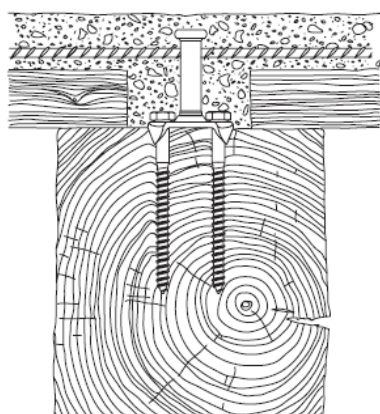


Fig. A.24 - Ligadores Tecnaria

Este tipo de ligador consiste numa placa quadrada de metal, de 4 mm de espessura, com 50 mm de lado. Dela sai um elemento metálico circular com 12 mm de espessura e varia em altura conforme a camada de betão onde se insere, variando entre os 40 a 200 mm. A ligação deste elemento à madeira é realizada através da dobragem e cravação das esquinas da placa base, convertendo-se num ligador dentado. Além disto, ainda são introduzidos dois parafusos de 8 mm de diâmetro e comprimento de 100 mm que funcionam como ligadores do tipo cavilha. A extremidade do parafuso junto à cabeça deste, apresenta uma forma cónica. Assim permite um ajuste muito mais eficaz com a placa base do ligador, conferindo muito mais rigidez ao sistema.

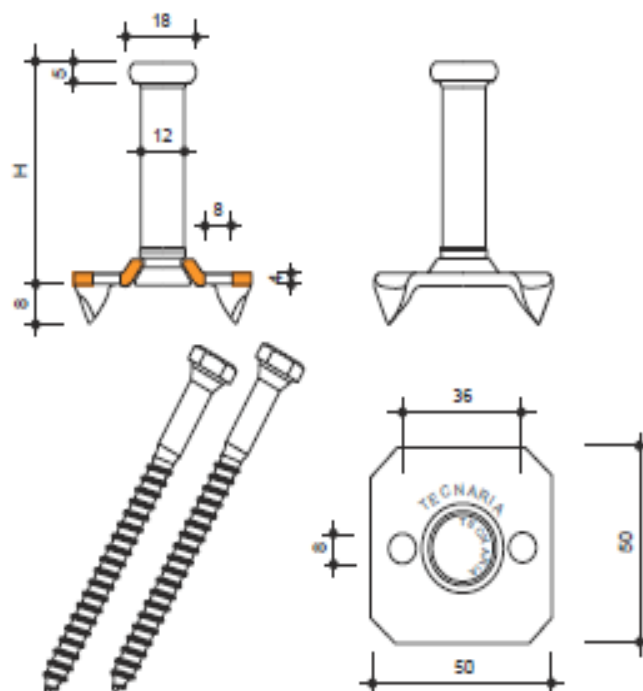


Fig. A.25 - Esquema do ligador Tecnaria

Execução do sistema:

Este tipo de conector não necessita de mão-de-obra qualificada. Deve ser aplicada uma camada impermeabilizadora debaixo dos ligadores antes de se proceder à fixação e depois à betonagem. Há 3 processos de aplicação dos ligadores:

- 1- Furar o soalho com uma perfuradora indicada para o efeito e com um diâmetro de furação adequado ao tipo de ligador usado. Este sistema não é recomendado para soalhos de madeira muito dura ou onde existam muitos pregos.



Fig. A.26 - Fixação dos ligadores

- 2- No segundo processo, as tábuas do soalho pregadas as vigas são cortadas por uma serra circular de maneira a criar um corredor contínuo sobre a viga. É um sistema recomendado para pavimentos novos. O mesmo também se aplica se o soalho for oco.



Fig. A.27 - Corredor contínuo com ligadores Tecnaria

- 3- Os ligadores são aplicados directamente sobre os lambris. É a opção mais recomendada para a reparação e reabilitação de estruturas existentes. Esta solução pode ainda ser complementada pela colocação de material isolante rígido o que aumenta a espessura do pavimento misto mas não adiciona peso. Aumenta o isolamento térmico e acústico e melhora as capacidades resistentes do pavimento.



Fig. A.28 - Isolamento em pavimentos com ligadores Tecnaria

O sistema Tecnaria foi testado segundo as normas UNI ENV 1995, UNI EN26891, UNI EN 28970, UNI EN 338 e UNI EN 380/00.

- **CPP8** - Sistema Habitat System Beton (HSB), Habitat Leno

Um sistema também muito utilizado é o ligador H.S.B. (Habitat System Beton) que emprega ligadores derivados dos ligadores de anel ou tubos metálicos, referidos mais à frente, com um elemento saliente de secção circular que fica inserido no betão. De maneira a evitar o arranque é introduzido um parafuso num pequeno orifício central.

A Habitat Legno produz este tipo de ligador para estruturas mistas de madeira-betão. Está patenteado especialmente para intervenções de consolidação de pavimentos em madeira antigos, mas também pode ser aplicado em construções novas.

Este sistema tem marcação CE e estão em conformidade com a norma DIN 1052-1.



Fig. A.29 - Ligadores H.S.B.

Execução do sistema:

Posicionamento de vigas: Numa primeira fase a viga é protegida por uma camada de polietileno. Esta camada tem que permanecer intacta durante o transporte e colocação em obra. Os ligadores têm que ficar seguros por um parafuso especial e dispostos segundo o dimensionamento efectuado. As vigas centrais devem estar apoiadas pelo menos 10 cm nos extremos onde assentam e a zona para o assentamento deve ser perfeitamente horizontal e normal.



Fig. A.30 - Posicionamento de vigas e montagem de ligadores

Camada intermédia: Os elementos que assentam sobre as vigas, nomeadamente o soalho de madeira devidamente restaurado (Lambris), devem estar apoiadas nestas em 2 cm sem interferir com os ligadores de maneira a permitir a perfeita ligação entre os diversos elementos.

Preparação do enchimento: O próximo passo consiste em posicionar a rede electrossoldada ($\varnothing 6$ 20x20). A seguir betona-se formando uma camada com a espessura pré definida. Deverá ser introduzido um reforço de maneira a limitar a flecha das vigas devido ao peso do betão, limitando-a a $1/300$ e só deverá ser retirada depois da secagem completa.



Fig. A.31 - Preparação da betonagem

Remoção das escoras: Depois de seco retirar todos os elementos de escoramento e cortar a película de polietileno

c) Tubos metálicos

- **CPT9** - Sistema FLAP, Peter Cox

Uma solução que confere maior rigidez ao sistema *LPR*, *Peter Cox*, consiste em utilizar ligadores de anel dentado ou tubos metálicos. Como corolário deste aumento de capacidade de carga, surge um maior distanciamento entre eles e um aumento da rigidez.

A empresa Peter Cox fornece ligadores metálicos em tubo, com fundo perfurado e soldado por dentro. A parte superior fica inserida dentro da camada de betão. O comprimento e diâmetro do ligador dependem das características das vigas e das solicitações. Este sistema é geralmente utilizado complementando o sistema *LPR*, executando a ligação das vigas secundárias necessárias para o controlo da deformação em vãos elevados.



Fig. A.32 - Ligadores em tubo metálico FLAP, Peter Cox

- **TPT10** - Sistema Sylva-structures

Este sistema é formado por tubos metálicos de 70 mm de diâmetro incrustados na viga de madeira previamente perfurada.

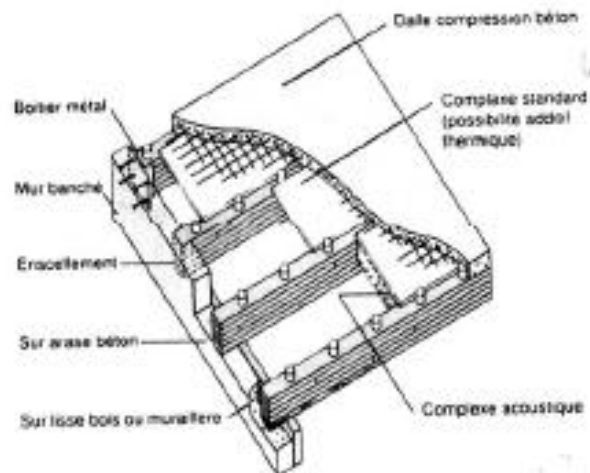


Fig. A.33 - Sistema Sylva-Structures

- **CPT11 - Sistema Sylvabat**

Sistema muito semelhante ao sistema Sylva-Structures, mas este é comercializável.



Fig. A.34 - Sistema Sylvabat

- **CPT12 - Sistema Gelfi, Ronca**

Os ligadores são formados por tubos metálicos de aço, com uma zona dentada para ajudar na fixação à madeira, pressionando-os contra esta dentro de um pequeno buraco para o efeito. Em alguns casos complementa-se o sistema usando colas epoxi ou com a colocação de chapas quadradas soldadas ao tubo.

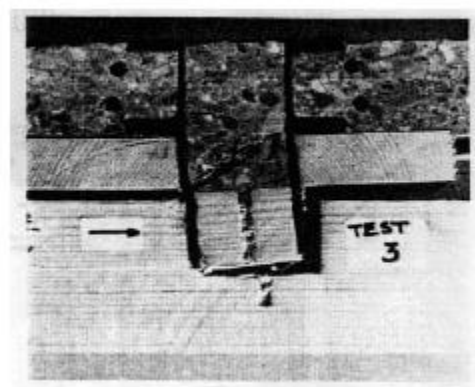
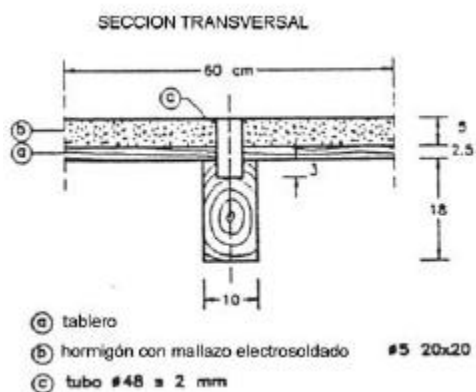


Fig. A.35 - Sistema Gelfi, Ronca

- **CPT13** - Sistema FLAP, Laner

Consiste num ligador metálico em forma de tubo em que uma extremidade é cortada formando dentes, complementados por um parafuso central e são colocados a seco, aparafusando.

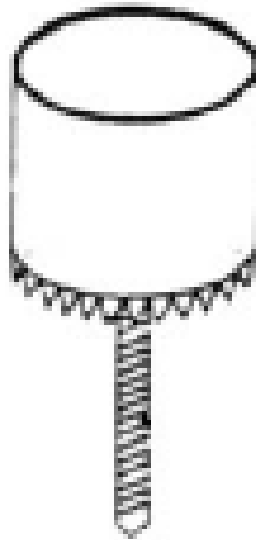


Fig. A.36 - Sistema FLAP, Laner

d) Cilindros

Com vista a conseguir um efeito similar aos ligadores metálicos, fazem-se uns orifícios de maior diâmetro do que no caso de barras de aço sobre a viga e são ocupados posteriormente por betão. Este sistema não utiliza nenhum tipo de ligador complementar.

- **CPC14** - Sistema Wood Beton

Este sistema permite o aproveitamento do soelho para fins de cofragem. O sistema de execução foi referido anteriormente.

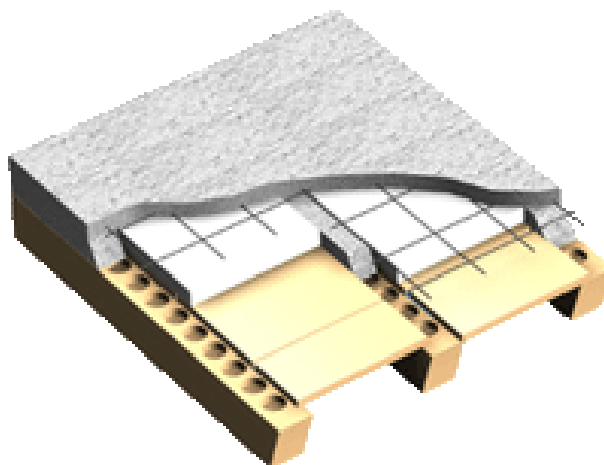


Fig. A.37 - Sistema Wood Beton

e) Chapa metálica tipo prego

- **TPM15** - Sistema Messina- Paolini

Os ligadores são formados por uma chapa metálica dobrada parcialmente, cravada na viga de madeira e fica inserida na camada de betão. O soalho que serve de cofragem não tem função estrutural mas, em determinadas condições, este pode vir a desempenhar funções resistentes.

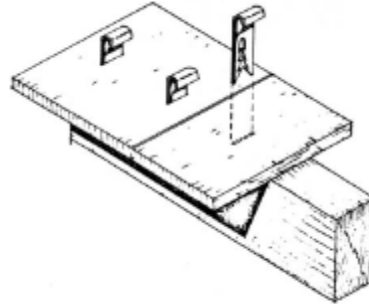


Fig. A.38 - Sistema Messina-Paolini

ANEXO B

SIMULAÇÃO DE SOBRECARGA ADMISSÍVEL

Pavimentos mistos madeira-betão

Geometria

Vão	6,4 m	
Contraflecha	0 mm	
Espessura do soalho original	25 mm	3 KN/m ³
Espessura do isolamento	0 mm	0,3 KN/m ³
Espessura da laje de betão	50 mm	
Espaçamento entre vigas	400 mm	
Altura das vigas de madeira	200 mm	
Largura das vigas de madeira	100 mm	
Cofragem vertical	20 mm	
Largura efectiva da viga	60 mm	
Altura de betão sobre a viga (Soalho+isolamento)	25 mm	
Flecha no instante inicial	1/ 300	
Flecha a longo prazo	1/ 250	
Flecha+contraflecha a longo prazo	1/ 150	

Acções aplicadas

Permanentes

Camada final	--	KN/m ²
Pavimento	--	KN/m ²
Divisórias	--	KN/m ²
Outras	--	KN/m ²

Variáveis

Sobrecarga a considerar na verificação	--	KN/m ²
Sobrecarga admissível com limitação de deformação		2,00 KN/m ²
Limitação imposta por:		Serviço flecha final
Sobrecarga admissível com limitação de deformação		3,32 KN/m ²
Limitação imposta por:		Tempo infinito madeira
	Flecha inicial	14,78 mm
Não considerando a limitação		L/ 433
imposta pelo EC5 relativamente à	Flecha final	34,98 mm
flecha		L/ 183
ψ ₂		0,3
Classe de serviço		Classe 1
Classe de duração		Acção de média duração
k _{mod}		0,80
k _{def}		0,60
Factor de segurança parcial		
Acções permanentes		1,35
Acções variáveis		1,5

Materiais

Betão

Classe	C25/30
Fluência	2,25
fck	25 MPa
fck,cube	30 MPa
fcm	30 MPa
fctm	2,6 MPa
Ecm	31 GPa
Pmean	25 KN/m3

Madeira

Classe	C18
--------	-----

Propriedades resistentes

Flexão	18 MPa
Tracção	11 MPa
Tracção	0,5 MPa
Compressão	18 MPa
Compressão	2,2 MPa
Corte	2 MPa

Propriedades de rigidez

Módulo de elasticidade	9 GPa
M. de elast. (5ºpercentil)	6 GPa
Módulo E	0,3 GPa
Módulo de distorção	0,56 GPa

Densidade

Densidade	320 Kg/m3
Densidade média	380 Kg/m3

Ligador

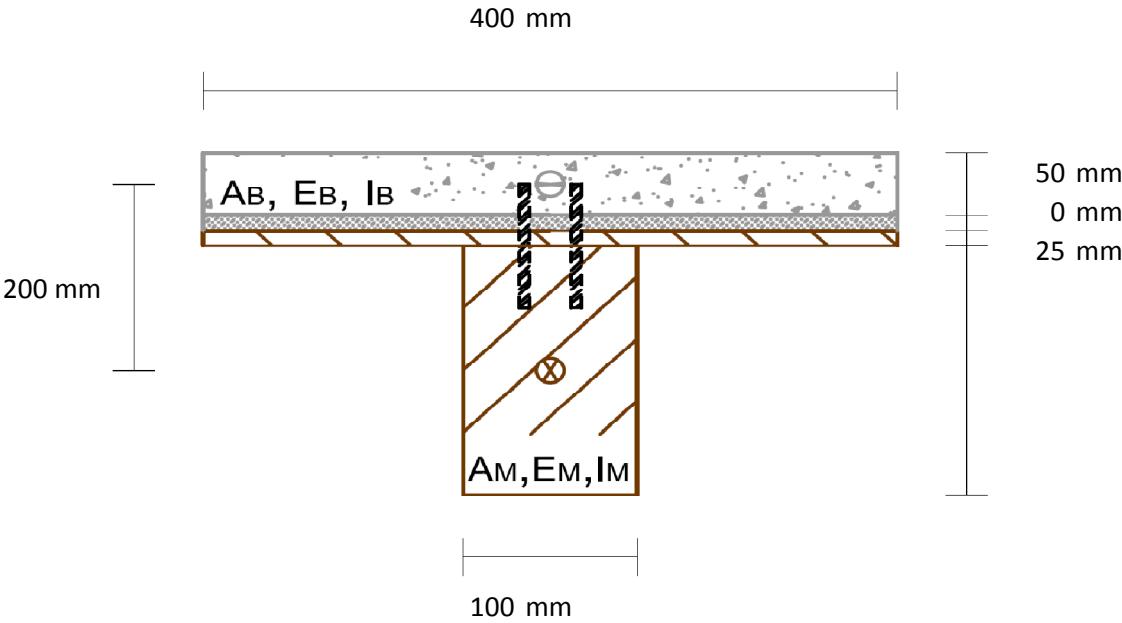
Tipo de ligador	Cavilhas
Diâmetro	12 mm
kser	7730 N/mm
Ku	5153 N/mm
Fd	8363 N

Espaçamento entre ligadores

smáx	100 mm
smin	100 mm
seq	100 mm

Pavimentos mistos madeira-betão

Esquema:



ANEXO C

SIMULAÇÃO DE SEGURANÇA NAS ZONAS CORRENTES

Pavimentos mistos madeira-betão

Geometria

Vão	6,4 m	
Contraflecha	0 mm	
Espessura do soalho original	25 mm	3 KN/m ³
Espessura do isolamento	0 mm	0,3 KN/m ³
Espessura da laje de betão	50 mm	
Espaçamento entre vigas	400 mm	
Altura das vigas de madeira	200 mm	
Largura das vigas de madeira	100 mm	
Cofragem vertical	20 mm	
Largura efectiva da viga	60 mm	
Altura de betão sobre a viga (Soalho+isolamento)	25 mm	
Flecha no instante inicial	1/ 300	
Flecha a longo prazo	1/ 250	
Flecha+contraflecha a longo prazo	1/ 150	

Acções aplicadas

Permanentes

Camada final	0,10 KN/m ²
Pavimento	0,00 KN/m ²
Divisórias	0,15 KN/m ²
Outras	0,03 KN/m ²

Variáveis

Sobrecarga a considerar na verificação		3,00 KN/m ²
Sobrecarga admissível com limitação de deformação	--	KN/m ²
Limitação imposta por:	--	
Sobrecarga admissível com limitação de deformação	--	KN/m ²
Limitação imposta por:	--	
	Flecha inicial	-- mm
Não considerando a limitação	L/ --	
imposta pelo EC5 relativamente à	Flecha final	-- mm
flecha	L/ --	
ψ ₂		0,3
Classe de serviço		Classe 1
Classe de duração		Acção de média duração
k _{mod}		0,80
k _{def}		0,60
Factor de segurança parcial		
Acções permanentes		1,35
Acções variáveis		1,5

Materiais

Betão

Classe	C25/30
Fluência	2,25
fck	25 MPa
fck,cube	30 MPa
fcm	30 MPa
fctm	2,6 MPa
Ecm	31 GPa
Pmean	25 KN/m3

Madeira

Classe	C18
--------	-----

Propriedades resistentes

Flexão	18 MPa
Tracção	11 MPa
Tracção	0,5 MPa
Compressão	18 MPa
Compressão	2,2 MPa
Corte	2 MPa

Propriedades de rigidez

Módulo de elasticidade	9 GPa
M. de elast. (5ºpercentil)	6 GPa
Módulo E	0,3 GPa
Módulo de distorção	0,56 GPa

Densidade

Densidade	320 Kg/m3
Densidade média	380 Kg/m3

Ligador

Tipo de ligador	Cavilhas
Diâmetro	12 mm
kser	7730 N/mm
Ku	5153 N/mm
Fd	8363 N

Espaçamento entre ligadores

smáx	100 mm
smin	100 mm
seq	100 mm

Verificação a curto prazo

Verificação ao corte

$\tau_{\text{máx}}$	0,68 N/mm ²	
$f_{v,d}$	1,23 N/mm ²	ok

Verificação da ligação

F_d	4,35 KN	
R_d	8,36 KN	ok

Tensões Normais

Betão

τ_1	3,48 N/mm ²
$\tau_{m,1}$	4,26 N/mm ²

Madeira

τ_2	3,48 N/mm ²
$\tau_{m,2}$	4,94 N/mm ²

Verificação dos materiais

Betão

$\tau_{c,\text{topo}}$	7,73 N/mm ²	<	16,67 ok
$\tau_{c,\text{base}}$	0,78 N/mm ²	<	1,73 ok

Madeira	0,96	<	1,00 ok
---------	------	---	---------

Verificação a longo prazo

Tensões Normais

Betão

τ_1	3,48 N/mm ²
$\tau_{m,1}$	3,17 N/mm ²

Madeira

τ_2	3,48 N/mm ²
$\tau_{m,2}$	5,22 N/mm ²

Verificação dos materiais

Betão

$\tau_{c,\text{topo}}$	6,64 N/mm ²	<	16,67 ok
$\tau_{c,\text{base}}$	0,31 N/mm ²	<	1,73 ok

Madeira	0,99	<	1,00 ok
---------	------	---	---------

Deformação

Flecha no instante inicial	14,65 mm	<	21,33 mm
Flecha a longo prazo	34,67 mm	>	25,60 mm
Flecha+contraflecha a longo prazo	@@@ mm	>	@@@ mm

Verificações gerais

Betão

Compressão Betão resiste à compressão imposta

Tracção Betão resiste à tracção imposta

Madeira

Aceite relativamente ao corte

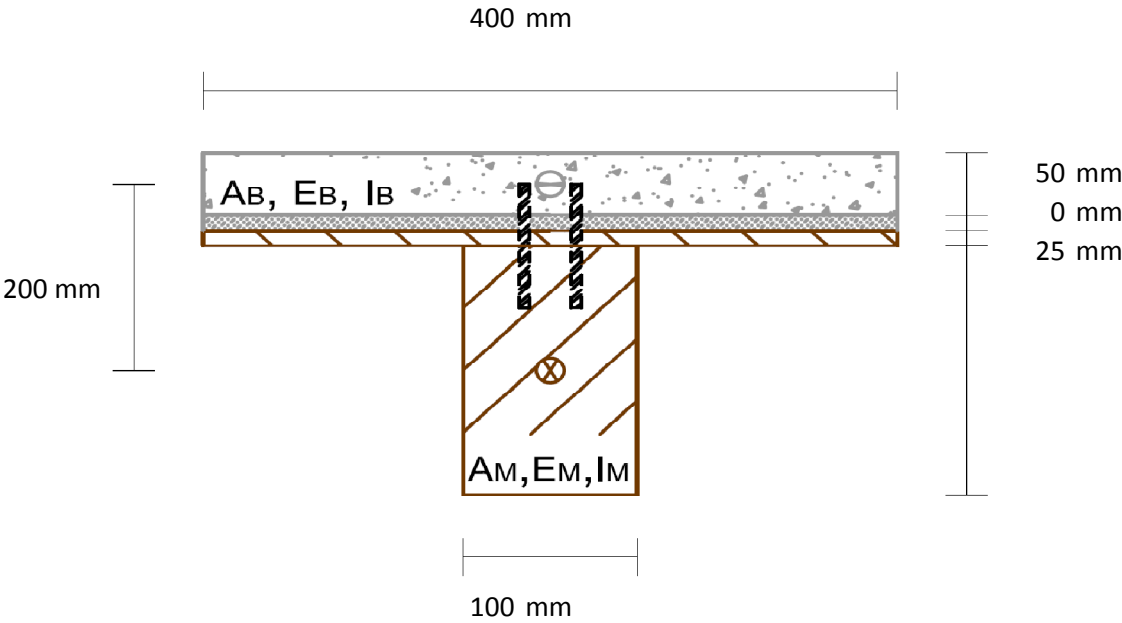
Classe da madeira aceite

Tipo de ligação

Encontra-se de acordo com os regulamentos

Pavimentos mistos madeira-betão

Esquema:



ANEXO D

SIMULAÇÃO DE SEGURANÇA NAS ZONAS ESPECIAIS

Pavimentos mistos madeira-betão

Geometria

Vão	6,4 m	
Contraflecha	0 mm	
Espessura do soalho original	25 mm	3 KN/m ³
Espessura do isolamento	0 mm	0,3 KN/m ³
Espessura da laje de betão	50 mm	
Espaçamento entre vigas	400 mm	
Altura das vigas de madeira	200 mm	
Largura das vigas de madeira	100 mm	
Cofragem vertical	20 mm	
Largura efectiva da viga	60 mm	
Altura de betão sobre a viga (Soalho+isolamento)	25 mm	
Flecha no instante inicial	1/ 300	
Flecha a longo prazo	1/ 250	
Flecha+contraflecha a longo prazo	1/ 150	

Acções aplicadas

Permanentes

Camada final	0,50 KN/m ²
Pavimento	0,00 KN/m ²
Divisórias	0,15 KN/m ²
Outras	0,00 KN/m ²

Variáveis

Sobrecarga a considerar na verificação		2,00 KN/m ²
Sobrecarga admissível com limitação de deformação	--	KN/m ²
Limitação imposta por:	--	
Sobrecarga admissível com limitação de deformação	--	KN/m ²
Limitação imposta por:	--	
Não considerando a limitação imposta pelo EC5 relativamente à flecha	Flecha inicial	-- mm
	L/ --	
	Flecha final	-- mm
	L/ --	
ψ ₂		0,3
Classe de serviço		Classe 1
Classe de duração		Acção de média duração
k _{mod}		0,80
k _{def}		0,60
Factor de segurança parcial		
Acções permanentes		1,35
Acções variáveis		1,5

Materiais

Betão

Classe	C25/30
Fluência	2,25
fck	25 MPa
fck,cube	30 MPa
fcm	30 MPa
fctm	2,6 MPa
Ecm	31 GPa
Pmean	25 KN/m3

Madeira

Classe	C18
--------	-----

Propriedades resistentes

Flexão	18 MPa
Tracção	11 MPa
Tracção	0,5 MPa
Compressão	18 MPa
Compressão	2,2 MPa
Corte	2 MPa

Propriedades de rigidez

Módulo de elasticidade	9 GPa
M. de elast. (5ºpercentil)	6 GPa
Módulo E	0,3 GPa
Módulo de distorção	0,56 GPa

Densidade

Densidade	320 Kg/m3
Densidade média	380 Kg/m3

Ligador

Tipo de ligador	Cavilhas
Diâmetro	12 mm
kser	7730 N/mm
Ku	5153 N/mm
Fd	8363 N

Espaçamento entre ligadores

smáx	100 mm
smin	100 mm
seq	100 mm

Verificação a curto prazo

Verificação ao corte

$\tau_{\text{máx}}$	0,58 N/mm ²	
$f_{v,d}$	1,23 N/mm ²	ok

Verificação da ligação

Fd	3,73 KN	
Rd	8,36 KN	ok

Tensões Normais

Betão

τ_1	2,98 N/mm ²
$\tau_{m,1}$	3,65 N/mm ²

Madeira

τ_2	2,98 N/mm ²
$\tau_{m,2}$	4,24 N/mm ²

Verificação dos materiais

Betão

$\tau_{c,\text{topo}}$	6,64 N/mm ²	<	16,67 ok
$\tau_{c,\text{base}}$	0,67 N/mm ²	<	1,73 ok

Madeira	0,82	<	1,00 ok
---------	------	---	---------

Verificação a longo prazo

Tensões Normais

Betão

τ_1	2,98 N/mm ²
$\tau_{m,1}$	2,72 N/mm ²

Madeira

τ_2	2,98 N/mm ²
$\tau_{m,2}$	4,48 N/mm ²

Verificação dos materiais

Betão

$\tau_{c,\text{topo}}$	5,70 N/mm ²	<	16,67 ok
$\tau_{c,\text{base}}$	0,26 N/mm ²	<	1,73 ok

Madeira	0,85	<	1,00 ok
---------	------	---	---------

Deformação

Flecha no instante inicial	12,76 mm	<	21,33 mm
Flecha a longo prazo	30,21 mm	>	25,60 mm
Flecha+contraflecha a longo prazo	@@@ mm	>	@@@ mm

Verificações gerais

Betão

Compressão Betão resiste à compressão imposta

Tracção Betão resiste à tracção imposta

Madeira

Aceite relativamente ao corte

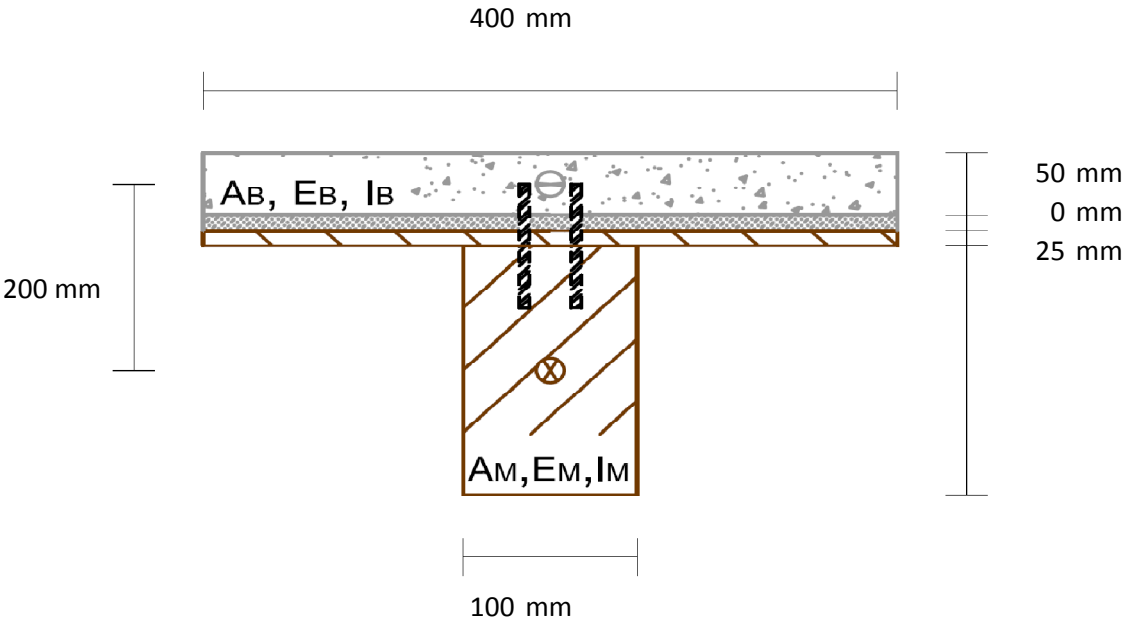
Classe da madeira aceite

Tipo de ligação

Encontra-se de acordo com os regulamentos

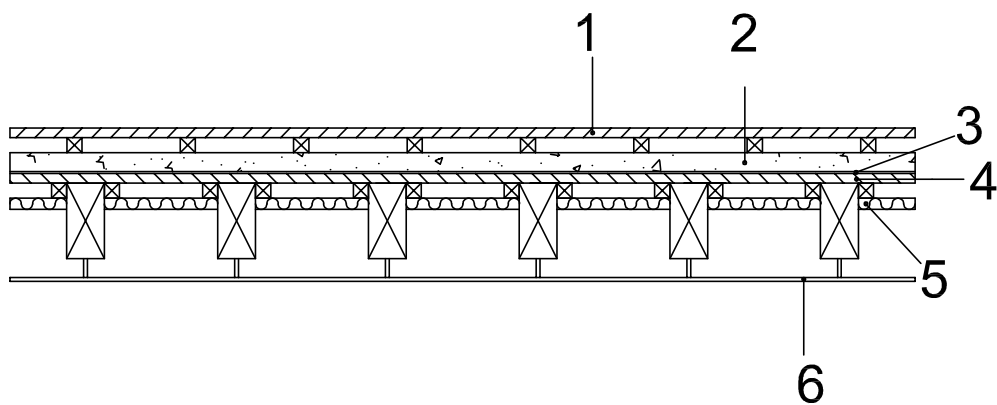
Pavimentos mistos madeira-betão

Esquema:



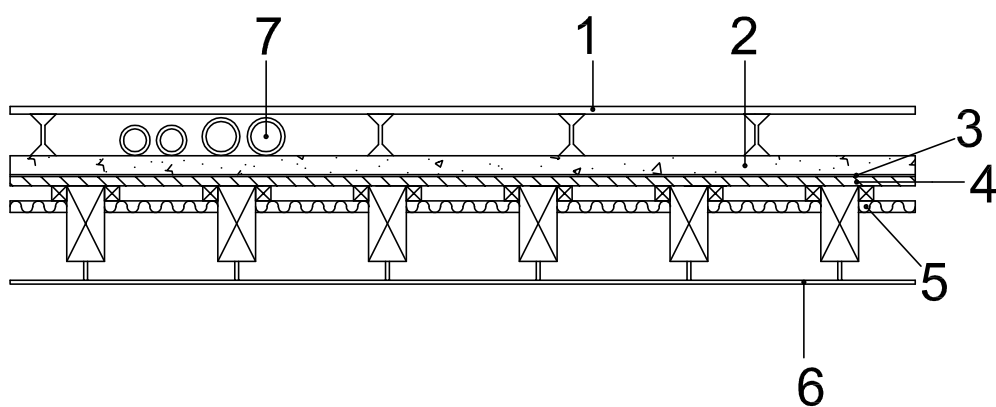
ANEXO E

PORMENORES CONSTRUTIVOS



1. Revestimento de piso (acabamento)
2. Laje de betão
3. Membrana impermeabilizante
4. Soalho (cofragem)
5. Isolamento (acústico e/ou térmico)
6. Revestimento de tecto

Corte de pormenorização:
Pavimento em zonas correntes
Esc. 1/20



1. Revestimento de piso (acabamento)
2. Laje de betão
3. Membrana impermeabilizante
4. Soalho (cofragem)
5. Isolamento (acústico e/ou térmico)
6. Revestimento de tecto
7. Tubagens

Corte de pormenorização:
Pavimento em zonas especiais
Esc. 1/20