



**Universidade Católica Portuguesa  
Faculdade de Engenharia**

**DESEMPENHO TEÓRICO E REAL DE VIGAMENTOS DE  
MADEIRA**

**Vânia das Dores Charrua Baião**

**Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Civil**

**Júri**

Prof. Doutor Manuel Barata Marques (Presidente)

Prof. Eng. João Augusto da Silva Appleton (Co-orientador)

Doutora Helena Maria Pires Cruz

**Agosto 2014**



## RESUMO

O presente trabalho tem como principal objetivo avaliar o desempenho teórico e real de vigamentos de madeira em edifícios antigos.

Atualmente existe um grande número de edifícios antigos que não cumprem as exigências regulamentadas segundo o Eurocódigo 5 para vigamentos de madeira. No entanto, alguns desses edifícios apresentam um bom desempenho real. Propõe-se, então, com esta dissertação fazer a comparação entre o desempenho teórico e o desempenho real de um determinado pavimento, de forma a perceber quais as variáveis que podem estar presentes nas diferenças encontradas.

A avaliação de estruturas de madeira requer conhecimentos específicos do material em causa. A madeira possui características muito próprias, resultado da sua origem natural. Pretende-se assim fazer uma análise dessas características, físicas e mecânicas, bem como os principais fatores que condicionam o seu comportamento. No entanto, o comportamento da madeira poderá ser melhorado, ainda numa fase inicial, através de produtos preservadores, os quais têm como principal objetivo a proteção do elemento. Quando a madeira apresenta um estado de degradação avançado, em que a estabilidade do elemento ou da estrutura esteja comprometida, torna-se necessário proceder à identificação de anomalias e posterior intervenção, utilizando a técnica de consolidação mais adequada.

Apesar da madeira possuir inúmeras características que a tornam um ótimo material estrutural, ainda existe uma enorme falta de informação desta, bem como das técnicas de construção tradicionais que permitem uma melhor interpretação das estruturas. Assim, as intervenções de reabilitação em estruturas de madeira nem sempre são as mais adequadas, levando por vezes à demolição de estruturas em bom estado de serviço.

**Palavras-chave:** Madeira, Vigas de Madeira, Desempenho teórico, Desempenho real, Ensaio de carga.



## ABSTRACT

The main objective of this monograph is to evaluate the theoretical and actual performance of timber beams in old buildings.

Currently there are a large number of old buildings that do not meet the specified requirements regulated by the Eurocode 5 for timber beams. However, some of these buildings reveal an overall good performance. Therefore, in this monograph, a comparison between the theoretical performance and the actual performance of a given floor is proposed, in an effort to uncover which variables may be present in the different results.

The assessment of timber structures requires a degree of expertise regarding the materials. Due to its natural origin, timber has very specific characteristics. The goal is to analyse these characteristics, physical and mechanical, as well as the main factors that influence their behavior. However, the behavior of timber can be improved, at an early stage, through the use of preserving chemicals, which have protection purposes. When an advanced state of decay is presented, where the stability of the element or even the structure is impaired, it is necessary to identify the anomalies and subsequent intervention using the most suitable consolidation technique.

Timber has numerous characteristics which make it a great structural material, still, there is a great lack of information regarding it, as well as traditional construction techniques that allow a better interpretation of the structures. Thus, interventions in the rehabilitation of timber structures are not always the most appropriate, often leading to the demolishing of structures that still present a good service state.

**Keywords:** Timber, Timber beams, Theoretical performance, Real performance, Loading test.



## AGRADECIMENTOS

A realização desta Dissertação de Mestrado só foi possível graças à colaboração e ao contributo de várias pessoas às quais gostaria de exprimir algumas palavras de agradecimento:

Ao Eng. Vasco Appleton e Eng. João Appleton pela sua disponibilidade em orientar esta dissertação, pela sua revisão crítica, esclarecimentos, opiniões e sugestões; pela acessibilidade, cordialidade e simpatia demonstradas, bem como pela confiança que sempre me transmitiram.

À COPORGEST SA pelo apoio e disponibilidade na cedência do edifício para realização do estudo em causa.

Aos colaboradores da HCI, nomeadamente ao Engenheiro Rui Silva e ao Encarregado de obra Fernando Santos, pelo apoio na execução dos ensaios.

Ao Engenheiro João Sousa Dias, colaborador da A2P, por todo o apoio e disponibilidade.

À Engenheira Helena Cruz pela disponibilidade e ajuda sempre demonstrada.

Aos meus colegas e amigos pela sua amizade e pelos momentos partilhados em conjunto, em especial ao João Tiago pelo seu apoio e motivação.

Aos meus pais pelo amor, pelo carinho, pela compreensão, pelos sacrifícios suportados e pela confiança que sempre depositaram em mim.

Aos meus avós pelo orgulho que sempre demonstraram.

Um agradecimento especial ao meu irmão Dário pelos bons conselhos, pelas palavras de incentivo e pela sua enorme paciência.



# ÍNDICE DO TEXTO

<b>1. Introdução.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Objetivo da dissertação.....</b>	<b>3</b>
<b>2. A Madeira como material estrutural.....</b>	<b>5</b>
<b>2.1. Características da madeira.....</b>	<b>5</b>
<b>2.2. Estrutura da madeira.....</b>	<b>7</b>
2.2.1. Estrutura macroscópica .....	8
2.2.2. Estrutura microscópica.....	10
<b>2.3. Propriedades físicas da madeira .....</b>	<b>12</b>
2.3.1. Higroscopicidade e Teor em Água.....	12
2.3.2. Retração e Inchamento da Madeira.....	15
2.3.3. Massa Volúmica e Densidade .....	16
<b>2.4. Propriedades mecânicas da madeira .....</b>	<b>17</b>
2.4.1. Resistência à Tração.....	18
2.4.2. Resistência à Compressão .....	20
2.4.3. Resistência ao Corte .....	21
2.4.4. Resistência à Flexão .....	22
2.4.5. Módulo de Elasticidade.....	24
2.4.6. Módulo de Distorção e Coeficiente de Poisson.....	25
2.4.7. Dureza .....	26
2.4.8. Fluência .....	27
<b>2.5. Principais fatores que condicionam o comportamento da madeira .....</b>	<b>28</b>
2.5.1. Teor de humidade.....	28
2.5.2. Duração da carga.....	29
2.5.3. Efeito de escala .....	30
<b>2.6. Classificação da madeira .....</b>	<b>31</b>
2.6.1. Defeitos da madeira.....	31
2.6.2. Classificação visual .....	36
2.6.3. Classificação mecânica .....	37
<b>2.7. Classes de Qualidade.....</b>	<b>38</b>
<b>2.8. Classes de Resistência .....</b>	<b>38</b>
<b>2.9. Classes de Serviço e Classes de Duração das Ações .....</b>	<b>39</b>

<b>3. Fatores de degradação da madeira.....</b>	<b>41</b>
<b>3.1. Degradação por agentes biológicos.....</b>	<b>41</b>
3.1.1. Durabilidade natural.....	42
3.1.2. Fungos.....	43
3.1.3. Térmitas subterrâneas.....	45
3.1.4. Caruncho.....	46
3.1.5. Classes de risco da madeira.....	48
<b>3.2. Degradação por agentes físicos e químicos.....</b>	<b>50</b>
3.2.1. Agentes atmosféricos.....	50
3.2.2. Fogo.....	51
<b>4. Preservação da madeira.....</b>	<b>55</b>
<b>4.1. Produtos preservadores.....</b>	<b>55</b>
4.1.1. Produtos oleosos.....	56
4.1.2. Produtos aquosos.....	57
4.1.3. Produtos com solvente orgânico.....	57
<b>4.2. Métodos de preservação.....</b>	<b>58</b>
4.2.1. Pincelagem e aspersão.....	58
4.2.2. Tratamento por imersão.....	59
4.2.3. Impregnação por pressão (autoclave).....	59
4.2.4. Tratamento Fitossanitário (Choque Térmico).....	60
<b>5. Consolidação da madeira.....</b>	<b>61</b>
<b>5.1. Anomalias em pavimentos.....</b>	<b>61</b>
<b>5.2. Intervenção em madeira degradada.....</b>	<b>64</b>
5.2.1. Generalidades.....	64
5.2.2. Princípios de Intervenção.....	65
<b>5.3. Técnicas de consolidação.....</b>	<b>65</b>
5.3.1. Consolidação por impregnação ou reconstituição com resinas.....	66
5.3.2. Reparação e Reforço.....	66
<b>6. Descrição dos edifícios aonde se inserem os pavimentos objeto de estudo.....</b>	<b>69</b>
<b>6.1. Caracterização estrutural e construtiva dos pavimentos.....</b>	<b>71</b>
<b>7. Desempenho teórico de vigamentos de madeira com classificação prévia.....</b>	<b>73</b>
<b>7.1. Medição da percentagem de humidade nos vigamentos.....</b>	<b>73</b>

7.2.	Classificação visual prévia dos vigamentos de madeira.....	74
7.3.	Modelos estruturais e deformações teóricas .....	76
8.	Desempenho real de vigamentos de madeira.....	81
8.1.	O sistema de distribuição de carga em pavimentos de madeira .....	81
8.2.	Ensaio de carga.....	82
8.2.1.	Descrição do Ensaio .....	82
8.2.2.	Resultados dos ensaios .....	86
9.	Desempenho teórico de vigamentos de madeira.....	101
9.1.	Classificação visual de estruturas de madeira em serviço.....	101
9.1.1.	Método de classificação visual.....	101
9.1.2.	Classificação visual .....	102
9.2.	Modelos estruturais e deformações teóricas .....	113
10.	Discussão dos resultados da análise experimental .....	117
11.	Conclusão .....	133
12.	Bibliografia .....	137
ANEXOS	.....	142



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Natureza elástica de uma peça de madeira [4].....	6
Figura 2.2 – Secções principais da madeira [6].....	7
Figura 2.3 – Corte transversal da madeira.....	9
Figura 2.4 – Lenho das resinosas, adaptado de [6]. .....	11
Figura 2.5 – Lenho das folhosas, adaptado de [6].....	12
Figura 2.6 – Curvas de teor em água da madeira [1]. .....	14
Figura 2.7 – Direções tangencial, radial e longitudinal e respetivos coeficientes de retração da madeira [7]. .....	16
Figura 2.8 – Ábaco de Kollmann [3].....	17
Figura 2.9 – Tração perpendicular à fibra [3]. .....	19
Figura 2.10 – Compressão perpendicular à fibra [3].....	20
Figura 2.11 – Diferentes modos de rotura por corte [3].....	21
Figura 2.12 – Dispositivo para determinação da resistência ao corte e dimensões do provete [11].....	22
Figura 2.13 – Flexão de uma viga simplesmente apoiada, adaptado de [12].....	22
Figura 2.14 – Diagramas de distribuição de tensões em peças de madeira fletidas [3]. .....	23
Figura 2.15 – Dispositivos para determinação da resistência à flexão [813]. .....	24
Figura 2.16 – Comportamento de material viscoelástico sob carga constante [14]. .....	27
Figura 2.17 – Fluência da madeira [14]. .....	28
Figura 2.18 – Efeitos do teor em humidade na resistência da madeira [3]. .....	29
Figura 2.19 – Perda de resistência da madeira em função da duração de aplicação da carga [3]. .....	30
Figura 2.20 – Projeção dos nós para diferentes localizações da medula, avaliação dos KAR marginal e total e correspondente classificação da peça em termos de nós [16].....	32
Figura 2.21 – Medição do fio [16]. .....	33
Figura 2.22 – Medição da taxa de crescimento [16]. .....	33
Figura 2.23 – Medição das fendas [16]. .....	34
Figura 2.24 – Medição do descaio [16].....	35
Figura 2.25 - Medição de empenos [16]. .....	35

Figura 3.1 – Alteração da madeira por fungos [24].	45
Figura 3.2 – Alteração da madeira por térmitas [25].	46
Figura 3.3 – Ciclo de vida do caruncho [26].	47
Figura 3.4 - Tipos de carunchos [25].	48
Figura 3.5 – Esquema de secção de madeira ardida [3].	51
Figura 3.6 – Revestimento intumescente [29].	52
Figura 4.1 – Autoclave com carga de madeira prestes a entrar [32].	60
Figura 5.1 – Diferentes anomalias resultantes da falta de manutenção dos edifícios.	63
Figura 5.2 – Injeção de resina epoxy para reconstituição de zona deteriorada de viga de madeira [36].	66
Figura 5.3 – Redução de flechas de madeira pela colocação de viga transversal ao vigamento do pavimento [36].	67
Figura 5.4 – Reforço em pavimentos de madeira (a) colocando vigas novas paralelamente às antigas, (b) utilizando pranchas metálicas pregadas às vigas [36].	68
Figura 6.1 – Fachada, dos três edifícios, voltada para a Av. Duque de Loulé, números 86, 90 e 94 da direita para a esquerda.	69
Figura 6.2 – Planta da fachada de tardo do projeto inicial dos edifícios n.º 86, 90 e 94 da Avenida Duque de Loulé [].	71
Figura 6.3 – Planta do rés-do-chão do projeto inicial dos edifícios n.º 86, 90 e 94 da Avenida Duque de Loulé [38].	71
Figura 6.4 – Orientação dos vigamentos de madeira [37].	72
Figura 6.5 – Soalho à inglesa.	72
Figura 7.1 – Higrómetro.	74
Figura 7.2 – Medição de percentagem de humidade.	74
Figura 7.3 – Fendas e humidade num vigamento de madeira.	75
Figura 7.4 – Modelo estrutural e cargas aplicadas no Ensaio 1. (a) Sobrecarga. (b) RCP.	77
Figura 7.5 – Deformada da estrutura e valores das deformações para a combinação rara.	77
Figura 8.1 – Defletómetro.	82
Figura 8.2 – Montagem dos defletómetros.	83
Figura 8.3 – Planta da faixa ensaiada com localização dos defletómetros.	83
Figura 8.4 – Sacos de argamassa utilizados no ensaio.	84

Figura 8.5 – Medição das deformações.....	84
Figura 8.6 – Corte do macheado do soalho.....	85
Figura 8.7 – Corte do vigamento junto ao apoio para evitar o efeito de continuidade.....	85
Figura 8.8 – Gráfico carga vs deslocamento para as 5 vigas do Ensaio 1 com soalho.....	88
Figura 8.9 - Gráfico carga/descarga vs deslocamento para as 5 vigas do Ensaio 1 sem soalho..	90
Figura 8.10 - Gráfico carga/descarga vs deslocamento para as 5 vigas do Ensaio 2 com soalho. .....	92
Figura 8.11 - Gráfico carga/descarga vs deslocamento para as 5 vigas do Ensaio 2 sem soalho.	93
Figura 8.12 - Gráfico carga/descarga vs deslocamento para as 5 vigas do Ensaio 3 com soalho. .....	95
Figura 8.13 - Gráfico carga/descarga vs deslocamento para as 5 vigas do Ensaio 3 sem soalho.	97
Figura 8.14 - Gráfico carga/descarga vs deslocamento para as 5 vigas do Ensaio 4 com soalho. .....	99
Figura 8.15 - Gráfico carga/descarga vs deslocamento para as 5 vigas do Ensaio 4 sem soalho. .....	100
Figura 9.1 - Projeção dos nós para avaliação do KAR marginal e KAR total – viga A do Ensaio 1.....	104
Figura 9.2 - Projeção dos nós para avaliação do KAR marginal e KAR total – viga B Ensaio 1 (1º caso).....	105
Figura 9.3 - Projeção dos nós para avaliação do KAR marginal e KAR total – viga B Ensaio 1 (2º caso).....	105
Figura 9.4 - Projeção dos nós para avaliação do KAR marginal e KAR total – viga C Ensaio 1. .....	106
Figura 9.5 - Projeção dos nós para avaliação do KAR marginal e KAR total – viga A Ensaio 2. .....	107
Figura 9.6 - Projeção dos nós para avaliação do KAR marginal e KAR total – viga B Ensaio 2. .....	107
Figura 9.7 - Projeção dos nós para avaliação do KAR marginal e KAR total – viga C Ensaio 2. .....	108
Figura 9.8 - Projeção dos nós para avaliação do KAR marginal e KAR total – viga A Ensaio 3. .....	109

Figura 9.9 - Projeção dos nós para avaliação do KAR marginal e KAR total – viga B Ensaio 3. .....	109
Figura 9.10 - Projeção dos nós para avaliação do KAR marginal e KAR total – viga C Ensaio 3. .....	110
Figura 9.11 - Projeção dos nós para avaliação do KAR marginal e KAR total – viga A Ensaio 4. .....	111
Figura 9.12 - Projeção dos nós para avaliação do KAR marginal e KAR total – viga B Ensaio 4. .....	111
Figura 9.13 - Projeção dos nós para avaliação do KAR marginal e KAR total – viga C Ensaio 4. .....	112
Figura 9.14 – Indício de ataque biológico nos vigamentos de madeira. ....	113

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Diferenças entre folhosas e resinosas [3]. .....	8
Tabela 2.2 - Classificação da madeira de acordo com o seu teor em água [3].....	15
Tabela 2.3 – Tensão média de rotura à tração de algumas espécies de madeira [3]. .....	19
Tabela 2.4 – Valores das constantes elásticas da madeira usualmente utilizados [3]. .....	25
Tabela 3.1 – Classes de risco para a madeira maciça da “NP EN 335-2:1994” [27]. .....	49
Tabela 7.1 – Dados utilizados para análise do desempenho teórico no Ensaio 1. ....	76
Tabela 7.2 – Valores das deformações para a combinação rara e em estado limite último – Ensaio 1.....	78
Tabela 7.3 - Dados utilizados para análise do desempenho teórico no Ensaio 2. ....	78
Tabela 7.4 - Valores das deformações para a combinação rara e em estado limite último – Ensaio 2.....	79
Tabela 7.5 - Dados utilizados para análise do desempenho teórico no Ensaio 3. ....	79
Tabela 7.6 - Valores das deformações para a combinação rara e em estado limite último – Ensaio 3.....	80
Tabela 7.7 - Dados utilizados para análise do desempenho teórico no Ensaio 4. ....	80
Tabela 7.8 - Valores das deformações para a combinação rara e em estado limite último – Ensaio 4.....	80
Tabela 8.1 – Valores da deformação das várias vigas e módulos de elasticidade para o Ensaio 1, com a contribuição do soalho.....	87
Tabela 8.2 - Valores da deformação das várias vigas e módulos de elasticidade para o Ensaio 1, sem a contribuição do soalho - carga. ....	89
Tabela 8.3 - Valores da deformação das várias vigas e módulos de elasticidade para o Ensaio 1, sem a contribuição do soalho e valores residuais - descarga.....	89
Tabela 8.4 - Valores da deformação das várias vigas e módulos de elasticidade para o Ensaio 2, com a contribuição do soalho - carga.....	91
Tabela 8.5 - Valores da deformação das várias vigas e módulos de elasticidade para o Ensaio 2, com a contribuição do soalho e valores residuais - descarga. ....	91
Tabela 8.6 - Valores da deformação das várias vigas e módulos de elasticidade para o Ensaio 2, sem a contribuição do soalho – carga.....	92

Tabela 8.7 - Valores da deformação das várias vigas e módulos de elasticidade para o Ensaio 2, sem a contribuição do soalho e valores residuais - descarga.....	93
Tabela 8.8 - Valores da deformação das várias vigas e módulos de elasticidade para o Ensaio 3, com a contribuição do soalho - carga.....	94
Tabela 8.9 - Valores da deformação das várias vigas e módulos de elasticidade para o Ensaio 3, com a contribuição do soalho e valores residuais – descarga. ....	94
Tabela 8.10 - Valores da deformação das várias vigas e módulos de elasticidade para o Ensaio 3, sem a contribuição do soalho - carga. ....	96
Tabela 8.11 - Valores da deformação das várias vigas e módulos de elasticidade para o Ensaio 3, sem a contribuição do soalho e valores residuais – descarga.....	96
Tabela 8.12 - Valores da deformação das várias vigas e módulos de elasticidade para o Ensaio 4, com a contribuição do soalho – carga. ....	98
Tabela 8.13 - Valores da deformação das várias vigas e módulos de elasticidade para o Ensaio 4, com a contribuição do soalho e valores residuais – descarga. ....	98
Tabela 8.14 - Valores da deformação das várias vigas e módulos de elasticidade para o Ensaio 4, sem a contribuição do soalho - carga. ....	99
Tabela 8.15 - Valores da deformação das várias vigas e módulos de elasticidade para o Ensaio 4, sem a contribuição do soalho e valores residuais – descarga.....	100
Tabela 9.1 – Avaliação do KAR marginal e KAR total da viga A do Ensaio 1.....	104
Tabela 9.2 - Avaliação do KAR marginal e KAR total da viga B do Ensaio 1 (1º caso).....	105
Tabela 9.3 - Avaliação do KAR marginal e KAR total da viga B do Ensaio 1 (2º caso).....	105
Tabela 9.4 - Avaliação do KAR marginal e KAR total da viga C do Ensaio 1.....	106
Tabela 9.5 - Avaliação do KAR marginal e KAR total da viga A do Ensaio 2. ....	107
Tabela 9.6 - Avaliação do KAR marginal e KAR total da viga B do Ensaio 2.....	107
Tabela 9.7 - Avaliação do KAR marginal e KAR total da viga C do Ensaio 2.....	108
Tabela 9.8 - Avaliação do KAR marginal e KAR total da viga A do Ensaio 3. ....	109
Tabela 9.9 - Avaliação do KAR marginal e KAR total da viga B do Ensaio 3.....	109
Tabela 9.10 - Avaliação do KAR marginal e KAR total da viga C do Ensaio 3.....	110
Tabela 9.11 - Avaliação do KAR marginal e KAR total da viga A do Ensaio 4. ....	111
Tabela 9.12 - Avaliação do KAR marginal e KAR total da viga B do Ensaio 4.....	111
Tabela 9.13 - Avaliação do KAR marginal e KAR total da viga C do Ensaio 4.....	112

Tabela 9.14 - Valores das deformações para a combinação rara e em estado limite último – Ensaio 1.....	114
Tabela 9.15 - Valores das deformações para a combinação rara e em estado limite último – Ensaio 2.....	114
Tabela 9.16 - Valores das deformações para a combinação rara e em estado limite último – Ensaio 3.....	115
Tabela 9.17 - Valores das deformações para a combinação rara e em estado limite último – Ensaio 4.....	115
Tabela 10.1 – Deformações totais para carregamento de 2 kN/m <sup>2</sup> – com soalho. ....	117
Tabela 10.2 - Deformações totais para carregamento de 3 kN/m <sup>2</sup> – com soalho.....	118
Tabela 10.3 - Deformações totais para carregamento de 2 kN/m <sup>2</sup> – sem soalho. ....	118
Tabela 10.4 - Deformações totais para carregamento de 3 kN/m <sup>2</sup> – sem soalho. ....	119
Tabela 10.5 - Deformações totais para descarregamento de 1 kN/m <sup>2</sup> – com soalho. ....	119
Tabela 10.6 - Deformações totais para descarregamento total – com soalho. ....	120
Tabela 10.7 - Deformações totais para descarregamento de 1 kN/m <sup>2</sup> – sem soalho.....	120
Tabela 10.8 - Deformações totais para descarregamento total – sem soalho.....	121
Tabela 10.9 – Deformações totais com e sem contribuição do soalho, carregamento 2kN/m <sup>2</sup> . 121	
Tabela 10.10 - Deformações totais com e sem contribuição do soalho, carregamento 3kN/m <sup>2</sup> . .....	122
Tabela 10.11 - Deformações totais com e sem contribuição do soalho, descarregamento 1kN/m <sup>2</sup> . .....	122
Tabela 10.12 - Deformações totais com e sem contribuição do soalho, descarregamento total. .....	123
Tabela 10.13 – Valor médio dos módulos de elasticidade – com soalho.....	123
Tabela 10.14 - Valor médio dos módulos de elasticidade – sem soalho.....	124
Tabela 10.15 – Valores médios dos módulos de elasticidade para o 1º patamar de carga.....	124
Tabela 10.16 - Valores médios dos módulos de elasticidade para o 2º patamar de carga.....	125
Tabela 10.17 – Valores médios dos módulos de elasticidade para a descarga.....	125
Tabela 10.18 – Valores médios dos módulos de elasticidade para vigas centrais.....	125
Tabela 10.19 - Valores médios dos módulos de elasticidade excluindo as vigas com deformação final superior a 0,5mm. ....	126

Tabela 10.21 – Comparação entre deformações reais e teóricas – Ensaio 1, 1º patamar de carga. .....	126
Tabela 10.22 - Comparação entre deformações reais e teóricas – Ensaio 1, 2º patamar de carga. .....	127
Tabela 10.23 - Comparação entre deformações reais e teóricas – Ensaio 2, 1º patamar de carga. .....	127
Tabela 10.24 - Comparação entre deformações reais e teóricas – Ensaio 2, 2º patamar de carga .....	128
Tabela 10.25 - Comparação entre deformações reais e teóricas – Ensaio 3, 1º patamar de carga. .....	128
Tabela 10.26 - Comparação entre deformações reais e teóricas – Ensaio 3, 2º patamar de carga. .....	129
Tabela 10.27 - Comparação entre deformações reais e teóricas – Ensaio 4, 1º patamar de carga. .....	129
Tabela 10.28 - Comparação entre deformações reais e teóricas – Ensaio 4, 2º patamar de carga. .....	130

## SIMBOLOS

$E$	– Módulo de elasticidade;
$E_L$	– Módulo de elasticidade na direção longitudinal;
$E_R$	– Módulo de elasticidade na direção radial;
$E_T$	– Módulo de elasticidade na direção transversal;
$G$	– Módulo de distorção;
$H$	– Teor em água da madeira;
$m_h$	– Massa do provete húmido;
$m_s$	– Massa do provete seco;
$f_{c,0,k}$	– Resistência característica à compressão paralela;
$f_m$	– Resistência à flexão;
$f_{m,k}$	– Resistência característica à flexão paralela;
$f_{t,0,k}$	– Resistência característica à tração paralela;
$f_{v,k}$	– Resistência característica ao corte;
PSF	– Ponto de Saturação das Fibras;
$V_H$	– Volume do provete húmido;
$\delta_c$	– Deformação de fluência;
$\delta_{el}$	– Deformação elástica;
$\delta_{tot}$	– Deformação total;
$\varepsilon$	– Extensão;
$\rho_H$	– Massa Volúmica;
$\sigma_L$	– Tensão na direção longitudinal;
$\sigma_R$	– Tensão na direção radial;
$\sigma_T$	– Tensão na direção transversal;

$\sigma_{m,H}$  – Tensão de rotura à flexão;

$\tau_{v,H}$  – Tensão de corte;

$\nu$  – Coeficiente de Poisson;

## 1. Introdução

Devido às suas características, a madeira tem sido um material bastante utilizado pelo Homem, podendo ser utilizada tanto em objetos decorativos como em grandes estruturas.

Como material estrutural pode ser utilizado numa grande variedade de formas, nomeadamente vigas, colunas e treliças.

A madeira é um material que tem origem num ser vivo, a árvore, e portanto possui características distintas que dependem da espécie da árvore e das condições de crescimento. Consequentemente, a estrutura da madeira resulta não só da sua espécie mas também das necessidades a que está sujeita durante a sua vida, tais como suporte, alimentação e proteção.

Como qualquer outro material estrutural, para uma melhor escolha da espécie da madeira a utilizar, é necessário o conhecimento das suas propriedades físicas e mecânicas para que a solução encontrada seja a mais segura e economicamente mais viável, de forma a cumprir os valores de resistência e rigidez desejados. No entanto, existem diversos fatores que condicionam a resistência e a rigidez da madeira, nomeadamente a qualidade da mesma, as condições ambientais a que está sujeita, o tempo de aplicação de cargas e a secção transversal do elemento.

Devido ao subaproveitamento que estaria em causa se analisássemos a madeira como um todo, foram criadas formas de classificação que permitem agrupar a madeira em várias classes tendo em conta características semelhantes. Das características a ter em causa, pode-se salientar a presença de defeitos, que poderão colocar em causa a utilização total ou parcial de determinado elemento de madeira.

A longo prazo, as características e propriedades da madeira podem não sofrer perdas significativas se se mantiverem em condições ambientais apropriadas para a sua conservação. No entanto, se sujeita a condições desfavoráveis poderá degradar-se muito facilmente, devido a agentes biológicos, mecânicos, físicos e químicos. De forma a evitar a deterioração da madeira, é necessário, ainda numa fase inicial, proceder à preservação da mesma utilizando os diversos produtos e métodos disponíveis.

No entanto quando ocorrem situações de degradação que comprometem gravemente as condições da estrutura são necessários trabalhos de consolidação, para terminar a progressão da degradação e para que sejam repostas e melhoradas as características de durabilidade, resistência e funcionalidade. Para isso terão de ser analisadas as anomalias em causa e proceder ao tratamento de consolidação que melhor se adequa.

Depois de uma análise detalhada da madeira como material estrutural, da abordagem acerca dos fatores de degradação, métodos de preservação e técnicas de consolidação irá analisar-se o desempenho teórico e real de um vigamento de madeira. Atualmente existe um grande número de edifícios antigos que não cumprem as exigências regulamentadas pelo EC5. No entanto, alguns desses edifícios aparentemente apresentam um bom comportamento estrutural, o que justifica que se faça este tipo de análise comparativa.

A análise do comportamento real da estrutura é realizada através de ensaios de carga, em que as deformações do pavimento são medidas com o apoio de defletómetros. Os ensaios de carga são realizados em quatro pavimentos distintos, pavimentos esses que são sujeitos a uma carga uniformemente distribuída. A carga considerada é aplicada por fases e no fim de cada fase é medida a deformação obtida. Posteriormente, com o apoio do gráfico carga *vs* deformação obtém-se o módulo de elasticidade de cada vigamento. O ensaio tem ainda a particularidade de ser realizado com e sem a contribuição do soalho.

O desempenho teórico é analisado segundo modelos estruturais do pavimento, com o apoio do programa estrutural SAP2000. Através destes modelos é possível simular características e o comportamento teórico da estrutura. No entanto para uma análise o mais real possível da estrutura é necessário analisar detalhadamente as características da madeira em causa através de uma classificação visual, bem como o estado de deterioração da mesma. A madeira já em serviço não pode ser tratada como se fosse nova, no entanto tratando-se elementos em serviço a análise das suas características pode ser por vezes difícil, ainda assim existem regras de avaliação para esses casos.

Os parâmetros usados para a comparação do desempenho teórico e real de vigamentos de madeira são as deformações e o módulo de elasticidade do elemento em causa. É ainda possível analisar a contribuição do soalho para a deformação do pavimento.

## **1.1. Objetivo da dissertação**

O objetivo principal deste trabalho consiste numa análise cuidadosa ao estado da arte da análise da madeira como material estrutural e do desempenho de pavimentos de madeira a longo prazo.

A madeira como material estrutural será abordada no capítulo 2, onde se analisarão diferentes temas, como as características, propriedades e critérios de classificação do material, que são necessários para um melhor conhecimento do material madeira e para uma correta utilização da mesma.

O desempenho de pavimentos de madeira a longo prazo é tratado nos capítulos 3, 4 e 5, onde serão abordados temas como fatores de degradação da madeira, preservação da madeira e consolidação da madeira, respetivamente. Esta análise tem como objetivo um melhor conhecimento dos diversos fatores que poderão ser responsáveis pela deterioração da madeira e poderão comprometer as funções de determinado elemento. Serão descritos alguns produtos e métodos preservadores que poderão ser utilizados para proteger a madeira quando ainda não sujeita a fatores de degradação. Para um estado mais avançado de deterioração serão apresentadas diversas anomalias em pavimentos, bem como algumas técnicas de consolidação.

Numa segunda fase, será analisado o desempenho teórico e real de um pavimento de um edifício antigo que se localiza na Avenida Duque de Loulé em Lisboa. No capítulo 6 será apresentada uma breve descrição do edifício em causa seguindo-se já no capítulo 7 uma análise ao comportamento teórico do pavimento tendo em conta uma classificação visual prévia. A classificação visual prévia tem como principal objetivo a verificação da segurança da estrutura para os dois patamares de carga considerados nos ensaios e o cumprimento das deformações máximas exigidas no Eurocódigo 5. O capítulo 8 trata o desempenho real de vigamentos de madeira, sendo apresentado o método de análise utilizado bem como todos os resultados obtidos, no que respeita à deformação da viga e ao módulo de elasticidade correspondente. De seguida, no capítulo 9, é novamente abordado o desempenho teórico do pavimento mas utilizando agora uma classificação visual mais detalhada. Através desta análise teórica obtém-se os módulos de elasticidade e as deformações resultantes. Numa fase última, faz-se uma análise detalhada dos resultados finais obtidos e tiram-se as devidas conclusões.



## **2. A Madeira como material estrutural**

O presente capítulo apresenta os conceitos base necessários para entender a madeira como material estrutural.

Para uma intervenção eficaz e responsável numa estrutura de valor patrimonial é necessário conhecer as características fundamentais do material utilizado, de forma a avaliar corretamente o seu estado de conservação e o seu comportamento estrutural. Serão apresentadas características e propriedades deste material de construção, necessárias para a compreensão do seu comportamento e procedimentos existentes para a sua classificação [1].

### **2.1. Características da madeira**

A madeira é um material orgânico de origem natural, que tem origem no tecido formado pelas plantas lenhosas. Trata-se de uma matéria heterogênea e anisotrópica elaborada por um organismo vivo, a árvore [1].

Como material de construção, a madeira possui uma enorme complexidade e requer conhecimentos técnicos e científicos específicos. As características da madeira podem variar de árvore para árvore e portanto as suas propriedades distintas podem condicionar as suas aplicações [2].

Devido à sua origem, à sua abundância na natureza e às suas características (resistência e peso) a madeira tem sido desde sempre utilizada pelo Homem na construção. As primeiras construções eram feitas de madeira proveniente de árvores de pequenas dimensões devido à falta de ferramentas para a trabalhar. Com o aparecimento dos metais surgiu a capacidade de construir ferramentas que pudessem trabalhar a madeira e até mesmo serrar árvores de grande porte, e posteriormente com o avanço tecnológico e com o surgimento das colas e resinas a madeira tornou-se um material bastante trabalhável e de ainda maior qualidade.

A madeira foi, durante muito tempo, um dos materiais com maior capacidade de vencer grandes vãos. Contudo, devido ao aparecimento do aço durante a Revolução Industrial, e posterior descoberta do betão, a madeira ficou no esquecimento, era somente utilizada em pequenas

habitações. Nos meados do séc. XX, graças ao aparecimento de madeiras lameladas coladas torna-se possível a sua utilização em estruturas de grande dimensão.

Atualmente existe uma enorme diversidade de estruturas de madeira, nomeadamente em habitações, coberturas, pontes, etc. Trata-se de um material que possui um agradável aspeto visual e um elevado desempenho estrutural.

A madeira é também um material que por sua vez é “Amigo do Ambiente” por ser o único que é completamente renovável. Tendo em conta a sua durabilidade, a madeira pode sobreviver durante vários anos desde que não esteja exposta a grandes variações de humidade. Em Portugal, temos o caso das estacas da baixa pombalina de Lisboa que se mantiveram, muitas delas, até aos dias de hoje em boas condições de funcionamento. Aliado a estas características, existe ainda o facto de a madeira ser um material biodegradável e reciclável, assim é possível o seu reaproveitamento quando as estruturas são destruídas [3].

Relativamente à deformabilidade da madeira esta pode ser caracterizada como tendo um comportamento elástico dentro de um intervalo de valores para as forças atuantes; dentro desse intervalo, quando as forças atuantes são retiradas, o elemento volta à sua forma original, comportamento esse que se verifica até ao final do regime elástico. Quando o limite elástico é excedido, entra-se em regime plástico, e passa a haver uma parcela da deformação que não é recuperável.

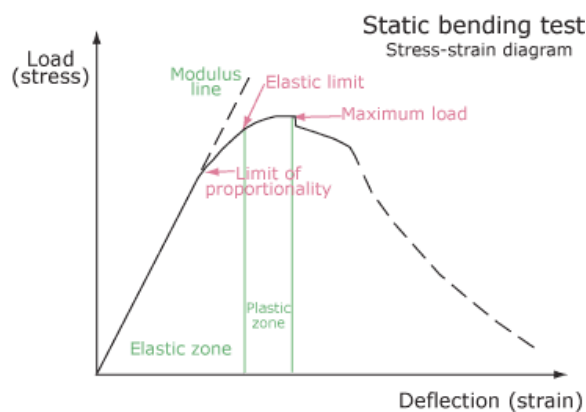


Figura 2.1 – Natureza elástica de uma peça de madeira [4].

Através da relação tensão/carga e deformação/deslocamento numa qualquer peça de madeira à flexão, é possível retirar algumas das propriedades do material, conforme ilustrado na Figura 2.1. Podemos extrair do gráfico o módulo de elasticidade do material, se o material é dúctil ou frágil e se as deformações podem ser recuperadas.

Através da Figura 2.1 podemos verificar que o material assume um comportamento elástico. Inicialmente a deformação aumenta proporcionalmente com o aumento da carga até ser atingido limite de proporcionalidade (Limit of proportionality), a partir daí o material ainda se encontra num regime elástico mas a deformação já não é proporcional ao aumento da carga. Com o aumento do carregamento é atingido o limite elástico (Elastic limit) e entra-se em regime plástico. No ponto de carregamento máximo o material entra em cedência e colapsa, a não ser que haja uma diminuição da carga [2].

## 2.2. Estrutura da madeira

Como foi referido anteriormente a madeira é um material originado por um organismo vivo que é a árvore, por isso sua estrutura é resultado das necessidades que possui, nomeadamente, suporte, alimentação e proteção. Assim, cada árvore tem características distintas, que dependem de cada espécie florestal e também das suas condições de crescimento e idade.

Numa árvore podem ser identificadas três zonas distintas, a raiz, o fuste e a copa. A raiz é o que permite agarrar a árvore ao solo e permite a entrada de sais minerais e água. O conjunto do fuste e da copa é designado por tronco, onde o fuste tem a função de suporte face às ações externas a que a árvore está sujeita e permite a condução dos sais minerais e água até às folhas. A copa é constituída pelos ramos e folhas e é responsável pelo processo de fotossíntese. Designa-se por madeira ou lenho o conjunto dos tecidos que formam o tronco e as raízes, exceto a casca [1].

Conforme a Figura 2.2, na matéria lenhosa podem ser consideradas três direções, a direção axial ou longitudinal, direção radial e direção tangencial.



Figura 2.2 – Secções principais da madeira [6].

O material lenhoso é proveniente de duas das 17 divisões em que se classifica o Reino Vegetal, das Coníferas e das Dicotiledóneas. As Coníferas são habitualmente chamadas de resinosas e as Dicotiledóneas de folhosas, a diferença entre elas começa logo na aparência. Na Tabela 2.1 serão apresentadas as principais diferenças entre elas.

**Tabela 2.1 – Diferenças entre folhosas e resinosas [3].**

	<b>Resinosas</b>	<b>Folhosas</b>
<b>Botânica</b>	Plantas de sementes nuas, que não se encontram protegidos por um ovário	Plantas em que os óvulos se encontram protegidos por um ovário, evoluindo para sementes após fecundação
<b>Folhas</b>	Folhas persistentes (com algumas exceções). Folhas geralmente estreitas de pontas aguçadas	Folhas persistentes ou caducas. Folhas geralmente planas com uma rede de finas nervuras
<b>Flores</b>	Sem pétalas	Geralmente com pétalas
<b>Frutos</b>	Em geral um cone muitas vezes com escamas lenhosas	Grande diversidade de forma, de textura e de cor
<b>Terrenos</b>	Aceitam condições hostis	Habitat menos hostil

Contudo, as diferenças entre as resinosas e as folhosas não são apenas na aparência mas também na estrutura anatómica da madeira.

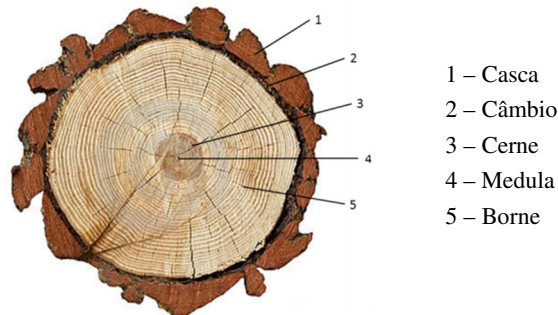
### 2.2.1. Estrutura macroscópica

A madeira proveniente de determinada árvore possui diversas características que podem ser identificadas a olho nu ou com lupas de aumento. A análise destas características não é suficiente para um conhecimento total da árvore mas pode fornecer muitas informações acerca da estrutura da mesma.

- *Plano transversal*

Através do plano transversal podem ser identificadas diversas características referentes à formação do lenho.

A Figura 2.3 representa a secção transversal de determinado tronco de madeira, onde podem ser identificados os seus elementos constituintes.



**Figura 2.3 – Corte transversal da madeira.**

A medula localiza-se no centro do tronco, trata-se do tecido macio a partir do qual cresceram os ramos novos. É também identificável a olho nu.

O cerne é a zona envolvente da medula, é composto pelas células antigas mortas, e possui uma enorme resistência. Devido à morte das células e conseqüentes alterações químicas, o cerne pode possuir uma cor mais escura, mas nem sempre tal é observável.

O borne é a zona posterior ao cerne, é constituída pelas células vivas da árvore, que são responsáveis pelo transporte e armazenamento dos sais minerais e da água.

O câmbio localiza-se entre a casca e o borne e é constituído por células vivas que originam os anéis de crescimento e a casca. Portanto, o crescimento da árvore em diâmetro é devido à adição de novas células produzidas pelo câmbio, o qual é responsável pelo crescimento em diâmetro produzindo lenho para o interior, enquanto se afasta progressivamente da medula. Na maioria dos casos, são identificáveis a nível macroscópico as diferentes células da madeira, isto porque o crescimento é menor durante o Inverno, acelerando durante a Primavera. As diferentes células também podem ser identificáveis através da cor, sendo elas mais escuras durante o Inverno e mais claras durante a Primavera. A cada nova camada chama-se anel de crescimento, o qual caracteriza as condições de desenvolvimento da árvore e para cada anel que se acrescenta, ano a ano, são identificáveis as duas camadas distintas, que permitem estimar a idade de determinada árvore. Em regiões tropicais, em que as condições climáticas são praticamente constantes durante o ano, as camadas de crescimento não se diferenciam, e portanto é mais difícil fazer uma análise macroscópica.

A casca é a parte exterior da árvore, é responsável pela proteção da mesma e a sua espessura é variável conforme a idade.

Os raios medulares ou raios lenhosos são constituídos por células dispostas na direção radial, perpendicularmente ao eixo da árvore. Possuem uma enorme relevância nas propriedades da madeira, dado que são de certa forma os responsáveis pelas propriedades de contração da mesma.

- *Plano radial e tangencial*

No plano radial e tangencial importa ver a textura, o fio e o veio da madeira na análise macroscópica.

A textura varia com o ritmo de crescimento da madeira, tendo em conta as diferenças e proporções entre a madeira de Inverno e Verão.

O fio tem em conta a forma em que se dispõem os elementos fibrosos na direção longitudinal, ou seja, o seu alinhamento é verificado na direção radial. A análise do fio é bastante relevante dado que a direção das fibras limita o comportamento da peça.

O veio do lenho é o conjunto de todos os efeitos identificáveis na peça, nomeadamente, a disposição e direção dos elementos fibrosos, colorações zonais ou locais de brilho.

### 2.2.2. Estrutura microscópica

As células do lenho diferenciam-se entretanto em elementos celulares com funções fisiológicas (condução de seiva, suporte estrutural, armazenamento, etc.), sendo que essa especialização é muito maior no caso da família das Folhosas, dando origem a arranjos anatómicos mais complexos e diversificados, do que no caso das família das Resinosas, mais ancestrais [5].

- *Resinosas*

As resinosas são caracterizadas por terem um crescimento mais rápido, sendo possível cortá-las após 30 anos. O seu rápido crescimento resulta numa madeira de baixa densidade e com capacidades resistentes reduzidas. Geralmente as suas qualidades de durabilidade são mais baixas, a menos que sejam adequadamente tratadas. Contudo devido ao seu ritmo de abate são madeiras com maior disponibilidade no mercado e relativamente mais baratas [2].

Alguns exemplos de espécies resinosas são o pinheiro bravo, o cipreste, o spruce e o abeto.

A estrutura das resinosas é essencialmente constituída por traqueídeos e parênquima. Os traqueídeos são células fusiformes situadas na madeira de Primavera e apresentam funções de transporte da seiva bruta e suporte da árvore. O parênquima é constituído por células vivas mais ou menos isodiamétricas que são responsáveis pelo armazenamento das substâncias necessárias ao processo de fotossíntese [3].

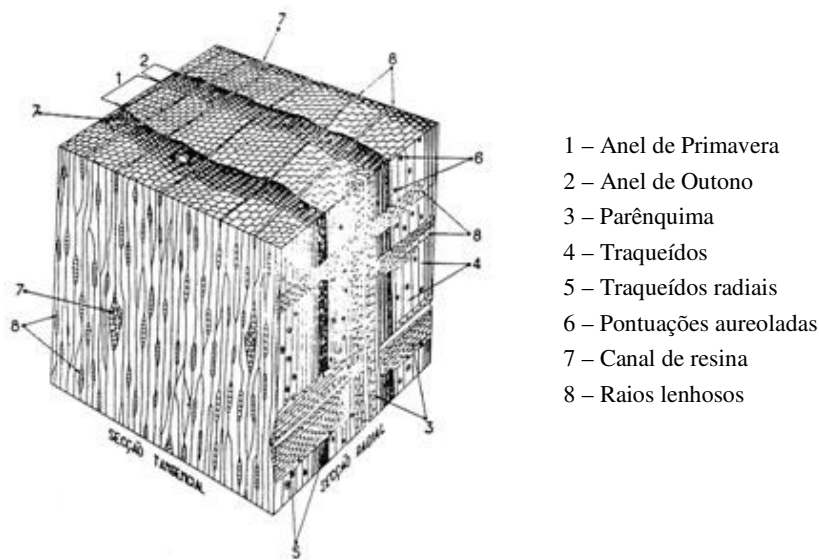


Figura 2.4 – Lenho das resinosas, adaptado de [6].

- *Folhosas*

O crescimento das folhosas é mais lento do que o das resinosas e desta forma resultam madeiras de maior densidade e maior durabilidade [2].

Alguns exemplos de folhosas são o carvalho, o sobreiro, o castanheiro, o eucalipto e o choupo.

A estrutura celular das folhosas é mais complexa do que a das resinosas. As fibras estão dispostas longitudinalmente no caule, o seu diâmetro é variável e de dimensões reduzidas e têm como função o suporte. Os raios lenhosos são faixas dispostas em fiadas radiais e é a sua presença no lenho que obriga a um confinamento das fibras no sentido radial, desta forma são alteradas as propriedades físicas e mecânicas da madeira. A função de transporte da seiva bruta é assegurada por um conjunto de células designadas por vasos que se estendem da raiz até às folhas [3].

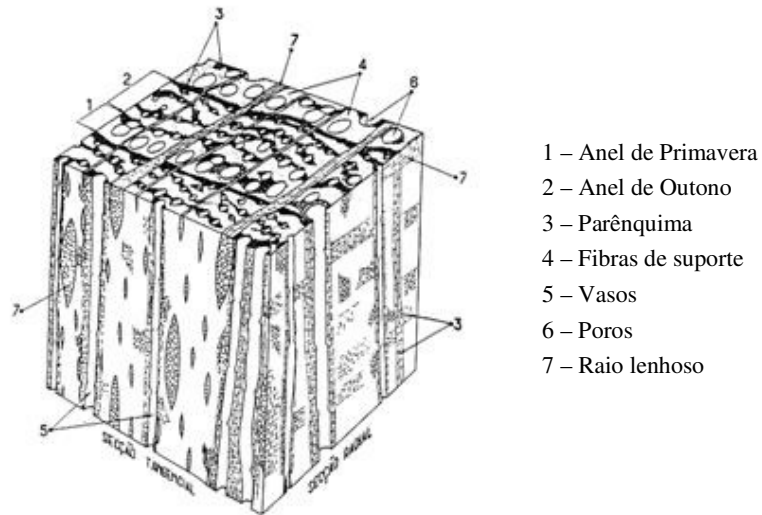


Figura 2.5 – Lenho das folhosas, adaptado de [6].

### 2.3. Propriedades físicas da madeira

A árvore é um organismo vivo que está exposto a condições diversas que originam várias qualidades de madeira. Assim, para que a escolha da melhor qualidade de madeira a utilizar seja a mais segura e económica, é necessário o conhecimento das suas propriedades físicas.

O conhecimento das propriedades do material é adquirido através da realização de ensaios em amostras de madeira de determinada espécie. Tais ensaios são feitos tendo em conta os muitos fatores que influenciam as características da madeira.

#### 2.3.1. Higroscopicidade e Teor em Água

A madeira é um material higroscópico que efetua trocas da água com o exterior de forma a encontrar um ponto de equilíbrio.

Quando se abate determinada árvore, a madeira possui uma elevada quantidade de água, que se encontra sob diferentes formas: água livre, água de impregnação e água de constituição.

A água livre é a água que preenche os vazios celulares e é expulsa com facilidade por secagem natural ao ar. Tal facto, não provoca variações do volume da madeira nem alterações da sua resistência mecânica.

A água de impregnação é a água retida nas paredes celulares da madeira, às quais se mantém ligada quimicamente e necessita de uma maior energia para a sua expulsão. Atualmente, essa libertação pode ser realizada através de secagem controlada industrialmente, o que se sempre acontece. Com a expulsão da água de impregnação verifica-se uma aproximação das fibras originando a retração da madeira e aumentando a sua resistência e rigidez.

A água de constituição está muito ligada à madeira por grandes forças químicas e a sua libertação origina a decomposição química da madeira.

Analogamente ao que foi referido anteriormente, a primeira água a ser expulsa quando uma árvore é abatida é a água livre. Quando toda a água livre for libertada da madeira, a restante água encontra-se quimicamente ligada, surgindo a necessidade de uma maior quantidade de energia para a sua libertação. Ao ponto em que se verifica que toda a água livre foi expulsa e se manteve toda a água de impregnação no tecido lenhoso, chama-se Ponto de Saturação das Fibras, PSF. O valor do PSF situa-se entre os 28% e 30% de teor em água da madeira para a maioria das espécies.

Para valores de teor em água superiores ao PSF, as propriedades da madeira mantêm-se constantes, contrariamente ao que ocorre quando o teor em água é inferior, em que se verificam grandes alterações na maioria das propriedades físicas e mecânicas, tais como, retração ou inchamento da madeira e consequentemente distorções e empenamentos. Desta forma, o conhecimento do PSF de determinada madeira é bastante importante.

O teor em água (ou humidade) da madeira,  $H$ , é dado como o valor percentual do peso de água da amostra em relação ao peso seco da mesma (após secagem em estufa a 103 °C).

$$H(\%) = \frac{m_h - m_s}{m_s} \times 100 \quad (2.1)$$

em que  $m_h$  é a massa do provete húmido e  $m_s$  é a massa do provete seco.

Para cada combinação de temperatura e humidade relativa do ar existe um ponto de equilíbrio, denominado teor em água de equilíbrio. “O teor em água de equilíbrio pode ser definido como aquele para qual é nulo o saldo das trocas de água da madeira com o exterior, sob dadas condições ambientais” [3].

Na Figura 2.6 estão representadas as curvas de teor em água da madeira, designadas também por curvas higrométricas.

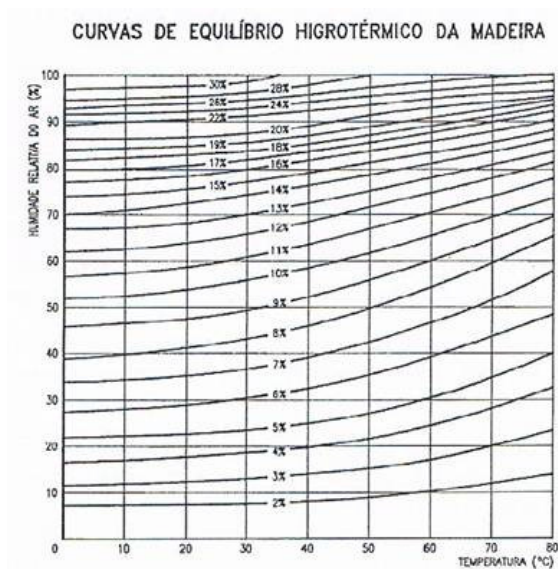


Figura 2.6 – Curvas de teor em água da madeira [1].

Tendo em conta as curvas higrométricas, pode observar-se que o teor de água de equilíbrio aumenta quando aumenta a humidade relativa do ar, mantendo-se constante a temperatura do ar e diminui quando aumenta a temperatura do ar, mantendo-se constante a humidade relativa. Contudo é muito difícil atingir este estado de equilíbrio devido à variabilidade das condições ambientais.

É de salientar que do ponto de vista da engenharia a madeira utilizada deve ter um teor em água o mais próximo possível do teor em água de equilíbrio correspondente à humidade e temperatura verificadas no seu local de aplicação.

As madeiras podem ainda ser agrupadas segundo o seu teor em água, conforme a Figura 2.6

**Tabela 2.2 - Classificação da madeira de acordo com o seu teor em água [3].**

Classe	Teor em água	Comentários	
Madeira saturada	>70	Madeira durante longo tempo imersa em água.	
Madeira verde	PSF - 70	Madeira em pé ou corte recente.	
Madeira semi-seca	23 - PSF	Madeira serrada em verde. Madeiras em ambientes muito húmidos e/ou frequentemente expostos à chuva.	
Madeira seca	18 - 23	Madeira seca (fora do risco de alteração cromática).	Construções não cobertas ou cobertas mas muito expostas (hangares por exemplo).
Madeira seca ao ar	13 - 18	Inverno: 16 – 18 Primavera/ Outono: 14 – 16 Verão: 12 – 14	
Madeira dessecada	0 - 13	Interiores. Ambientes Aquecidos.	
Madeira completamente seca	0	Estabilizada em peso a 103°C. Não é possível de manter em condições ambientes pois a madeira absorverá a água do ar.	

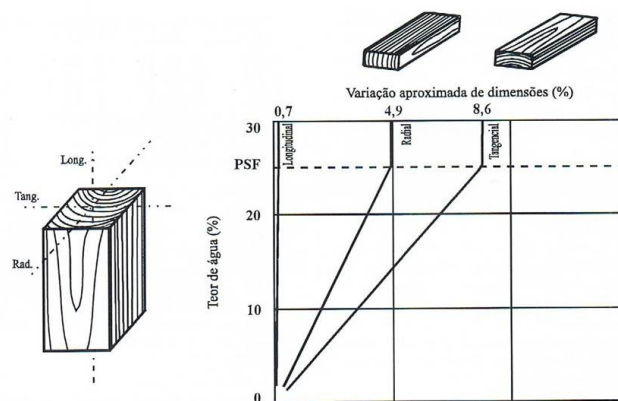
### 2.3.2. Retração e Inchamento da Madeira

A variação do teor em água é um fator bastante condicionante em inúmeras propriedades da madeira, refletindo-se especialmente na alteração das suas dimensões. Devido à estrutura anisotrópica da madeira, a alteração das dimensões varia de forma distinta nas diferentes direções, e depende do volume e características da peça de madeira em causa.

A retração de determinada peça de madeira verifica-se quando existe uma redução das dimensões da mesma, originada pela libertação da água de impregnação, consequência da grande afinidade entre a água e a parede celular. Do mesmo modo pode ocorrer inchamento na madeira, caracterizada pelo aumento das suas dimensões, resultado da absorção de determinada quantidade de água.

Como se pode verificar através da Figura 2.7 as alterações dimensionais ocorrem quando a humidade da madeira varia abaixo do PSF, isto porque enquanto toda a água, que preenche os vazios celulares, não for totalmente perdida não existe retração, ou de modo análogo, dilatação.

Na direção longitudinal a alteração dimensional sofrida não atinge grandes valores, e é a que menos afeta a peça de madeira. Para uma variação de humidade entre os 0% e o PSF a variação dimensional total devido à retração na direção longitudinal é na ordem dos 0,1% a 0,3%, na direção tangencial o aumento está entre os 5% e 10%. O valor da retração na direção radial é cerca de metade da direção tangencial. As grandes variações de dimensões numa peça de madeira podem causar problemas de fendilhação ou de empenos [2].



**Figura 2.7 – Direções tangencial, radial e longitudinal e respetivos coeficientes de retração da madeira [7].**

### 2.3.3. Massa Volúmica e Densidade

A massa volúmica ( $\rho_H$ ) de uma peça de madeira pode ser definida como o quociente entre a sua massa ( $m_H$ ) e o seu volume ( $V_H$ ), sendo geralmente expressa em  $\text{kg/m}^3$  [3]:

$$\rho_H = \frac{m_H}{V_H} \quad (2.2)$$

Dentro de uma dada espécie, a existência de correlação da massa volúmica com a maioria das propriedades mecânicas faz com que seja uma das propriedades físicas mais importantes.

A densidade pode ser definida como o quociente entre o valor da massa específica da madeira e massa específica da água.

A massa volúmica para determinado teor em água pode ser estimada tendo em conta valores de massa volúmica correspondentes a um outro teor em água, recorrendo ao gráfico da Figura 2.8, designado por ábaco de Kollmann.

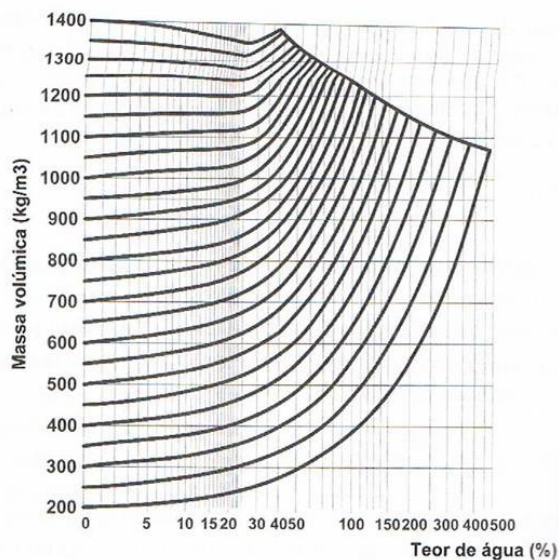


Figura 2.8 – Ábaco de Kollmann [3].

## 2.4. Propriedades mecânicas da madeira

O comportamento mecânico da madeira está relacionado com a sua constituição anatómica. Devido à sua estrutura, a árvore apresenta uma elevada resistência, que permite a sua durabilidade face a esforços a que está sujeita. Esses esforços podem ser de flexão ou compressão e são devidos ao vento e ao peso próprio da árvore, respetivamente.

Como já foi referido, numa árvore diferenciam-se três secções principais (secção radial, tangencial e longitudinal), mas para efeitos práticos interessa considerar as diferentes propriedades em duas direcções, paralela e perpendicular às fibras, já que as propriedades radial e tangencial (perpendicular às fibras) não possuem diferenças tão significativas comparativamente com as propriedades na direcção longitudinal (paralela às fibras) e principalmente as ações mais condicionantes em estruturas de madeira geram tensões segundo as fibras (flexão e esforço axial).

Segundo Paulo Cachim [3], as principais características da madeira no que diz respeito as suas propriedades mecânicas são (comparativamente com outros materiais de construção):

- a) Elevada resistência à flexão (relação entre resistência/peso alta);
- b) Boa capacidade de resistência à tração e à compressão paralela às fibras;
- c) Fraca resistência ao corte;
- d) Fraca resistência à tração e à compressão perpendicular às fibras;
- e) Baixo modulo de elasticidade.

Uma das características da madeira que também condiciona a sua resistência é a sua grande variabilidade. Esta variabilidade é devido à existência de inúmeras espécies de árvores e também ao facto do seu desenvolvimento depender das condições ambientais do meio onde está inserida. A presença de defeitos no elemento de madeira também constitui um problema no que respeita à sua resistência, e será analisado posteriormente neste trabalho.

Assim sendo, surgiu a necessidade de criar regulamentação para o dimensionamento de estruturas de madeira considerando diferentes classes de resistência, tornando possível a existência de várias classes de resistência da madeira [3].

#### 2.4.1. Resistência à Tração

- *Paralela à fibra*

Uma peça de madeira pode atingir grandes valores de resistência quando sujeita a esforços de tração, chegando a atingir valores semelhantes da resistência à flexão, se não tiver defeitos. A forma direta de determinar a resistência à tração de uma peça de madeira é através de métodos apresentados na norma europeia EN 408: 2003 [8]. Na Tabela 2.3 apresentam-se valores de tensão de rotura de algumas espécies de madeira. Contudo, o facto de existirem mudanças de secção e orifícios, que não permitem a continuidade da estrutura da madeira, dificulta, por vezes, o cálculo direto dos valores da resistência à tração.

Por este motivo a resistência à tração paralela à fibra é determinada através de ensaios de flexão estabelecendo posteriormente a correlação entre eles [3].

A relação entre a resistência característica à flexão paralela ( $f_{m,k}$ ) e tração paralela ( $f_{t,0,k}$ ) é dada por [8]:

$$f_{t,0,k} = 0,6f_{m,k} \quad (2.3)$$

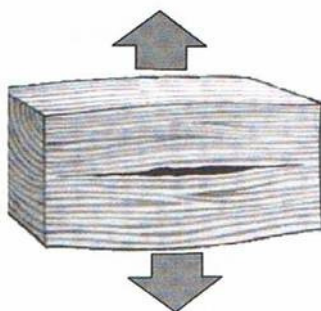
**Tabela 2.3 – Tensão média de rotura à tração de algumas espécies de madeira [3].**

Espécie de madeira	Tensão de rotura à tração (MPa)
Carvalho	90
Casquinha	100
Faia	140
Freixo	100
Nogueira	140
Pinho	90

- *Perpendicular à fibra*

Na direção perpendicular à fibra os valores de resistência são bastante mais pequenos comparativamente com os verificados na direção paralela. Na direção paralela os valores de resistência à tração característicos variam entre os 8 e os 40 MPa, enquanto que na direção perpendicular variam entre os 0,4 e 0,6 MPa. Esta diferença entre os valores de resistência deve-se ao reduzido número de fibras com a direção radial e tangencial e à falta de travamento das fibras longitudinais na direção perpendicular ao eixo da árvore [3].

A Figura 2.9 mostra o comportamento da madeira quando solicitada a esforços de tração perpendicular à fibra:



**Figura 2.9 – Tração perpendicular à fibra [3].**

#### 2.4.2. Resistência à Compressão

- *Paralela à fibra*

A resistência à compressão paralela à fibra da madeira é elevada, mas ainda assim menor que a resistência à flexão.

O cálculo direto da resistência à compressão da madeira pode ser avaliado através das normas EN 408:2003 [8] ou a NP 618:1973 [9], a diferença entre elas reside no tipo de provetes utilizados. Na norma europeia podem ser utilizados elementos com qualquer secção desde que o comprimento exceda 6 vezes a menor dimensão transversal, enquanto que a norma portuguesa utiliza provetes com uma secção de 60x20x20 mm<sup>3</sup>.

Tal como na resistência à tração existe também um método indireto de calcular a resistência característica de compressão paralela ( $f_{c,0,k}$ ), utilizando os valores da resistência característica à flexão ( $f_{m,k}$ ) através de [8]:

$$f_{c,0,k} = 5f_{m,k}^{0,45} \quad (2.4)$$

- *Perpendicular à fibra*

Os valores da resistência à compressão perpendicular à fibra são menores que na direção paralela. Este facto deve-se ao menor número de fibras com a direção perpendicular ao eixo da árvore e na falta de travamento das fibras longitudinais, tal como foi dito anteriormente para a tração.

A Figura 2.10 mostra o comportamento da madeira quando solicitada a esforços perpendiculares de tração [3].

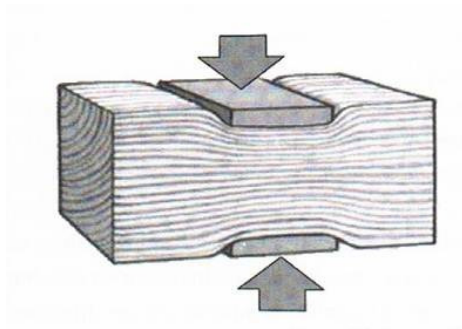


Figura 2.10 – Compressão perpendicular à fibra [3].

### 2.4.3. Resistência ao Corte

A resistência ao corte na madeira é reduzida, podendo existir tensões de corte no plano longitudinal (corte axial) ou transversalmente (corte transversal) a este, como mostra a Figura 2.11.

Quando a rotura ocorre no plano longitudinal, as fibras da madeira deslizam entre si, podendo o escorregamento ocorrer na direção paralela ou perpendicular às fibras. A rotura no plano transversal ocorre quando as fibras são submetidas a um esforço atuante perpendicular a estas.

O corte transversal às fibras não é relevante porque não chega a ocorrer, a rotura ocorre primeiro por corte axial.

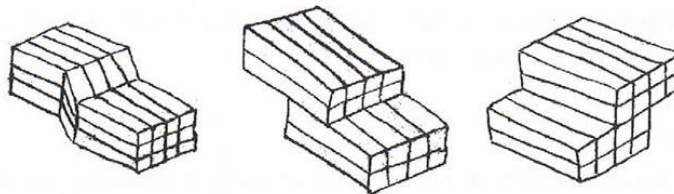


Figura 2.11 – Diferentes modos de rotura por corte [3].

O esforço de corte juntamente com a flexão surge quando as peças de madeira são flectidas.

O valor da resistência da madeira ao corte é dado pelo plano em que se verifica a rotura.

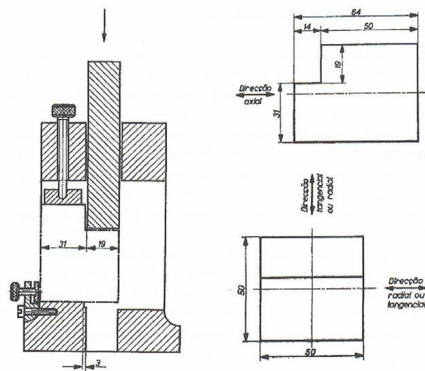
Segundo a EN 384:1995 [10], o cálculo da resistência característica ao corte ( $f_{v,k}$ ) pode ser feito utilizando a resistência característica à flexão ( $f_{m,k}$ ) da seguinte forma:

$$f_{v,k} = 0,2f_{m,k}^{0,8} \quad (2.5)$$

A Figura 2.12 ilustra o dispositivo que é utilizado para a realização do ensaio de corte em madeiras livres de defeitos, segundo a norma NP 623:1973 [11]. A tensão de corte para uma madeira, com determinado teor em água ( $\tau_{v,H}$ ), é dada por:

$$\tau_{v,H} = \frac{3F}{2ab} \quad (2.6)$$

em que  $F$  é a força atuante e  $ab$  a área de corte [11].

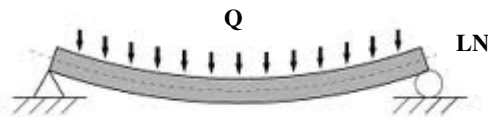


**Figura 2.12 – Dispositivo para determinação da resistência ao corte e dimensões do provete [11].**

#### 2.4.4. Resistência à Flexão

Grande parte dos elementos estruturais estão sujeitos a forças de flexão. Deste modo, a resistência à flexão é uma das propriedades mais importantes da madeira. Quando determinada peça está sujeita à flexão podem desenvolver-se três tensões básicas, tensões de compressão, tração e corte.

Como ilustrado na Figura 2.13, uma viga simplesmente apoiada sujeita a uma carga  $Q$  uniformemente distribuída ao longo da viga, gera tensões de compressão na fibra superior à linha neutra e tensões de tração na fibra inferior à linha neutra. A linha neutra é representada por LN e ao longo dessa linha as tensões são nulas, tal como se pode verificar através do diagrama de tensões da Figura 2.14. O esforço de corte é máximo na linha neutra e nulo na superfície.

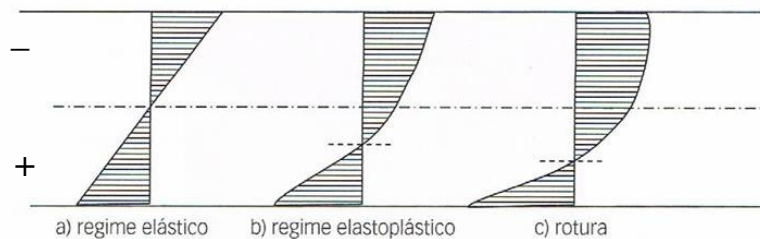


**Figura 2.13 – Flexão de uma viga simplesmente apoiada, adaptado de [12].**

Como foi referido anteriormente, os esforços de flexão provocam tensões de tração e de compressão. Contudo, a resistência à flexão da madeira não pode ser avaliada segundo as tensões de rotura à tração e à compressão, dado que o comportamento mecânico é diferente.

O valor da resistência da madeira à compressão é menor que a resistência à tração, logo o limite à compressão é atingido em primeiro lugar, o que faz com que as fibras superiores comecem a plastificar e haja um deslocamento da linha neutra na direção das fibras tracionadas, conforme ilustrado na Figura 2.14. A rotura acaba por ocorrer quando é atingida a tensão de rotura à tração [3].

Como já foi referido, todos os parâmetros de resistência da madeira (compressão, tração e corte) podem ser determinados em função da resistência à flexão. É de salientar que a distribuição de tensões numa viga depende da geometria e posição da carga.



**Figura 2.14 – Diagramas de distribuição de tensões em peças de madeira fletidas [3].**

No cálculo da resistência à flexão os ensaios são feitos através de prismas retangulares onde são aplicadas diferentes cargas, usualmente em três ou quatro pontos, as quais vão crescendo até que seja atingida a tensão de rotura.

Segundo a norma NP 619:1973 [13] a resistência à rotura da madeira sem defeitos à flexão pode ser obtida através do ensaio ilustrado na Figura 2.15. De forma a ter em conta o comportamento não linear da madeira, a norma considera a tensão de rotura ( $\sigma_{m,H}$ ), para determinado teor em água  $H$ , como [13]:

$$\sigma_{m,H} = 1,5 \frac{Fl}{bh^{5/3}} \quad (2.7)$$

em que  $F$  é a carga aplicada, o  $l$  é o comprimento do vão,  $b$  a largura e  $h$  a altura da secção transversal.

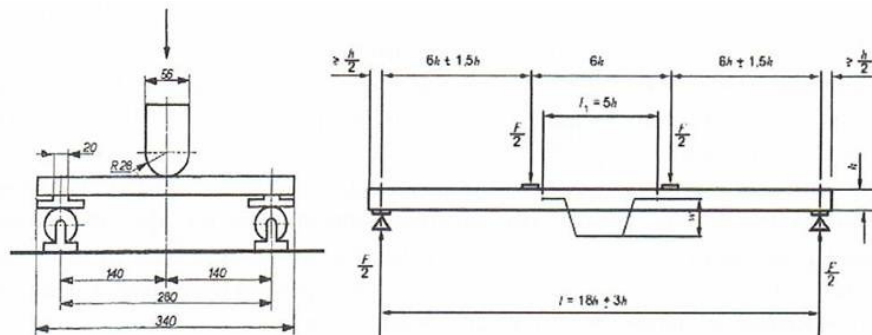


Figura 2.15 – Dispositivos para determinação da resistência à flexão [813].

Para o cálculo da resistência da madeira à flexão para elementos estruturais, é necessário realizar os ensaios em peças de maior dimensão. Neste caso o ensaio deve ser feito através da norma EN 408:2003 [8] em se utiliza o dispositivo ilustrado na Figura 2.15. Este dispositivo só pode ser utilizado em peças cujo vão seja pelo menos 15 vezes a sua altura, de forma a obter um comportamento mais próximo do comportamento linear.

Segundo a EN 408, a resistência à flexão ( $f_m$ ) pode ser calculada como:

$$f_m = 3 \frac{aF}{bh^2} \quad (2.8)$$

em que  $a$  representa a distância do eixo do apoio ao ponto de aplicação das cargas e os restantes símbolos têm o significado anteriormente descrito.

#### 2.4.5. Módulo de Elasticidade

A elasticidade de um material é a capacidade que este tem de recuperar a sua forma e dimensão inicial depois de removida a carga/força.

O parâmetro que habitualmente se usa para caracterizar a elasticidade de um material é o módulo de elasticidade,  $E$ . Através do valor do módulo de elasticidade é possível determinar a deformação esperada para diferentes combinações de carga, permitindo assim antever o comportamento do material [2].

Apesar dos valores do módulo de elasticidade em compressão e em tração serem diferentes, na prática, adota-se um valor intermédio para o módulo de elasticidade na direção paralela à fibra.

O cálculo dos diferentes módulos de elasticidade pode ser feito através da norma EN 408:2003 [3].

#### 2.4.6. Módulo de Distorção e Coeficiente de Poisson

Devido à anisotropia da madeira o módulo de distorção,  $G$ , não pode ser directamente determinado pela relação da teoria da elasticidade, em que temos:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (2.9)$$

em que  $E$  é o módulo de elasticidade e  $\nu$  o coeficiente de Poisson.

Assim, o coeficiente de distorção pode ser determinado através de ensaios de laboratório ou calculado através de uma relação presente na norma EN 384:1996 [10] dada por:

$$G = \frac{E}{16} \quad (2.10)$$

Sendo que, na prática, o módulo de elasticidade considerado é o da direcção longitudinal [10].

valor intermédio para o módulo de elasticidade na direcção paralela à fibra Na Tabela 2.4 apresentam-se valores de algumas constantes elásticas utilizadas em cálculo estrutural.

**Tabela 2.4 – Valores das constantes elásticas da madeira usualmente utilizados [3].**

	$E_L/E_R$	$E_L/E_T$	$E_R/E_T$	$\nu_{RT}$	$\nu_{LT}$	$\nu_{LR}$	$\nu_{TR}$	$\nu_{RL}$	$\nu_{TL}$	$E_L/G_{TL}$	$G_{TL}/G_{LR}$	$G_{TL}/G_{RT}$
Resinosas	13,0	21,0	1,6	0,51	0,43	0,39	0,31	0,03	0,02	17,25	0,86	8,9
Folhosas	8,0	13,5	1,7	0,67	0,46	0,39	0,38	0,048	0,033	15,2	0,77	2,6

Os índices  $L$ ,  $R$  e  $T$  presentes nas diversas grandezas correspondem às direcções longitudinal, radial e tangencial, respetivamente.

O coeficiente de Poisson,  $\nu$ , é uma constante elástica que resulta da relação entre determinada deformação numa direcção e a deformação numa direcção que lhe seja perpendicular. Esta relação é dada por:

$$\nu_{ij} = -\frac{\varepsilon_{ii}}{\varepsilon_{jj}} \quad (2.11)$$

em que  $\varepsilon_{ii}$  é a deformação na direcção perpendicular à aplicação da carga e  $\varepsilon_{jj}$  corresponde à deformação na direcção da carga aplicada [2].

A lei de Hooke generalizada que relaciona as tensões e as extensões, pode relativamente aos três eixos exprimir-se através de [3]:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_R \\ \varepsilon_T \\ \gamma_{RT} \\ \gamma_{TL} \\ \gamma_{LR} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_L & -\nu_{RL}/E_R & -\nu_{TL}/E_T & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{LR}/E_L & 1/E_R & -\nu_{TR}/E_T & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{LT}/E_L & -\nu_{RT}/E_R & 1/E_T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{RT} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{TL} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{LR} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_R \\ \sigma_T \\ \tau_{RT} \\ \tau_{TL} \\ \tau_{LR} \end{Bmatrix} \quad (2.12)$$

Dado que o tensor das deformações é simétrico, as doze constantes elásticas são reduzidas apenas a nove, que correspondem a três módulos de elasticidade, três módulos de distorção e três coeficientes de Poisson.

As relações entre os coeficientes de Poisson resultantes da simetria do tensor das deformações são dadas por [2]:

$$\frac{\nu_{LR}}{E_L} = \frac{\nu_{RL}}{E_R} ; \frac{\nu_{LT}}{E_L} = \frac{\nu_{TL}}{E_T} ; \frac{\nu_{RT}}{E_R} = \frac{\nu_{TR}}{E_T} \quad (2.13)$$

#### 2.4.7. Dureza

A dureza de um material é uma propriedade físico-mecânica que está relacionada com a resistência que esta possui à penetração de corpos estranhos. Esta propriedade está também relacionada com dificuldades de laboração, tais como aplainar, furar, pregar, etc.

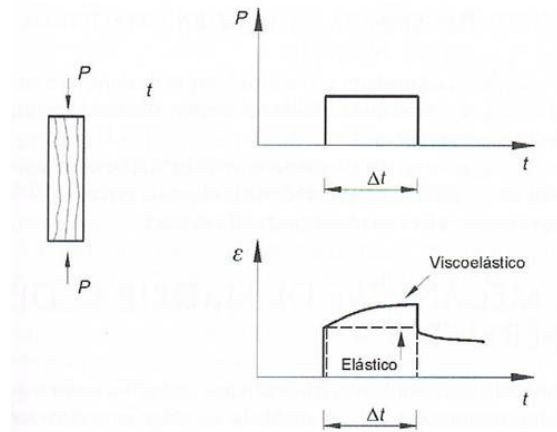
Pode ainda afirmar-se que a dureza da madeira está relacionada com o seu peso e densidade. Madeiras mais pesadas e mais densas possuem um maior grau de dureza [3].

As madeiras brandas existentes são nomeadamente o choupo ou pinho, as de dureza média são por exemplo a nogueira e algumas madeiras como o carvalho, freixo, faia ou a oliveira possuem maior dureza [2].

#### 2.4.8. Fluência

A fluência é uma propriedade mecânica do material que se baseia na variação da deformação ao longo do tempo, sob ação de uma carga constante.

A madeira é um material viscoelástico, e portanto a sua deformação depende do carregamento, como ilustrado na Figura 2.16. Além da deformação elástica, o facto de ser um material viscoelástico, significa que sofre um acréscimo de deformação ao longo do tempo, mesmo submetida a uma carga constante. Quando a carga é removida, só parte da deformação recuperada, continuando a existir um resíduo de deformação que varia com o tempo [14].



**Figura 2.16 – Comportamento de material viscoelástico sob carga constante [14].**

A Figura 2.17 representa a deformação de determinado elemento de madeira ao longo do tempo,  $t$ , sujeito à ação de um carregamento crescente e mantido constante após um certo intervalo de tempo. Segundo o gráfico, a curva 1 é representativa dos valores de carga que provocam tensões mais elevadas. A deformação aumenta uniformemente até próximo do ponto de rotura, onde se verifica um elevado incremento da deformação. Para cargas usadas habitualmente em projeto, a variação da deformação está ilustrada na curva 2. Nesta mesma curva, estão representados dois tipos de deformação, nomeadamente a deformação elástica,  $\delta_{el}$ , e a deformação de fluência,  $\delta_c$  [14].

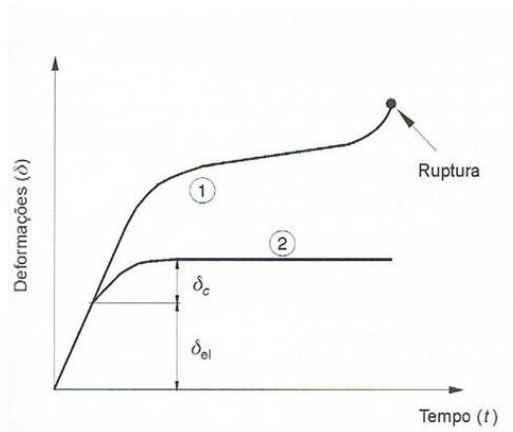


Figura 2.17 – Fluência da madeira [14].

A deformação elástica cresce linearmente até determinado ponto e posteriormente dá-se a deformação de fluência que cresce assintoticamente, estabilizando-se a deformação total,  $\delta_{tot}$ , em determinado valor:

$$\delta_{tot} = \delta_{el} + \delta_c \cong \delta_{el}(1 + \varphi) \quad (2.14)$$

onde  $\varphi$  é o coeficiente de fluência.

## 2.5. Principais fatores que condicionam o comportamento da madeira

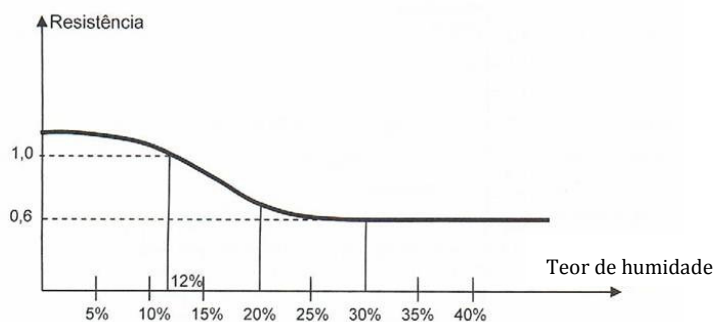
No presente capítulo pretende fazer-se uma descrição dos principais fatores físicos que condicionam o comportamento mecânico da madeira. No que respeita ao dimensionamento de estruturas, as propriedades da madeira são normalmente modificadas devido à qualidade da mesma, às condições ambientais a que está sujeita, ao tempo de aplicação das cargas e à dimensão do elemento em causa. Dado que a qualidade da madeira é um fator de elevada importância irá ser abordado num capítulo separado.

### 2.5.1. Teor de humidade

O teor em humidade na madeira é um fator que condiciona bastante o comportamento e as propriedades da madeira. Devido ao aumento do teor em água, a resistência e o módulo de

elasticidade da madeira também diminui para valores de teor em água abaixo do ponto de saturação das fibras, PSF. Quando o teor em água é superior ao PSF, o volume e a massa específica da madeira não são alterados e portanto a resistência mantém-se constante.

Pode considerar-se linear a variação das propriedades da madeira livre de defeitos com o teor em água para valores compreendidos entre 8 e 20%, como representado na Figura 2.18 [3].



**Figura 2.18 – Efeitos do teor em humidade na resistência da madeira [3].**

Através da lei da variação das propriedades da madeira com a humidade entre os 8 e os 20%, é possível obter valores de resistência para determinados teores em humidade, corrigindo-se os valores da resistência para humidade padrão ( $\sigma_{12}$ ).

Segundo a norma portuguesa, a relação entre a resistência a um dado teor de humidade, e a resistência a 12% do teor em humidade, é obtida através de:

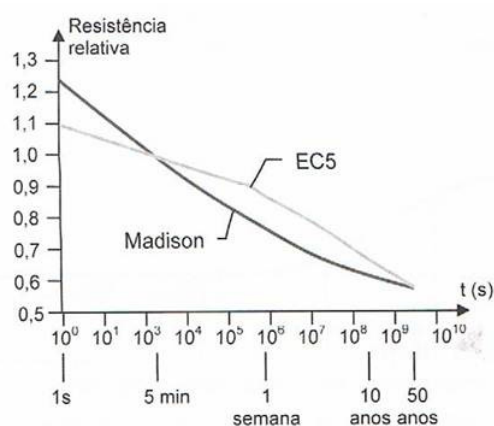
$$\sigma_{12} = \sigma_H(1 + k_i(H - 12)) \tag{2.15}$$

em que  $k_i$  é um parâmetro a ser experimentalmente determinado tendo em conta a propriedade em causa e que varia entre 0,02 e 0,05 consoante o tipo de esforço considerado e H o valor da humidade expresso em percentagem [3].

### 2.5.2. Duração da carga

A duração da carga é também um fator determinante na capacidade resistente da madeira, uma vez que um elemento tem menor resistência quando sujeito a uma carga que atua num largo período de tempo. A influência do tempo de duração da carga foi verificada experimentalmente através de ensaios. Concluiu-se que um determinado elemento sujeito a uma carga permanente poderá suportar cerca de 60% da carga de rotura num ensaio de curta duração.

O efeito da duração da carga na resistência mecânica da madeira foi alvo de várias investigações, obtendo-se inicialmente a curva de Madison, que ilustra a perda de resistência da madeira em função da duração de aplicação da carga. Posteriormente concluiu-se que o efeito de duração das cargas era menos acentuado (Figura 2.19), e atualmente utiliza-se essa relação na regulamentação europeia [3].



**Figura 2.19 – Perda de resistência da madeira em função da duração de aplicação da carga [3].**

### 2.5.3. Efeito de escala

O efeito de escala está diretamente relacionado com a dimensão do elemento de madeira.

O efeito de escala justifica-se com base na teoria da rotura frágil, a rotura inicia-se no elemento mais fraco. No caso da madeira, essa rotura estabelece-se em zonas onde existam irregularidades na estrutura em locais críticos, nomeadamente nos cantos dos elementos. Contudo, quanto maior for o elemento, maior é a probabilidade de existirem irregularidades no mesmo. Assim, a quantificação do efeito de escala não pode ser feita de forma linear. Trata-se de um fenómeno bastante complexo que depende de diferentes fatores, entre os quais o tipo de solicitação, a espécie da madeira, a qualidade da madeira, etc. [3].

## 2.6. Classificação da madeira

Para que a madeira possa ser utilizada como material estrutural é importante conhecer as suas propriedades de resistência e rigidez. A madeira é um material natural, que apresenta uma enorme variabilidade de propriedades devido a fatores de crescimento, nomeadamente, a espécie da árvore, condições ambientais de desenvolvimento, etc., e também fatores que se prendem com a alteração da estrutura macroscópica devido aos processos de serragem, pois podem alterar a trajetória natural das tensões ao longo das fibras. Consequentemente, é muito difícil o conhecimento completo de todas as propriedades da madeira

O processo de classificação da madeira é realizado com base em características desta, capazes de permitir estimar a sua resistência. Esta classificação não pode ser realizada através de processos destrutivos, uma vez que a madeira tem de ficar apta para ser utilizada e, devido à grande variabilidade das propriedades da madeira, cada peça tem de ser classificada individualmente. A classificação da madeira pode ser feita de duas formas, através da classificação visual e da classificação mecânica. O método de classificação visual é realizado através do exame das peças, em que é necessário que estas não possuem defeitos para além de determinados limites. No método de classificação mecânica as peças são ensaiadas de forma não destrutiva, onde se medem diversas propriedades, com o objetivo de se estimar a resistência e a rigidez destas [3].

### 2.6.1. Defeitos da madeira

Os defeitos da madeira são todas as singularidades que uma peça apresenta que podem comprometer total ou parcialmente a sua utilização. As singularidades de crescimento, também designadas defeitos da madeira, provocam uma diminuição das suas propriedades físicas e mecânicas. Segundo Paulo Cachim [3] e tendo em conta a norma NP 180:1962 [15] os vários tipos de anomalias e defeitos da madeira são agrupados em quatro grupos:

- a) Anomalias e defeitos relacionados com a estrutura do lenho ou com particularidades da morfologia da árvore;
- b) Anomalias e defeitos resultantes de práticas culturais, de acidentes meteorológicos ou de outras influências externas;
- c) Anomalias e defeitos devidos ao ataque de fungos ou de animais xilófagos;
- d) Anomalias e defeitos devidos ao abate, à secagem e à laboração.

De seguida descrevem-se alguns dos principais defeitos da madeira com elevada importância no comportamento estrutural, bem como os parâmetros a considerar para efeitos de classificação visual e respetivos critérios de medição.

- *Nós*

A presença de nós numa peça de madeira é o que mais afeta a sua resistência, sendo mais prejudicadas as madeiras de Resinosas [1]. Os nós são constituídos pela porção da base de um ramo inserida no tronco da árvore. Esta porção de massa tem um desenvolvimento cónico, em que o seu vértice se encontra na medula ou próximo dela, como representado na Figura 2.20 [5].

A influência negativa dos nós na resistência mecânica da madeira é devida a um desvio das fibras de madeira em seu redor e por estes serem constituídos por fibras perpendiculares à direção geral do fio da peça, e portanto o material que constitui o nó não contribui para a resistência da peça. Assim, os nós são estimados pela área da secção transversal que ocupam, não se fazendo qualquer distinção entre buracos de nós, nós mortos ou vivos [16].

A avaliação dos limites impostos aos nós ou grupos de nós para utilizações estruturais, é feita através da percentagem de secção transversal que estes ocupam, normalmente designada por KAR (Knot Area Ratio) [5]. Existem dois tipos de KAR, o KAR total é a proporção da secção transversal de um elemento de madeira ocupada pela projeção de um nó ou grupo de nós, e o KAR marginal que é referente à maior proporção de uma secção marginal (zonas vizinhas dos cantos de uma secção transversal e que ocupam um quarto da superfície transversal total da peça) de uma peça ocupada pela projeção de um nó ou grupo de nós.

Entende-se como nós agrupados quando a disposição destes está bastante próxima e as fibras estão infletidas em torno do seu grupo. Caso contrário, avaliação é feita individualmente [16].

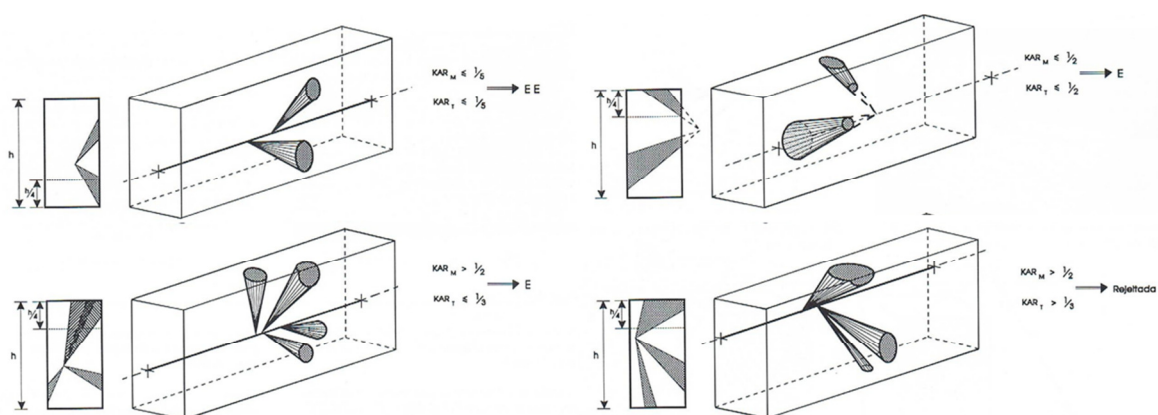


Figura 2.20 – Projeção dos nós para diferentes localizações da medula, avaliação dos KAR marginal e total e correspondente classificação da peça em termos de nós [16].

- *Fio*

O fio da madeira é a orientação geral das fibras em relação ao eixo longitudinal da peça. A anomalia neste caso é devida ao ângulo que fazem entre eles, que leva a um afastamento ideal de aplicação de esforços, que seria a orientação das fibras coincidente com o eixo longitudinal da peça, provocando assim uma diminuição da resistência da peça [5].

O valor da inclinação é medido através de uma ferramenta denominada riscador, que é constituída por uma haste, que numa das pontas tem uma agulha e na outra extremidade um manípulo que roda de forma a não causar influencia na direção seguida pela agulha. A medição deve ser feita num comprimento razoável de forma a serem ignoradas possíveis deformações locais [16].



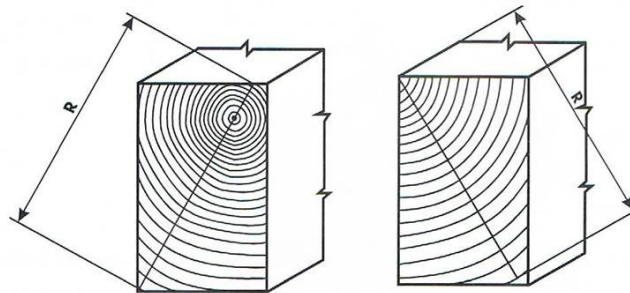
$$\text{Fio} = BC/AC$$

**Figura 2.21 – Medição do fio [16].**

- *Taxa de crescimento*

A taxa de crescimento é avaliada pela largura média, em milímetros, dos anéis de crescimento anuais. Essa medição é feita sobre a maior linha radial possível de traçar em qualquer um dos topos [16], conforme a Figura 2.22.

A taxa de crescimento, não é propriamente um defeito, mas é um parâmetro bastante importante para a determinação da massa volúmica da madeira, fator que influencia a resistência e o módulo de elasticidade desta [5].



$$\text{Taxa de crescimento} = R \text{ (mm)/n.º de anéis de crescimento anual na linha de comprimento R}$$

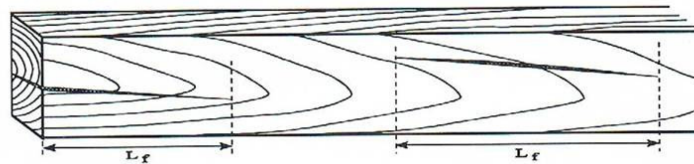
**Figura 2.22 – Medição da taxa de crescimento [16].**

- *Fendas*

As fendas constituem descontinuidades presentes na madeira que quando associadas a outros defeitos podem diminuir a resistência de uma peça. As fendas podem ocorrer devido a diversos fatores, tais como, tensões de crescimento, presença de nós, secagem rápida, etc.. As fendas ocorrem na direção das fibras de madeira provocando a sua separação [1].

O comprimento da fenda é a distância entre duas linhas perpendiculares à fibra que a delimitam, como ilustrado na Figura 2.23.

Existe dois tipos de fendas, as repassadas e não repassadas. As fendas repassadas ocorrem nas duas superfícies opostas da peça [16].



$L_f$  = Comprimento da fenda

**Figura 2.23 – Medição das fendas [16].**

- *Descaio*

O descaio é um remanescente na superfície do toro na peça, devido ao corte da madeira junto à extremidade do tronco. Essa remanescência provoca uma perda de secção transversal que pode afetar as propriedades mecânicas da peça. Em obra, podem originar dificuldades de aplicação na zona de apoio, bem como insuficiência de material para efetuar a ligação [3].

A avaliação do descaio é obtido através do quociente entre a projeção do descaio na face (canto) e a largura total dessa face (canto) [16].

Quando o descaio está localizado na face do elemento a sua importância exprime-se através da relação:

$$\frac{V_1}{h} \text{ ou } \frac{V_2 + V_3}{h} \quad (2.16)$$

E quando este se encontra no canto da peça é traduzido por:

$$\frac{b - K_1}{b} \text{ ou } \frac{K_2 + K_3}{b} \quad (2.17)$$

Sendo que as variáveis acima mencionadas são as representadas na Figura 2.24.

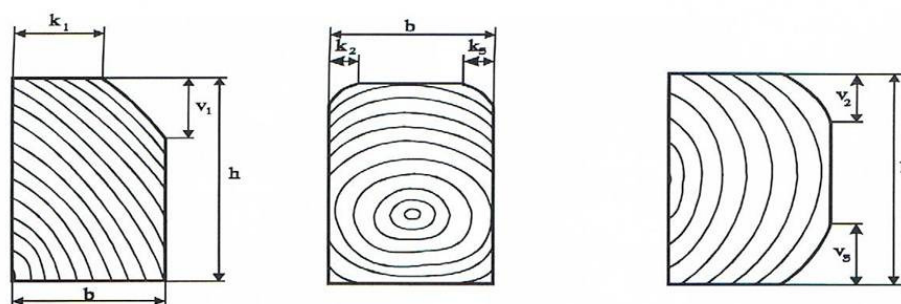


Figura 2.24 – Medição do descaio [16].

- *Empenos*

Os empenos são deformações em peças de madeira resultantes da variação do teor de água durante a secagem e o acondicionamento do material na fase de armazenamento.

Os empenos não reduzem de um modo direto a resistência do material, a sua limitação prende-se com a possível dificuldade de utilização em obra e questões funcionais [3].

Na Figura 2.25, estão representados os vários métodos para a avaliação de empenos. Quando estes são em arco de face, de canto e em hélice são medidos num comprimento de dois metros, quando se verifica empeno em meia cana utiliza-se toda a largura da peça [16].

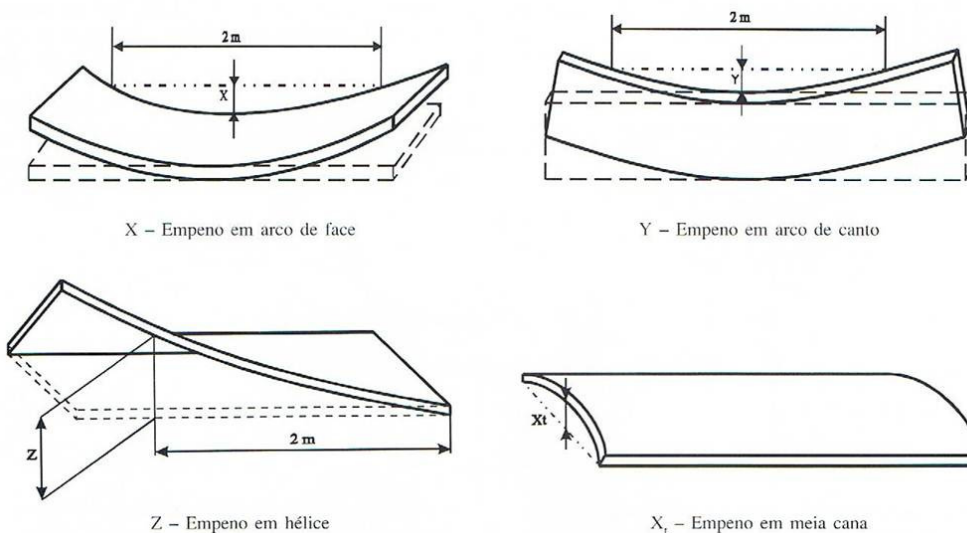


Figura 2.25 - Medição de empenos [16].

- *Bolsas de resina e casca inclusa*

As bolsas de resina estão presentes na madeira com origem nas Resinosas e promovem um efeito semelhante aos nós, a sua presença provoca um desvio do fio da madeira, formando um ponto fraco que poderá originar a rotura [3].

A medição das bolsas de resina e da casca inclusa é feita da mesma forma que para as fendas, onde devem ser obedecidos determinados limites. Quando estes defeitos ocorrem junto de nós também devem ser contabilizados na avaliação do KAR [16].

- *Medula*

A medula é a núcleo do lenho que é primariamente formado, ao redor do qual se formam os anéis de crescimento.

A medula não é um defeito, mas sim o lenho juvenil que lhe está associado e portanto é um parâmetro que depende do tipo de madeira. O lenho juvenil é caracterizado por ter uma parede celular menos espessa e um fio com maior inclinação comparativamente ao lenho adulto o que faz com que este apresente reduções no valor da resistência e aumentos da retração longitudinal [16].

## 2.6.2. Classificação visual

A classificação visual é uma forma de caracterizar a madeira desde que esta começou a ser utilizada como material estrutural. No início do séc. XX, nos EUA, surgiram as primeiras normas de classificação da madeira. Posteriormente surgiram mais um conjunto de normas que diferiam em muito umas das outras, devido à enorme variabilidade de espécies de madeira, às diferentes propriedades, bem como as distintas soluções construtivas existentes.

O único ponto em comum de todas as normas existentes é a limitação de uma classificação visual, pois só é possível classificar os defeitos reconhecíveis visualmente [5].

Devido à existência de inúmeras normas de classificação visual, surgiu a necessidade de criar uma única norma com o objetivo de harmonizar todos os critérios de análise e criar parâmetros a cumprir, tanto para as folhosas como para as resinosas e que permitisse a utilização de todas as normas que cumprissem esses critérios. Atualmente, a norma em vigor na Europa é a EN

14081-1:2005 [17], e é responsável pela definição dos requisitos de classificação visual e mecânica a que as normas nacionais têm de obedecer.

Pode entender-se a classificação visual da madeira como um processo simples, de fácil aprendizagem, não necessitando de grandes conhecimentos técnicos, bem como a utilização de equipamento dispendioso. Contudo, este método de classificação, pode ser um processo ineficaz uma vez que propriedades importantes da madeira não são tidas em consideração, nomeadamente a massa específica e a largura dos anéis de crescimento. Outro dos inconvenientes está relacionado com a objetividade da análise, pois está dependente da experiência do responsável pela classificação.

Apesar das vantagens e inconvenientes deste método de classificação, quando corretamente utilizado pode ser um método bastante fiável [3].

### 2.6.3. Classificação mecânica

Nos meados do séc. XX, nos EUA e na Austrália surgiu a ideia de classificar a madeira através de ensaios não destrutivos, de forma a prever a resistência e a rigidez da madeira. Esta ideia surgiu em consequência da necessidade de melhorar a classificação da madeira a fim de motivar a sua melhor utilização.

Neste tipo de classificação, e como foi dito anteriormente, pretende-se avaliar não só a resistência da madeira mas também a rigidez, uma vez que esta também é importante de conhecer e controlar em uso estrutural. Outro dos parâmetros que também se deve analisar é a densidade, dado que se encontra relacionada com a resistência. Assim, pode-se afirmar que a classificação mecânica engloba três parâmetros, a resistência, a rigidez e a densidade [3].

A seleção da madeira para estruturas tendo em conta uma classificação mecânica é realizada através de um sistema de ensaio de flexão, em que cada elemento é sujeito a três pontos de aplicação de carga, utilizando-se um de dois processos: mantém-se a carga constante e mede-se a deformação ou impõe-se uma deformação e mede-se a força necessária para manter essa deformação. A resistência do elemento é calculada através de correlações entre a tensão de rotura em flexão e o módulo de elasticidade, tendo em conta a espécie florestal e a sua dimensão [5]. Outros métodos baseados em ultrassons, vibrações ou micro-ondas também podem ser utilizados para a classificação da madeira [3].

## 2.7. Classes de Qualidade

A classificação de madeira tem como objetivo agrupar determinadas madeiras com propriedades mecânicas semelhantes, respeitando diversos limites estabelecidos. Esta classificação pode ser feita com base em normas de classificação visual ou mecânica, tendo em conta as espécies existentes e a sua origem, que determinam as várias Classes de Qualidade.

Entende-se por Classe de Qualidade toda a madeira de uma espécie ou de espécies equivalentes (igual comportamento mecânico) que é classificada como de determinada qualidade tendo em conta regras de limitação de defeito segundo uma classificação mecânica [18].

Em Portugal, a NP 4305 [19] define duas classes de qualidade para o Pinho bravo, classificadas como E (classe para estruturas) e EE (classe especial para estruturas). Esta classificação é feita mediante os limites estabelecidos no Quadro A.1 do Anexo, segundo os parâmetros que são analisados visualmente, nomeadamente os nós existentes, taxa de crescimento, inclinação do fio, etc.. Os valores característicos de resistência mecânica, para as Classes de Qualidade acima referidas, foram avaliadas segundo um conjunto de ensaios sobre elementos estruturais e constam da Ficha LNEC M2: “Pinho bravo para estruturas.” (Quadro A.2 do Anexo) [5].

No que respeita aos outros tipos de madeira, os limites para a sua caracterização bem como as Classes de Qualidade respetivas, vêm listados em anexo no *pr*EN1912. A classificação mecânica é feita conhecendo *a priori* a Classe de Qualidade, que conduz a um elemento com propriedades mecânicas já conhecidas [18].

## 2.8. Classes de Resistência

A classificação de um elemento de madeira através de Classes de Resistência é bastante mais simples, porque permite agrupar diferentes peças tendo em conta as suas propriedades físicas e mecânicas, sem que seja necessário o conhecimento de todas as espécies. Esta classificação permite um maior aproveitamento das propriedades da madeira. O agrupamento das variadas madeiras nas diversas classes facilita o trabalho de a utilizar, pois já não tem que ter em conta as diversas espécies, a origem e a resistência [3].

Segundo a EN 338 [20] são estabelecidas nove Classes de Resistência para as Resinosas e seis para as Folhosas. As Resinosas e as Folhosas são classificadas separadamente porque as Folhosas têm valores de densidade maiores, o que não significa que sejam mais resistentes ou que possuam maior elasticidade [18].

Segundo Paulo Cachim [3], os principais defeitos que servem de base para a determinação das classes de resistência são:

- a) Limitações por fatores redutores de resistência – nós, fio, densidade ou velocidade de crescimento e fissuras;
- b) Limitações por fatores geométricos – descaio e distorções;
- c) Limitações por fatores biológicos – ataque de fungos e insetos;
- d) Outros fatores – madeira com origem em árvores de tronco curvo, danos mecânicos.

O Quadro A.3 do Anexo mostra algumas propriedades mecânicas das Classes de Resistência mais utilizadas.

Na norma *pr*EN 1912, estão descritas as madeiras mais utilizadas em estruturas, bem como a correspondência entre Classe de Qualidade e Classe de Resistência, que podem ser analisadas através do Quadro A.4 do Anexo [18].

## **2.9. Classes de Serviço e Classes de Duração das Ações**

Segundo o Eurocódigo 5 [21], as classes de serviço têm como principal objetivo a definição das propriedades mecânicas dos materiais, bem como o cálculo das deformações para determinadas condições ambientais.

As três classes de serviço existentes são [21]:

- Classe de serviço 1: O teor em água dos materiais corresponde ao teor em água de equilíbrio para um ambiente caracterizado por uma temperatura de 20°C e uma humidade relativa do ar ambiente excedendo 65% somente durante algumas semanas por ano.
- Classe de serviço 2: O teor em água dos materiais corresponde ao teor em água de equilíbrio para um ambiente caracterizado por uma temperatura de 20°C e uma humidade relativa do ar ambiente excedendo 85% somente durante algumas semanas por ano.
- Classe de serviço 3: Caracterizada por condições climáticas conduzindo a valores do teor de água dos materiais superiores aos que se verificam na classe de serviço 2.

Todas as estruturas devem estar inseridas numa classe de serviço, podendo numa estrutura complexa haver lugar à consideração de várias classes [1]. Por exemplo, se um determinado elemento de madeira se localizar no interior de um edifício estamos perante uma classe de serviço 1. Podemos ainda, para o mesmo edifício, considerar uma classe de serviço 2 em peças de madeira localizadas na sua cobertura e uma classe de serviço 3 para as varandas.

As classes de duração são caracterizadas, segundo o Eurocódigo 5, pelo efeito que uma ação constante causa quando atua por um certo período de tempo numa estrutura. As ações podem ser consideradas como permanentes quando em toda a sua existência determinada estrutura foi sujeita a essas ações, de longa duração se as ações tiveram duração superior a 10 anos, de média duração quando sujeita a períodos de tempo entre 6 meses e 10 anos, de curta duração para intervalos de 1 semana a 6 meses e finalmente instantânea quando a sua duração não excede 1 semana [21].

A correção para as classes de serviço e de duração das ações é feita através do fator  $k_{mod}$  e  $k_{def}$  que afetam os valores de cálculo das propriedades de resistência e de rigidez, respetivamente [1, 21].

### **3. Fatores de degradação da madeira**

As características e propriedades de um elemento de madeira podem não sofrer perdas significativas ao longo do tempo, como se pode comprovar pelo estado de diversos exemplares de estruturas e artefactos em madeira que existem há milhares de anos e permanecem num bom estado de conservação. Isto deve-se ao facto de tais elementos permanecerem em condições ambientais apropriadas, contudo, em condições desfavoráveis a madeira deteriora-se muito facilmente. A degradação da madeira deve-se à ação de diversos agentes, nomeadamente, físicos, químicos, mecânicos e biológicos a que está sujeita [22].

#### **3.1. Degradação por agentes biológicos**

A degradação por agentes biológicos é o principal fator de deterioração de estruturas de madeira, e decorre da ação de agentes vivos, nomeadamente fungos, térmitas, carunchos e xilófagos marinhos [1].

O principal fator que origina a degradação da madeira por agentes biológicos é a humidade. A humidade, por si só, não causa qualquer degradação da estrutura, contudo potencia o aparecimento e desenvolvimento dos organismos vivos causadores dessa deterioração, começando pelo aparecimento de bolores até à infestação por térmitas. Consequentemente, a humidade é o fator que provoca maiores danos numa estrutura ou em qualquer elemento de madeira presente num edifício. A presença de água nos elementos estruturais pode ser devida a vários fatores, nomeadamente mau uso da construção, falta de ventilação, existência de fendas ou fissuras, problemas de infiltração, telhas partidas na cobertura e muitos outros casos [23].

A presença de água num elemento de madeira nem sempre constitui um problema. Quando esta está imersa não é atacada pelos agentes biológicos referidos anteriormente, contudo se estiver imersa em água salgada pode ser atacada por vários xilófagos marinhos.

Atualmente existe um vasto conhecimento acerca dos diversos agentes biológicos responsáveis pela degradação da madeira e da sua relação com o ambiente e exposição higrométrica. Assim, se forem tidas em conta as regras de conceção iniciais, tais como escolha da espécie em função da classe de risco (NP EN 335-1,2:2006 e NP460:1995 – *Durabilidade natural da madeira maciça. Guia de exigências de durabilidade das madeiras na sua utilização segundo as classes de risco*), a forma de aplicação dos diversos materiais ou a necessidade de tratamentos

preservadores, a probabilidade de ocorrência de casos graves de degradação biológica é mais baixa [23].

### 3.1.1. Durabilidade natural

A durabilidade natural da madeira está relacionada com a capacidade que esta tem de se proteger e conservar, ou seja, é a resistência natural da madeira ao ataque de organismos vivos [5]. A madeira está sujeita a diversas condições ambientais que podem alterar a sua durabilidade natural, dado que a presença de diversos fatores, nomeadamente a humidade, favorece o ataque de agentes biológicos. É de salientar que a durabilidade natural depende da própria espécie e das condições a que está sujeita [18].

As Normas Europeias responsáveis pela definição da durabilidade natural de várias madeiras são as EN 350-1,2:1994,2008 e EN 460. A norma EN 350-1:2008, já considerada Norma Portuguesa (NP EN 350-1:2008), faz referência aos diversos sistemas de avaliação e classificação da durabilidade natural da madeira, ou seja, faz essa classificação tendo em conta a degradação por agentes biológicos, descreve os diversos métodos de ensaio e classifica a madeira conforme os resultados obtidos. A norma 350-2:1994 classifica a durabilidade das várias espécies de madeira. Esta classificação é feita tendo em conta a durabilidade natural do cerne e do borne das diversas espécies de madeira em relação à ação dos agentes biológicos. Nesta norma são também definidas as classes de impregnabilidade para o borne e o cerne, bem como a sua largura consoante a espécie em causa.

A NP EN 460:1995 fornece informações e descrições gerais acerca das classes de risco, das classes de durabilidade, da durabilidade tendo em conta as diversas classes de risco, assim como os fatores significativos na relação entre a durabilidade natural e a duração de serviço esperados nos diversos elementos de madeira utilizados em construção [18, 23].

Como anteriormente referido, a durabilidade natural da madeira depende da espécie florestal e, dentro da mesma espécie, das diferenças entre o borne e o cerne. As características de impregnabilidade também são condicionantes uma vez que determinam a possibilidade de proteção por produtos preservadores [23].

### 3.1.2. Fungos

A madeira pode perder as suas propriedades ou até mesmo ser destruída pela ação de fungos, que a podem atacar quando esta ainda faz parte da árvore, serrada ou depois de aplicada, independentemente do seu grau de resistência natural [5].

No que respeita à durabilidade da madeira quando está sujeita à ação de fungos de podridão, o borne é considerado não durável para todas as espécies e o cerne pode ser muito durável e não durável, consoante a espécie florestal [1].

Os fungos são células filamentosas que invadem a madeira, destruindo parte ou todos os seus constituintes, originando podridões. Assim, a madeira perde alguma ou toda a resistência mecânica, mais lentamente ou rapidamente consoante a sua durabilidade natural é mais ou menos elevada ou o produto preservador for mais ou menos indicado para a situação de risco em causa [3].

Normalmente, é importante fazer a distinção entre os diferentes tipos de fungos, segundo os que provocam manchas azuladas no borne da madeira recém abatida, denominados por Fungos cromogénitos e bolores, daqueles que provocam diferentes tipos de podridão. Entre os fungos de podridão podemos ainda distinguir os microfungos que podem ser fungos imperfeitos ou Ascomicetas, que são responsáveis pelo aparecimento da podridão mole, e os fungos que originam podridões mais frequentes do tipo branca ou castanha, designados por fungos Basidiomicetas [5].

- *Fungos cromogénios e bolores*

Desenvolvem-se na madeira quando está possui teores em água superiores a 25-30%, provocando as manchas azuladas referidas anteriormente. Este tipo de fungo não altera a resistência mecânica da madeira, pois alimenta-se apenas das substâncias contidas nas células lenhosas e pode ser destruído acabando com a fonte de humedificação.

- *Fungos de podridão*

Desenvolvem-se se o teor em água da madeira for superior a 20%, sendo que as condições de desenvolvimento ideais são aquelas a que corresponde um teor em água superior ao ponto de saturação das fibras, PSF. A resistência mecânica da madeira devido ao ataque dos fungos de podridão é gravemente alterada, dado que estes degradam enzimaticamente a parede celular da

madeira [23]. Também a humidade é um fator bastante importante verificando-se, para temperaturas entre os 18 e os 26°C, condições ideais para o desenvolvimento dos fungos [3].

Os fungos de podridão mole desenvolvem-se em madeiras localizadas em ambientes húmidos exteriores. Este tipo de podridão é caracterizado por apresentar uma textura mole no exterior, não perdendo a sua resistência no interior. Se estiver seca pode parecer normal, mas quando se lasca parte-se em muitos fragmentos, se húmida é muito mole e descolorida [23].

Os fungos de podridão castanha são de várias espécies e podem desenvolver-se em ambientes húmidos ou secos. Estes fungos são caracterizados pela sua cor castanha na madeira degradada, apresentam fendas transversais e ao longo do veio que dão origem a uma configuração cubica. Estes fungos destroem a celulose e hemiceluloses presentes nas paredes celulares, deixam a lenhina intacta mas em forma de armação castanha e modificada quimicamente [23].

A podridão seca, tal como o nome indica, desenvolve-se em climas secos e portanto não sobrevive em climas quentes ou tropicais. É um problema que aparece essencialmente em madeiras no Norte da Europa. Trata-se de um fungo bastante perigoso devido à sua facilidade de penetração e propagação através de alvenaria, tijolos, elementos de aço, entre outros, à procura de mais elementos de madeira [23].

A podridão húmida é típica de climas húmidos, nomeadamente em Portugal. Este tipo de podridão aparece em madeiras resinosas e folhosas, ocorrendo maioritariamente nas resinosas. Dado que este tipo de podridão necessita de mais humidade para se desenvolver não possui cordões condutores suficientemente desenvolvidos para penetrar outro tipo de superfícies, a fim de facilitar a sua propagação para outros elementos de madeira [23].

Os fungos de podridão branca atacam a celulose e a lenhina na madeira, fazendo com que a madeira apresente uma cor branca e aparência fibrosa. A podridão branca é mais comum nas madeiras de folhosas [23].

Tal como foi referido anteriormente, os fungos desenvolvem-se sob condições ideais de humidade e temperatura. Para além destes dois fatores, os fungos também necessitam de valores favoráveis de oxigénio, assim como das substâncias existentes na madeira que possibilitam a sua alimentação. A intensidade e propagação do ataque depende da durabilidade natural da madeira em causa, contudo, pode afirmar-se que o crescimento dos fungos na madeira só é possível para humidades superiores a 22% e à temperatura normal do ambiente, entre 10 e 30°C. A inexistência de oxigénio por saturação completa da madeira (razão pela qual os fungos não atacam a madeira que se encontra constantemente imersa em água), bem como a aplicação de temperaturas acima dos 50°C e a secagem da madeira para valores de humidade inferiores a

22% são também fatores limitativos do desenvolvimento dos fungos. Consequentemente pode considerar-se que as madeiras no interior dos edifícios não estão expostas a agentes atmosféricos e, por isso, deverão estar livres do ataque de fungos, a não ser que haja deficiências na construção, nomeadamente infiltrações de água, ascensão de água com origem no solo de fundação, falta de ventilação, etc. Contrariamente, os elementos situados ao ar livre, tais como varandas, janelas e portas exteriores, estão sujeitos às variadíssimas condições ambientais, favoráveis ao desenvolvimento de fungos de podridão [1, 5].

É importante salientar que nem sempre a quantificação da gravidade da ação dos fungos de podridão é fácil, pois pode haver bastante perda de resistência sem que haja grandes perdas de massa [1].



a. Podridão castanha



b. Podridão branca

**Figura 3.1 – Alteração da madeira por fungos [24].**

### 3.1.3. Térmitas subterrâneas

As térmitas subterrâneas são insetos que vivem no solo, em colónias numerosas compostas por reprodutores, soldados e obreiras. Estes insetos atacam a madeira quando esta possui um teor em água acima dos 20%, utilizando-a como alimento e abrigo, já que são muito sensíveis à luz [22]. Em Portugal o ataque de térmitas subterrâneas tem sido um dos principais fatores de degradação da madeira.

O ataque das térmitas subterrâneas aos elementos de madeira só é possível se existirem deficiências na construção, que permitam alterações dos níveis de humidade nos materiais. Em condições favoráveis ao seu desenvolvimento, as térmitas podem infestar todo um edifício [1].

Dado que normalmente não há sinais exteriores do ataque por térmitas a sua deteção é bastante complicada.

A identificação deste agente é feita já numa fase muito adiantada da infestação, é geralmente feita pela observação de galerias de terra sobre a madeira ou a alvenaria ou pela observação de enxameações de insetos adultos alados, estes saem da madeira e vão acasalar, podendo assim infetar outras madeiras com condições para o seu desenvolvimento.

Devido à normalmente tardia deteção de um ataque de térmitas e pelo facto de estas provocarem uma diminuição bastante gravosa no volume da madeira, está-se em geral perante um problema grave e de difícil resolução, que se traduz numa perda bastante significativa da resistência mecânica da madeira, com consequências graves para a segurança da estrutura [22].

No que respeita à suscetibilidade ao ataque por térmitas, pode-se considerar que o borne é suscetível, podendo o cerne ser tido como durável, mediamente durável ou suscetível, consoante a espécie florestal [1].



Figura 3.2 – Alteração da madeira por térmitas [25].

#### 3.1.4. Caruncho

Os carunchos são insetos de metamorfose completa, em que o seu desenvolvimento passa por quatro fases distintas: ovo, larva, pupa e adulto, como é ilustrado na Figura 3.3.



Figura 3.3 – Ciclo de vida do caruncho [26].

Os insetos adultos colocam os ovos em aberturas (fendas, juntas, topos) que existam na madeira, desses ovos nascem as larvas que penetram na madeira e vão abrindo galerias, onde vivem e se alimentam, enquanto se desenvolvem. Esta é uma fase de grande destruição dos tecidos lenhosos devido à abertura das galerias.

Quando a fase larvar está prestes a terminar, o que habitualmente se dá no início do Verão, a larva desloca-se para a superfície da madeira, onde se transforma em pupa e posteriormente sai da madeira como inseto adulto. Ao sair da madeira deixa em aberto um orifício circular ou elíptico característico, designado orifício de saída, que na maioria das vezes é o único sinal de infestação de caruncho.

A fácil mobilidade no inseto adulto permite-lhe depositar os ovos em qualquer novo elemento de madeira, depois de acasalar. Consequentemente, a infestação é agravada [1, 23].

Existem várias espécies de caruncho, nomeadamente:

- O *Hylotrupes bajulus* L

Também conhecido em Portugal como caruncho grande ou “capricórnio das asas”, ataca em grande parte o borne das madeiras das Resinosas, causando enormes estragos em estruturas de cobertura, vigamentos e soalhos. A sua larva mede entre os 10 e 30 mm;

- O *Anobium punctatum* (De Geer)

Este tipo de caruncho, cujo tamanho varia ente os 2 a 4 mm, é muitas vezes responsável por a infestação de madeiras usadas na construção e em mobiliário de Resinosas e Folhosas;

- O *Lyctus brunneus*

A larva mede entre 4 e 5 mm e só ataca o borne de madeiras de Folhosas ricas em amido.



Figura 3.4 - Tipos de carunchos [25].

Os carunchos do tipo *Anobium punctatum* e *Lyctus brunneus* são normalmente designados de caruncho pequeno.

Todos os insetos, quer sejam carunchos grandes ou pequenos, atacam a madeira no exterior ou interior dos edifícios, não possuem requisitos em termos de teor em água para o seu desenvolvimento, mas preferem madeiras secas. O ataque por caruncho pode ser denunciado através dos orifícios de saída que aparecem no exterior da madeira e pelo serrim que aparece junto a este. No caso de infestação devida a caruncho grande, pode ainda ser identificável através do ruído característico das larvas a alimentar-se da madeira [1, 23].

Ainda assim, a infestação de caruncho grande é mais grave, devido à sua dimensão que faz com que as galerias sejam maiores, pelo seu longo ciclo de vida (de 3 a 11 anos) e por atacar madeiras com alta percentagem de borne [23].

No que respeita à durabilidade devido ao ataque por carunchos, o cerne em grande parte das madeiras é considerado durável e o borne pode ser durável ou suscetível, dependendo da espécie [1].

### 3.1.5. Classes de risco da madeira

Através da norma NP EN 335:1,2 [27] é possível estabelecer classes de risco em função do risco de degradação devido a agentes biológicos, bem como as consequências da sua ação em termos de risco para a segurança dos diversos elementos de madeira [23].

Uma correta análise da classe de risco, utilização e preparação da madeira, se necessária, diminui bastante a probabilidade de ataque por qualquer agente biológico [5].

**Tabela 3.1 – Classes de risco para a madeira maciça da “NP EN 335-2:1994” [27].**

Classes	Definição
<b>Classe 1</b>	O teor de água da madeira é tal que o risco de ataque por bolores superficiais, fungos de azulamento ou fungos lenhívoros é insignificante ( $H_{\text{máx}} < 20\%$ , qualquer que seja o lado do elemento de madeira e durante toda a vida útil da peça). É possível o ataque por insetos xilófagos, incluindo as térmitas, mas a frequência e importância deste risco depende da região geográfica.
<b>Classe 2</b>	O teor em água da madeira excede ocasionalmente 20%, que na totalidade quer em parte do elemento de madeira, o que permite o ataque por fungos lenhívoros. Madeiras com funções decorativas podem ser afetadas por bolores e fungos de azulamento. Risco de ataque por insetos semelhantes ao da classe de risco 1.
<b>Classe 3</b>	O teor em água da madeira excede frequentemente 20%, o que permite muitas vezes o ataque por fungos lenhívoros. Madeiras com funções decorativas podem ser afetadas por bolores e fungos de azulamento. Risco de ataque por insetos semelhante ao da classe de risco 1.
<b>Classe 4</b>	O teor de água da madeira excede permanentemente 20%, o que permite o ataque por fungos lenhívoros. As térmitas podem ser um risco adicional nalgumas regiões. Além disso, zonas das peças fora do contacto direto com o solo ou com a água podem ser atacadas por carunchos.
<b>Classe 5</b>	O teor de água da madeira excede permanentemente 20%. O ataque por organismos marinhos invertebrados é o principal problema. Em água salgada, xilófagos marinhos como o Tereido ou Limnoria podem causar destruições importantes. As zonas de certos elementos situados fora de água, como pilares de estruturas portuárias, estão expostas ao ataque por insetos xilófagos, incluindo térmitas.

Na classe de risco 1 estão inseridas madeiras localizadas no interior de construções sem contato com o solo, fundações ou alvenaria e estão protegidas de intempéries e de fontes internas de humidade. Na classe de risco 2 estão associadas madeiras situadas no interior de construções em contato com alvenaria no entanto não possuem contato com o solo ou fundações. São madeiras protegidas das intempéries e de fontes internas de humidade. No que refere à classe de risco 3, são madeiras localizadas no interior da construção, sem contato com o solo e protegidas das intempéries, ainda assim podem estar, ocasionalmente, expostas a fontes de humidade. Na classe de risco 4 encontram-se madeiras de uso exterior, que possuem contacto com o solo e estão sujeitas a intempéries. As madeiras pertencentes à classe de risco 5, estão em contato com o solo, água doce e outras situações favoráveis à deterioração. Finalmente na classe de risco 6 estão às madeiras que estão expostas à água salgada.

## **3.2. Degradação por agentes físicos e químicos**

Existem outros tipos de fatores, para além da ação de agentes biológicos, que provocam a deterioração da madeira. Esses fatores são, entre outros, a ação do fogo, ações mecânicas e em menor escala a ação de agentes atmosféricos.

### **3.2.1. Agentes atmosféricos**

Os agentes atmosféricos responsáveis pela degradação da madeira são a luz solar e a chuva. A luz solar, em particular a radiação ultravioleta, é responsável pela decomposição química da lenhina que resulta num escurecimento da cor da madeira, tornando-se posteriormente acinzentada, associada à madeira já envelhecida [5].

Os raios infravermelhos que penetram a madeira não deterioram diretamente a madeira, mas o aquecimento da superfície leva a uma perda de humidade superficial que pode originar fissurações.

Os processos de degradação da madeira podem ser mais rápidos se esta estiver constantemente em exposição ao sol e sujeita à água da chuva. A água da chuva vai removendo o material degradado pelo sol, expondo partes da madeira ainda não deterioradas. Contudo, este tipo de degradação é muito lenta, sendo que a taxa média de perda de superfície é cerca de 6mm em 100 anos; o único inconveniente é puramente do ponto de vista estético [1].

As superfícies sujeitas a alterações severas de secagem e humedificação podem desenvolver fendas e empenos, que podem ser consideradas formas de degradação, mas na maior parte dos casos não ocorrem alterações na resistência mecânica [3].

Apesar dos agentes atmosféricos não serem diretamente responsáveis por problemas estruturais, podem proporcionar condições ideais para o desenvolvimento de agentes biológicos responsáveis por deteriorações que prejudicam por sua vez a resistência estrutural [1].

A utilização de produtos de revestimento capazes de refletir ou absorver a radiação ultravioleta, bem como ter ação hidrófoba, permite retardar a deterioração devido aos agentes atmosféricos [3].

### 3.2.2. Fogo

A degradação da madeira devido ao fogo é bastante rápida e radical comparativamente com os processos de degradação biológica. A madeira é composta por celulose e lenhina, os quais são constituídos essencialmente por carbono, hidrogénio e oxigénio. Devido à presença destes componentes, a madeira é um material bastante combustível sendo que a sua destruição pode demorar apenas algumas horas, contudo tal facto não é sinónimo de fraca resistência ao fogo [28]. O comportamento ao fogo das madeiras depende da espécie em causa e verifica-se que a taxa de combustão é tanto maior quanto menor for a sua densidade. Assim, a resistência ao fogo depende da superfície do elemento de madeira: estruturas com grandes secções transversais têm uma elevada resistência ao fogo e contrariamente, os elementos com secções transversais pequenas apresentam um fraco desempenho.

O bom comportamento da madeira ao fogo justifica-se devido à forma como se desenvolve o processo de combustão. Quando ocorre um incêndio a madeira, devido à temperatura, começa por secar. A superfície da madeira começa a carbonizar aos 300°C se houver chama, caso contrário, começa a carbonizar somente aos 400°C [28]. A camada mais superficial do elemento de madeira transforma-se numa camada de carvão, com um bom comportamento isolante térmico, que permanece aderente ao elemento e que isola a madeira no interior, impedindo as chamas de a consumirem. Desta forma, existe a possibilidade da carbonização não progredir para o interior do elemento de madeira devido à insuficiência da temperatura na superfície. Consequentemente, o interior da secção transversal mantém as suas propriedades físicas e mecânicas inalteradas permitindo ainda averiguar qual a reserva de resistência após o incêndio, como ilustrado na Figura 3.5 [3, 5].

A diminuição da resistência do elemento deve-se mais a uma redução da secção do que a uma perda de resistência do material [28].

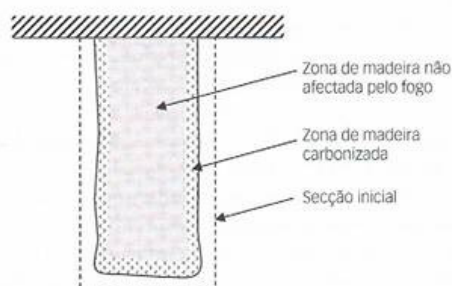


Figura 3.5 – Esquema de secção de madeira ardida [3].

Contudo, a abordagem no que respeita ao bom comportamento da madeira ao fogo não deve ser generalizada, uma vez que só elementos com dimensões de secção transversal superiores a 80mm é que o exibem [3].

Tendo em conta a segurança das estruturas, é necessário dimensioná-las de forma a resistirem à ação do fogo durante um determinado período de tempo. Em caso de incêndio, é importante avaliar, posteriormente, a resistência dos elementos estruturais e, se necessário, utilizar proteções ou tratamentos ignífugos [3, 5].

Um dos principais motivos da rejeição da madeira como material estrutural é o seu fraco desempenho perante o fogo. O comportamento da madeira pode ser melhorado através da utilização de tratamentos ignífugos ou de sistemas de proteção mecânica, que permitem aumentar a resistência do elemento de madeira [3].

Os tratamentos ignífugos têm como principal objetivo retardar a velocidade de propagação das chamas na madeira. Este tipo de tratamento é feito através de dois processos distintos: o tratamento em profundidade que é realizado em autoclave e o tratamento superficial que resulta da pintura do elemento de madeira com tintas ou vernizes [3].

Um dos produtos retardantes mais utilizados é a pintura intumescente: esta aumenta o seu volume quando está na presença de uma fonte de calor, formando uma camada carbonizada que limita a propagação da chama e do calor para o interior do elemento, funcionando como isolante térmico, o que impede que a madeira atinja a temperatura de ignição, conforme a Figura 3.6 [3, 29]. Devido à facilidade de aplicação destes produtos podem ser usados tanto em construção nova como em obras de reabilitação [29]. No entanto, até muito recentemente, não existiam produtos homologados com este fim para madeiras, existiam apenas para o aço.



**Figura 3.6 – Revestimento intumescente [29].**

Os sistemas de proteção mecânica são também uma das soluções para melhorar o comportamento da madeira ao fogo. Este tipo de proteção pode ser feito por meio da utilização de revestimentos com painéis isolantes ou pela aplicação de sistemas com argamassas fibrosas. Quer os painéis isolantes, normalmente de silicato e cálcio, quer os sistemas com argamassas fibrosas possuem a característica de serem incombustíveis e isolantes [29].

Ainda assim, a aplicação de placas de derivados de madeira na proteção de determinado elemento de madeira são frequentemente utilizadas, pois, apesar da madeira ser um bom combustível, é também um bom isolante térmico que impede o alcance das temperaturas necessárias para a ignição no seu interior [3].



## **4. Preservação da madeira**

A preservação da madeira é necessária quando se verifica que esta não é durável face à classe de risco a que está sujeita [23]. O fator mais importante da conservação da madeira é a ação preventiva, que implica que sejam analisadas as condições ambientais e de carga a que vai estar submetida, bem como a definição da melhor espécie a utilizar, no que respeita a sua durabilidade natural [5].

Portanto, quando a madeira apresenta um fraco comportamento em serviço, é necessário analisar a possibilidade de aumentar a sua durabilidade através da utilização de tratamentos preservadores [18].

A preservação da madeira pode ser feita através de diferentes processos, nomeadamente físicos, biológicos e químicos. Os processos físicos que se podem utilizar no tratamento da madeira infestada são o arrefecimento, aquecimento, eletrificação, projeção de micro-ondas ou raios gama, assim como o controlo do seu teor de água. Nos processos biológicos são introduzidos na madeira infestada espécies inimigas, parasitas ou microorganismos. Existem ainda os processos químicos, que utilizam os fumigantes, os produtos absorsores de oxigénio, a modificação química, bem como os preservadores líquidos, em pó ou em pasta para a destruição do agente biológico responsável pela deterioração do elemento de madeira [23].

A proteção da madeira depende do preservador utilizado, a sua aplicação tem de ser adequada e é feita consoante a madeira e o grau de deterioração em causa. Assim, a eficácia do tratamento está diretamente relacionada com o processo de aplicação utilizado [3].

É de salientar que poderão surgir situações em que seja difícil classificar um elemento em serviço no que respeita a sua classe de risco, devido à sua localização ou pelo facto de existirem zonas com diferentes situações de risco. Nestes casos, a classe de risco a considerar deve ser a classe de risco mais grave entre as classes que poderão ser aplicadas [5].

### **4.1. Produtos preservadores**

Entende-se por produtos preservadores as substâncias químicas que dão à madeira resistência mais elevada à degradação devido a organismos vivos [30].

As diferenças entre os vários produtos preservadores são decorrem das suas propriedades químicas, físicas e grau de toxicidade em relação aos diferentes agentes biológicos [3].

Os produtos preservadores devem cumprir determinados requisitos, tais como: exercer uma ação tóxica, inibidora e repulsiva sobre os agentes de deterioração da madeira; ser de fácil aplicação na madeira; proteger a madeira durante a sua vida útil e não afetar as suas propriedades mecânicas. É necessário ter em conta outros aspetos que poderão ser importantes na escolha do produto a utilizar, nomeadamente o odor e a coloração deixadas pelos produtos na madeira tratada, a compatibilidade com produtos de acabamento e metais, bem como o grau de toxicidade para o Homem e o ambiente [3, 18, 23]. Nenhum produto possui todas as características referidas anteriormente, mas também nem todas são necessárias, e a escolha deve ser feita tendo em conta as necessidades de serviço do elemento, tipo de madeira e natureza do tratamento. Deste modo, existem diversos tipos de produtos que atuam nas várias situações de degradação [23].

Os produtos preservadores de madeira podem ser fungicidas e inseticidas, e são classificados em função do veículo condutor em três grupos: oleosos, produtos aquosos e em solvente orgânico [3, 23].

#### 4.1.1. Produtos oleosos

Os produtos oleosos foram os primeiros a ser usados na construção em madeira e em tratamentos industriais. São produtos preservadores com uma constituição química bastante complexa e resultam da destilação dos alcatrões de hulha. Os produtos mais notórios deste grupo são o creosote e os óleos de antraceno, sendo o creosote um dos mais eficazes [3, 23]. Estes produtos possuem uma elevada toxicidade para organismos vivos devido aos seus principais componentes ativos, nomeadamente, os fenóis, os naftalenos e os antracenos [3]. Outras das vantagens da utilização deste tipo de produto preventivo é a sua elevada capacidade de permanência na madeira mesmo quando está sujeita a condições rigorosas de exposição [23]. Geralmente estes produtos preventivos caracterizam-se pelo seu forte odor, pela coloração que fica na madeira e por não permitirem a utilização de produtos de acabamento. Assim, os produtos oleosos são somente utilizados no meio exterior e podem ser vistos em postes, travessas de caminhos-de-ferro, pontes, vedações e em algumas estacas em ambiente marinho [3, 23].

O óleo de linhaça também pode ser utilizado como um produto preservador. Habitualmente é utilizado em ambientes internos, como móveis, portas, janelas e pequenas peças. O óleo de linhaça pode ser utilizado em todos os tipos de madeira e possui uma boa proteção contra a humidade e riscos superficiais.

#### 4.1.2. Produtos aquosos

Os produtos aquosos são constituídos por sais metálicos, isolados ou em misturas, dissolvidos em água. Os compostos mais comuns são o CCA – crómio, cobre, arsénio ou o CCB – crómio, cobre, boro e ainda o CFK – crómio, cobre, sílica-fluorido [31]. O crómio presente em todos os compostos tem como função a fixação dos diversos produtos na madeira, estes provocam reações com os outros compostos bem como com os constituintes da madeira após a evaporação do solvente que é a água. Os restantes constituintes do composto possuem propriedades tóxicas que atuam contra os diversos agentes biológicos. A estes compostos podem ser adicionados produtos secundários com propriedades anti-corrosivas, ignífugas e corantes, entre outras. Os produtos aquosos requerem sempre secagem após a sua aplicação, e não apresentam qualquer odor, contudo possuem uma cor bastante característica, tom esverdeado ou rosado. Ainda assim, permitem a utilização de produtos de acabamento. Atualmente o composto mais utilizado é o CCB, ao invés do CCA, que tem sido retirado do mercado por ter arsénio na sua composição [3].

#### 4.1.3. Produtos com solvente orgânico

Os produtos com solvente orgânico são soluções fungicidas e/ou inseticidas, em que os produtos preservadores são dissolvidos num solvente orgânico, nomeadamente o *white spirit* ou essência de terebentina. Portanto estes produtos são constituídos pelas matérias ativas e pelos solventes. Das matérias ativas fazem parte os fenóis, cloratos, naftalenos metálicos, cloronaftalenos, estanho e pentaclorofenol [23]. Por outro lado, os solventes permitem a penetração do produto na madeira. Podem ainda ser adicionadas a estes compostos outras substâncias com propriedades adjuvantes, corantes, aditivos de repelência, entre outros [3].

Os produtos com solvente orgânico mais conhecidos são os petrolíferos orgânicos e os vernizes aquosos, estes encontram-se com grande facilidade no mercado e a sua aplicação pode ser feita

através de métodos superficiais, nomeadamente a pincelagem e aspersão [3, 31]. Possuem boas características de toxicidade, uma elevada capacidade de penetração, não alteram a coloração da madeira e não possuem odor permanente (mas sim na aplicação), permitindo assim a sua utilização no interior do edifício. Permitem ainda a aplicação de produtos de acabamento e não desempenham qualquer ação corrosiva em elementos metálicos [23]. Estes produtos têm como inconveniente o facto de ser criada somente uma camada bastante superficial de proteção que é sensível a ações mecânicas exteriores, e que pode ser destruída e atacada por agentes de degradação.

## **4.2. Métodos de preservação**

Entende-se por métodos de preservação o conjunto de técnicas e práticas utilizadas para impor a penetração e fixação conveniente do produto preservador no interior do lenho [3, 31]. Existe um grande número de métodos de preservação e a sua escolha deve ter em conta a espécie a tratar, o valor de retenção necessário tendo em conta a classe de risco, o tipo de aplicação, e o objetivo do tratamento, se é para impedir a recorrência dos problemas (tratamento preventivo) ou se visa sustentar a progressão da degradação (tratamento curativo), entre outros [22, 31].

A madeira ainda antes de ser utilizada em obra é geralmente tratada através de processos industriais, que asseguram uma melhor impregnação e os níveis de retenção necessários. Quando se está perante madeira velha, existente em edifícios antigos e que necessita de tratamentos de conservação e reabilitação, esta deve ser tratada *in situ*. Embora em número bastante reduzido, existem ainda casos em que esta pode ser transportada para ser tratada industrialmente. É também indispensável o conhecimento de possíveis tratamentos a que o elemento esteve sujeito anteriormente, bem como os produtos que foram utilizados [23].

De seguida serão descritos alguns dos métodos de preservação mais utilizados em Portugal.

### **4.2.1. Pincelagem e aspersão**

Este método de preservação é de aplicação simples, conduzindo assim a um grau de impregnação pouco profunda, na ordem de poucos milímetros. Deve ser utilizado em elementos de pequena secção transversal, quando se prevê que o ataque por agentes biológicos seja

reduzido ou quando o tempo de vida útil da peça seja de curta duração. Quando a técnica utilizada é a pincelagem, deve-se seguir as indicações do fabricante para que o produto utilizado seja mais eficaz. A aspersão deve ser realizada em túneis, onde as peças recebem o produto por aspersão intensa permitindo assim que a camada protetora fique uniformemente distribuída em toda a sua superfície [3].

#### 4.2.2. Tratamento por imersão

O tratamento por imersão é mais um dos métodos de preservação da madeira. Neste caso as peças de madeira são mergulhadas em recipientes que contêm o produto preservador, durante o tempo necessário para atingir o grau de penetração e retenção requeridas. O produto preservador mais utilizado é o CCB (crómio, cobre e boro) e a imersão é feita à temperatura ambiente. O tratamento termina depois da secagem da madeira quando todo o solvente foi evaporado e a sua duração pode levar de alguns minutos a alguns dias, dependendo da eficácia requerida. Esta técnica de preservação pode ser realizada manualmente ou mecanicamente, peça por peça ou em grupo. Existem diversos fatores que condicionam a profundidade da penetração, nomeadamente o tipo de produto utilizado, o teor em água da peça, o tempo de imersão e a espécie de madeira utilizada. Quando se pretende graus de penetração mais elevados recorre-se a imersão prolongada, contudo o tempo de imersão não é diretamente proporcional à profundidade de penetração [3].

#### 4.2.3. Impregnação por pressão (autoclave)

Este método de preservação é realizado num cilindro fechado sujeito a altas pressões, responsáveis pela penetração do produto na madeira de forma a conseguir a impregnabilidade desejada. Os produtos usados neste tipo de solução são os produtos aquosos, por norma o CCB (crómio, cobre e boro). De entre os vários métodos o processo de células cheias ou Bethell é o mais utilizado em Portugal. A madeira é colocada no interior do cilindro, denominado autoclave, onde a madeira é sujeita a um período de vácuo de forma a ser retirado o ar do seu interior para que a absorção do produto seja mais fácil. Depois de retirado o máximo de ar possível, o produto preservador é colocado na autoclave, a uma pressão que varia entre 8 a 15 bar, até se atingir grau de preservação e retenção desejados. Concluído o processo de

impregnação, procede-se à remoção do produto preservador em excesso e limpeza da superfície da peça, através de um sistema de vácuo [3].



**Figura 4.1 – Autoclave com carga de madeira prestes a entrar [32].**

#### 4.2.4. Tratamento Fitossanitário (Choque Térmico)

O tratamento Fitossanitário consiste no aquecimento da madeira em estufa a uma temperatura constante de 56°C, durante cerca de 30min. Este método tem como objetivo a extinção de um verme microscópico, conhecido como o Nemátodo do Pinheiro, que poderá estar alojado no interior da árvore levando à sua morte em questão de semanas ou meses. O Nemátodo do Pinheiro ataca essencialmente o Pinheiro e algumas Resinosas como as Píceas, os Larícios e os Cedros. Em Portugal, segundo a Portaria 103/2006, é exigida pelo Ministério da Agricultura a adoção de medidas extraordinárias de proteção fitossanitária indispensáveis para o combate ao Nemátodo da madeira do pinheiro de modo a evitar a sua dispersão e permitir a sua erradicação do território nacional [33].

## **5. Consolidação da madeira**

A madeira é um material natural com características muito próprias, caracteriza-se pela sua anisotropia, higroscopia e variabilidade. No entanto é um material que quando sujeito a determinadas condições ambientais é bastante suscetível ao ataque por agentes biológicos [5].

A madeira é um material muito utilizado sendo que, quando não existem cuidados durante construção e manutenção do edifício, é o principal responsável pela denúncia de problemas de estanquidade e humidade [34]. A “presença” de água na madeira é bastante prejudicial, porque, tal como referido anteriormente, é o principal fator que origina o ataque de agentes biológicos, e estes podem provocar elevados danos num elemento de madeira; adicionalmente a estabilidade dimensional varia com a humidade. Quando determinadas situações de degradação ocorrem são necessários trabalhos de consolidação de forma a, por um lado, não permitir a progressão da degradação e por outro, repor ou até melhorar as características de durabilidade, resistência e funcionalidade [5].

### **5.1. Anomalias em pavimentos**

As anomalias que afetam os pavimentos de madeira estão essencialmente relacionadas com a natureza do material, e podem ser devidas a patologias dos elementos estruturais ou corresponderem à degradação de determinadas características mecânicas. As patologias dos elementos de madeira são habitualmente devidas aos ataques de agentes biológicos, ou até mesmo à ação de água diretamente sobre a madeira. As características mecânicas estão associadas com o processo de envelhecimento da madeira, e estão relacionadas com fenómenos como a deformação e vibração excessiva, empenamentos, fissuras, entre outros [35, 36].

Como já foi referido anteriormente, a presença de água nos elementos de madeira é o principal fator da sua deterioração. A água nos seus diversos estados ataca principalmente a madeira através da caixilharia exterior, paredes e cobertura. Consequentemente, as zonas primeiramente afetadas dos pavimentos são as ligações destes com as paredes resistentes e com as coberturas, podendo o ataque expandir-se e degradar todo o pavimento. A presença de água na madeira aliada a determinadas condições ambientais constituem situações bastante favoráveis para o desenvolvimento dos agentes biológicos. Devido aos ataques, há uma redução de secção útil dos elementos e quando totalmente destruídos os apoios ocorrem deslocamentos verticais e

rotações, provocando assim uma redistribuição dos esforços pelo restante pavimento. Pode-se verificar este fenómeno através da grande deformação dos pavimentos bem como deslocamentos verticais junto às paredes resistentes que apontam para a destruição da ligação [36].

A presença de água na construção pode também ser devida às diversas obras de manutenção, reparação ou alteração que não foram devidamente executadas, esquecendo-se o facto de se tratar de estruturas antigas e portanto não podendo ser encaradas como se fossem novas. Frequentemente este tipo de anomalias são consequência da instalação de redes de água e esgotos. É natural, que tratando-se de edifícios antigos, se queira utilizar tipologias construtivas com determinadas restrições, como é caso do uso de pavimentos de betão armado em instalações sanitárias e cozinhas. A betonagem nestes casos não deve ser feita diretamente sobre as vigas de madeira, porque a água de amassadura infiltra-se nos vigamentos de madeira, criando condições propícias ao desenvolvimento de agentes biológicos provocando os problemas já mencionados anteriormente. Este caso é mais grave porque a água de amassadura espalha-se por todo o pavimento, tornando-se num fator para a propagação dos agentes biológicos.

Além disso, o uso de betão provocará um aumento de cargas no edifício, que implica que sejam feitas verificações de segurança estrutural. Com o aumento das cargas poderá haver a necessidade de se realizarem diversas obras de reforço estrutural, até mesmo ao nível das fundações. Assim, ainda que o uso do betão não seja propriamente uma solução, muitas vezes é utilizado, sem as necessárias cautelas, devido à falta de conhecimento dos projetistas e construtores. Deste modo, devem ser tomadas medidas de forma a proteger os pavimentos de madeira, nomeadamente com a utilização de uma tela impermeável, de forma a evitar o contacto da água com a madeira.

Outra das formas de presença de água nos edifícios prende-se com a existência da mesma no solo, que é absorvida pelos elementos de madeira (e de alvenaria e betão) por capilaridade, sendo que os primeiros vigamentos a serem afetados são os da estrutura do rés-do-chão [36].

Os edifícios abandonados por vezes encontram-se demasiado degradados devido a causas fortuitas, tais como telhas e vidros partidos que permitem a entrada de água. A sua falta de manutenção, nomeadamente a rotura de canalizações de águas e esgotos domésticos também constituem um grande problema para os elementos de madeira [36].



**Figura 5.1 – Diferentes anomalias resultantes da falta de manutenção dos edifícios.**

Outras das anomalias que se verificam estão relacionadas com o corte de vigamentos para adaptação dos projetos de água e esgotos que obrigam a inclinações e traçados nas tubagens, sendo necessário realizar desníveis no pavimento que posteriormente são corrigidos através do uso de betão, verificando-se mais uma vez a inadequação dos projetos, dos materiais e técnicas construtivas. Neste caso, a estrutura do pavimento é bastante modificada, perdendo quase toda a sua resistência [36].

Existem também anomalias relacionadas com o próprio projeto e construção de pavimentos de madeira. Ao longo dos anos criaram-se formas de simplificação do projeto dos pavimentos de madeira, que conseqüentemente levaram ao uso de pavimentos mais leves e mais económicos. Houve uma redução da qualidade da madeira e foram aumentados os espaçamentos entre os vigamentos, bem como a sua dimensão. Estas deficiências tornam os pavimentos muito sensíveis ao fim de alguns anos, no que respeita o seu desempenho estrutural e à sua durabilidade [36].

Alterações do projeto inicial, como remoção de paredes de apoio e inserção de novas paredes divisórias sobre o pavimento, podem causar graves problemas de deformação nos pavimentos [34]. Os problemas de deformação podem também estar associados a alterações de uso do edifício, ou seja, dificilmente um edifício que foi concebido para uso habitacional poderá ser adaptado para instalar uma biblioteca sem que ocorra uma intervenção de reforço. O aumento de cargas iria provocar ou agravar a deformação do pavimento que se em simultâneo com outras anomalias, poderia colapsar [36].

É de salientar que muitas vezes os pavimentos não sofrem colapsos totais porque a análise de pavimentos de madeira é mais complexa do que a admitida. Para o modelo de cálculo dos vigamentos de madeira admite-se uma viga simplesmente apoiada, não tendo em conta o efeito

favorável que os tarugamentos, o soalho, a continuidade sobre apoios e os tetos podem ter na forma de redistribuição das cargas; algumas destas contribuições, nomeadamente a do soalho, em serviço, serão alvo de estudo na fase experimental desta dissertação.

## **5.2. Intervenção em madeira degradada**

### 5.2.1. Generalidades

A intervenção em edifícios pode realizar-se através de diversas técnicas, nomeadamente, conservação, reparação e reforço de elementos estruturais, que visam a consolidação da madeira inicialmente usada na sua construção, tendo em conta determinadas imposições e condições [23, 36].

Por conservação entende-se o conjunto de ações destinadas a prolongar o tempo de vida de um edifício [23, 36], que segundo a Carta de Veneza<sup>1</sup>, devem ser sujeitos periodicamente a operações de manutenção [36].

A manutenção é entendida como conjunto de operações preventivas com objetivo de manter o melhor funcionamento possível do edifício. As operações de manutenção podem ser pequenas reparações, inspeções, limpezas e pinturas [36].

Por reparação entende-se todas as operações necessárias para a correção de anomalias, de forma a manter o edifício na sua forma original, sem que haja alterações no seu comportamento estrutural [23, 36]. Também o conceito de restauro está associado ao conceito de reparação, dado que o restauro é entendido como o restabelecimento das peças originais, no que respeita aos tipos de materiais utilizados, forma e aparência, com o objetivo de manter as características da época de construção do edifício [23].

Quando surge a necessidade de melhorar as características de um elemento ou conjunto de elementos de forma a serem satisfeitas as condições de segurança, são realizadas operações de consolidação e de reforço. As operações de reforço muitas vezes estão associadas a exigências mais atuais, ou devido a alterações da função do edifício [36].

---

<sup>1</sup> A Carta de Veneza foi redigida no Congresso Internacional de Arquitectos e Técnicos de Monumentos Históricos realizada em 1964, em Veneza. O texto estabelece linhas gerais de orientação, prevendo as exceções necessárias à sua universal aceitação.

As diversas intervenções em edifícios antigos têm como principal objetivo melhorar as condições e necessidades do presente, respeitando as suas características estéticas e históricas [23].

### 5.2.2. Princípios de Intervenção

Antes da realização de qualquer intervenção é importante definir um programa base de forma a caracterizar o edifício no seu estado atual e definir os objetivos desejados. Posteriormente, e com base nesse programa, as intervenções a realizar são no sentido de eliminar a origem do problema e podem ser mais simples, como reparar fachadas, coberturas, etc., ou mais complexas, como modernizar o edifício de forma a cumprir a regulamentação em vigor [23, 36].

Como princípios básicos de intervenção defende-se que se devem manter os elementos construtivos originais e a sua função estrutural, procedendo à sua reparação e reforço só quando necessário. Também se defende como princípio de intervenção a preservação da maior quantidade possível de madeira na edificação. Quando necessário, a sua substituição deve ser feita com a mesma espécie da original, quando isso não é possível deve ser escolhida uma espécie que possua propriedades físicas e mecânicas compatíveis com a existente [23].

Outros princípios de intervenção prendem-se com a simplicidade de execução e a economia na intervenção. Defende-se que uma intervenção de reparação realizada *in situ* acarreta menos custos e causa menor interferência na estrutura e na obra do que a substituição total da peça [23, 36].

### 5.3. Técnicas de consolidação

O termo consolidação é entendido como o conjunto de todos os tratamentos necessários para devolver aos elementos de madeira as suas características de resistência após o ataque de agentes biológicos, mecânicos ou químicos. A consolidação pode ser encarada como uma técnica de intervenção que possui dois níveis distintos, conforme o grau de degradação do elemento em causa. O primeiro é a consolidação por impregnação que trata o elemento ainda numa fase de degradação inicial, e tem como função repor as características físicas e mecânicas do material. Por outro lado, quando o elemento em causa necessita de uma intervenção mais complexa, está-se perante o conceito de reparação e reforço, que tem como objetivo a recuperação da resistência inicial da estrutura ou mesmo a obtenção de níveis mais elevados de resistência e de redução de deformações [23].

### 5.3.1. Consolidação por impregnação ou reconstituição com resinas

A consolidação por impregnação é uma das técnicas de consolidação que consiste na substituição do material lenhoso em falta devido aos agentes de deterioração [35]. O produto de impregnação, cujas características têm de ser semelhantes à madeira em causa, preenche as zonas afetadas, estabelecendo a ligação com a madeira sã, conferindo-lhe assim a suas características originais, conforme a Figura 5.2 [23, 36]. Normalmente, para o preenchimento dos espaços vazios usam-se argamassas ou pastas à base de resinas, sendo que as soluções mais utilizadas são à base de resinas epoxídicas com cargas de areia siliciosa ou cargas de aparas de madeira. A compatibilidade entre a madeira sã e a solução utilizada deve ser verificada ao nível do módulo de elasticidade e da resistência à compressão e à tração, bem como boas condições de aderência à madeira. Apesar de não se tratar propriamente de uma técnica de consolidação de impregnação, o uso de conectores metálicos pode ser utilizado, como método complementar, para melhorar a fixação do produto de impregnação com madeira sã [36]. Os conectores metálicos devem ser dimensionados para resistirem à força de corte na zona de ligação [35].

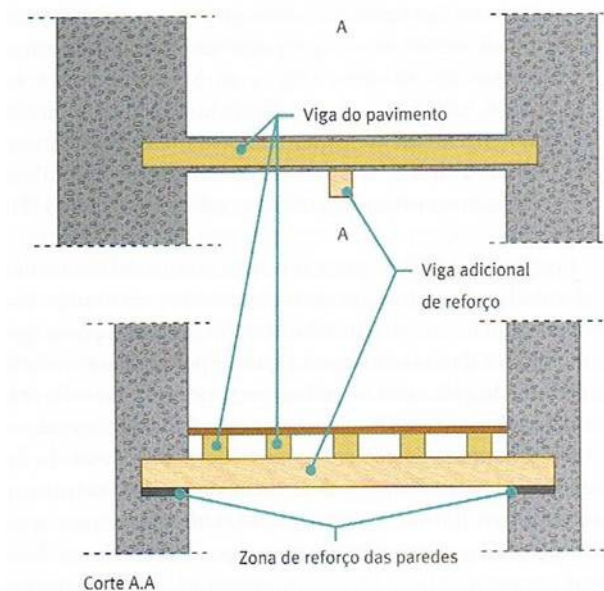


**Figura 5.2 – Injeção de resina epoxy para reconstituição de zona deteriorada de viga de madeira [36].**

### 5.3.2. Reparação e Reforço

As várias intervenções de reparação e reforço devem ser analisadas de acordo com o tipo de anomalia em causa. Dependendo da situação são analisadas várias formas de resolução do problema. No caso de anomalias devido ao excesso de cargas, uma das soluções possíveis é o rearranjo destas, transferindo as cargas em excesso por todo o pavimento ou para zonas de menor deformação, nomeadamente os apoios, se estes o permitirem [36].

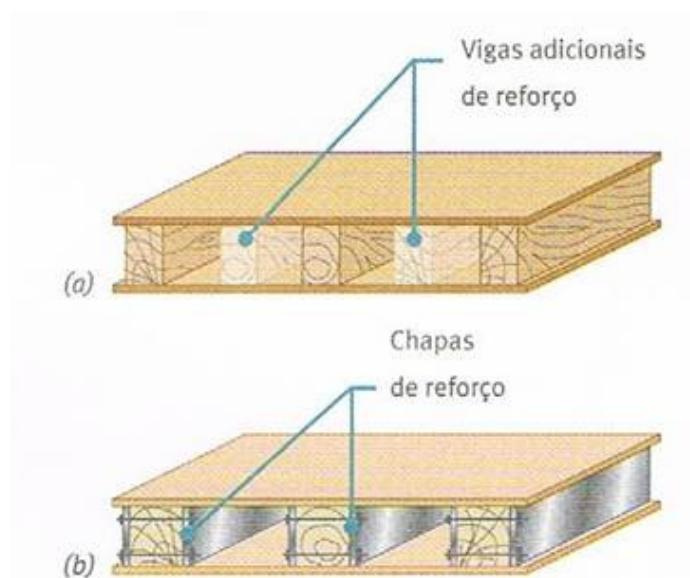
Se a anomalia em causa for a deformação do pavimento, pode recorrer-se a duas soluções distintas: a primeira possibilidade consiste na redução do vão do pavimento com a criação de apoios intermédios através de vigas transversais, conforme a Figura 5.3.



**Figura 5.3 – Redução de flechas de madeira pela colocação de viga transversal ao vigamento do pavimento [36].**

No entanto esta técnica possui algumas limitações. Uma das limitações verificadas prende-se com o facto da viga, que irá servir de apoio intermédio, carregar pontualmente a parede resistente, a qual poderá ter de ser também reforçada. O mesmo se aplica se os apoios da viga tenham de ser feitos sobre os lintéis de janelas ou portas. Nas soluções correntes a colocação da viga em causa provoca ainda um rebaixamento do pé-direito, o que pode constituir também uma limitação porque pode existir falta de disponibilidade para tal, ou esse rebaixamento pode interferir com determinados elementos decorativos de valor [36].

A segunda solução para contrariar a deformação do pavimento consiste no reforço da capacidade resistente do pavimento de forma a obter uma maior rigidez e menor deformabilidade do mesmo [36]. Esse reforço pode ser realizado através do aumento do número de vigamentos: colocam-se vigas novas paralelamente às antigas. Habitualmente as vigas utilizadas são também de madeira e a espécie de madeira a utilizar e respetiva dimensão são seleccionadas de forma a obter o controlo da deformação. O reforço para controlo da deformação pode ser também feito através de pranchas de madeira e perfis de aço que são aparafusados às vigas, conferindo-lhe assim a rigidez necessária [35, 36].



**Figura 5.4 – Reforço em pavimentos de madeira (a) colocando vigas novas paralelamente às antigas, (b) utilizando pranchas metálicas pregadas às vigas [36].**

As últimas duas soluções descritas são mais limitadas em termos de aplicabilidade porque para a colocação dos novos vigamentos é necessário ter o piso ou o teto disponível temporariamente para fazer a inserção dos novos vigamentos [35].

Outra das soluções possíveis consiste no reforço através de vigas metálicas, que são bastante vantajosas devido à sua resistência. Contudo, neste tipo de pavimentos existe maior dificuldade em compatibilizar o comportamento da estrutura, dada a enorme diferença de comportamento mecânico entre os materiais em causa [35].

Também as ligações entre os pavimentos e os apoios podem ter de ser melhoradas. Neste caso, uma das soluções poderá ser a criação de novos apoios (frechais) metálicos ou de madeira de forma reduzirem o vão efetivo [35].

O reforço de tarugamentos e a sua ativação com cunhas permite melhorar o comportamento bidirecional do pavimento, tirando também vantagens do efeito de rigidificação de soalhos cruzados [35].

A colocação de pré-esforço exterior também constitui uma possível técnica para controlo da deformação. As forças de pré-esforço geram deformações contrárias às provocadas pelas forças gravíticas, para além de conferirem alguma rigidez aos pavimentos [35].

## 6. Descrição dos edifícios aonde se inserem os pavimentos objeto de estudo

Os edifícios em causa localizam-se em Lisboa, correspondendo aos números 86, 90 e 94 da Avenida Duque de Loulé e ao número 119 da Rua Luciano Cordeiro.

Trata-se de um conjunto de três edifícios muito semelhantes entre si, construídos em 1904 pelo banqueiro Cândido Sottomayor, como prédios de rendimento e habitação. Apresentam uma arquitetura de influência parisiense, com fachadas ecléticas que combinam pormenores neorrenascentistas e de arte nova [37].

Todos os edifícios são constituídos por 6 pisos e a sua construção baseia-se em métodos tradicionais, quase todos anteriores ao betão armado, com paredes de fachada em alvenaria ordinário de pedra, paredes interiores de alvenaria de tijolo e de madeira e pavimentos de madeira e apenas com elementos de betão a tardoz, nas varandas [37].



**Figura 6.1 – Fachada, dos três edifícios, voltada para a Av. Duque de Loulé, números 86, 90 e 94 da direita para a esquerda.**

Em 2005, os últimos inquilinos abandonaram os edifícios e, passados quatro anos, com a ADIMAGRI – Administradora Imobiliária e Agrícola Lda. como dono de obra, foi aprovado, pela CML, um projeto de alterações com o objetivo de recuperar e reabilitar os edifícios em

causa. O projeto de alterações assentava na filosofia de reabilitação, recuperação e respeito por todos os elementos arquitetônicos e decorativos das fachadas, assim como na manutenção do desenho original e da maior parte dos elementos decorativos existentes, nomeadamente em estuques e madeiras. No entanto, a obra de construção, somente iniciada em 2010, de nada teve a ver com o projeto de licenciamento. A referida obra consistiu na introdução de elementos de reforço em toda a área de intervenção que inviabilizava o reaproveitamento dos elementos existentes. A introdução de estruturas definitivas, nomeadamente vigas metálicas e alguns pilares, não permitiam a preservação dos revestimentos decorativos, mas sim a sua destruição sistemática ao longo do edifício. A obra foi interrompida em 2012, por alegadamente dificuldades financeiras do Dono de Obra e por se ter considerado que o projeto inicial estava desajustado às novas exigências do mercado imobiliário [37].

A obra em causa foi bastante mais interventiva e destrutiva do que seria de esperar aquando da realização do projeto de arquitetura, o que introduziu graves fragilidades na estrutura dos edifícios. O abandono dos imóveis conduziu também a um agravamento da condição estrutural dos mesmos. Todos os fatores mencionados anteriormente contribuíram para a debilidade da estrutura, com problemas de segurança estrutural. Consequentemente, os principais objetivos a ter em conta na reabilitação dos edifícios foram colocados em causa. Atualmente já não é possível preservar os vários elementos presentes porque o objeto mudou. Todas as obras de construção realizadas e posteriormente suspensas, aliadas ao abandono do edifício, potenciaram a ruína de partes dos edifícios, que colocam em causa a segurança dos mesmos [37].

Desde modo, a realização desta dissertação só é possível devido à impossibilidade de preservar os vigamentos de madeira e o soalho resultante do estado em que os edifícios se encontram. É necessário criar condições para a execução do ensaio de carga, descrito posteriormente, nomeadamente o corte dos vigamentos e do soalho, que não seria possível se os elementos fossem mantidos.

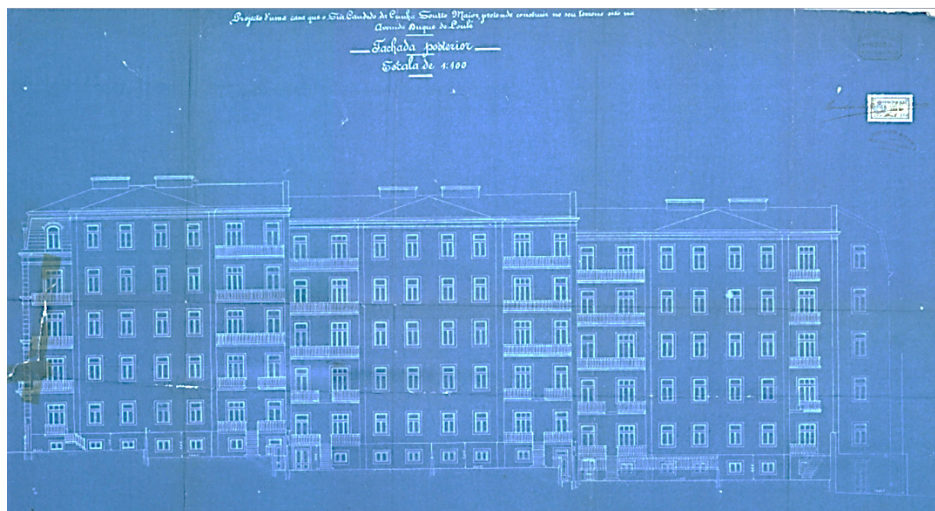


Figura 6.2 – Planta da fachada de tardoz do projeto inicial dos edifícios n.º 86, 90 e 94 da Avenida Duque de Loulé [38].

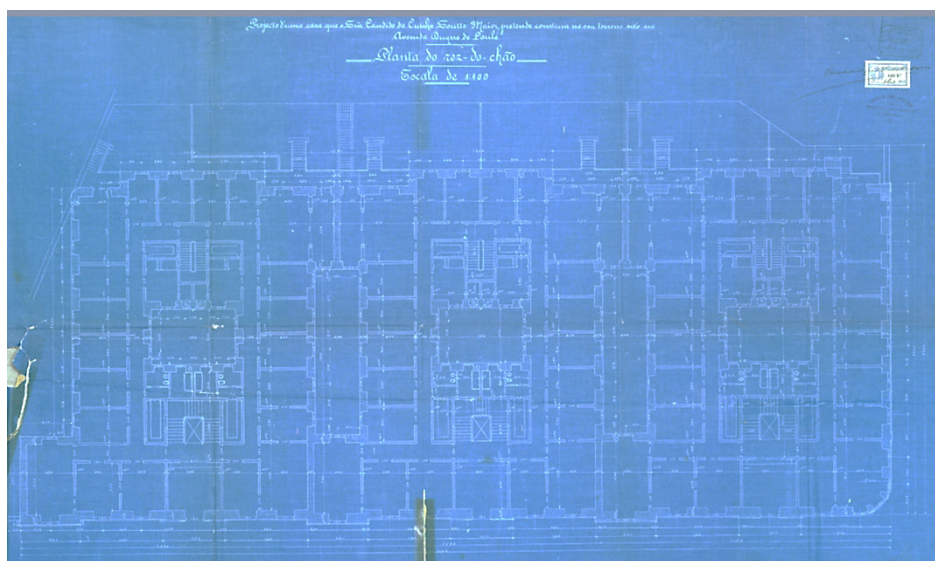


Figura 6.3 – Planta do rés-do-chão do projeto inicial dos edifícios n.º 86, 90 e 94 da Avenida Duque de Loulé [38].

### 6.1. Caracterização estrutural e construtiva dos pavimentos

O conjunto de edifícios data do início do Século XX, em que os métodos construtivos são bastantes tradicionais, utilizando-se a madeira para a construção dos pavimentos.

Os pavimentos existentes são constituídos por vigamentos de madeira com uma secção média de  $0,07 \times 0,20 \text{ m}^2$ , tanto nas zonas secas como húmidas, estão correntemente dispostos na direção ortogonal às paredes de fachada e vencem vãos na ordem dos 4,5m, com afastamentos de aproximadamente 0,40m a 0,50m. Os vigamentos dos pavimentos descarregam nas paredes de alvenaria de tijolo e nas fachadas de alvenaria ordinária de pedra miúda. O revestimento dos pavimentos é realizado com soalho à inglesa (Figura 6.5) com encabeirado à meia esquadria [37].

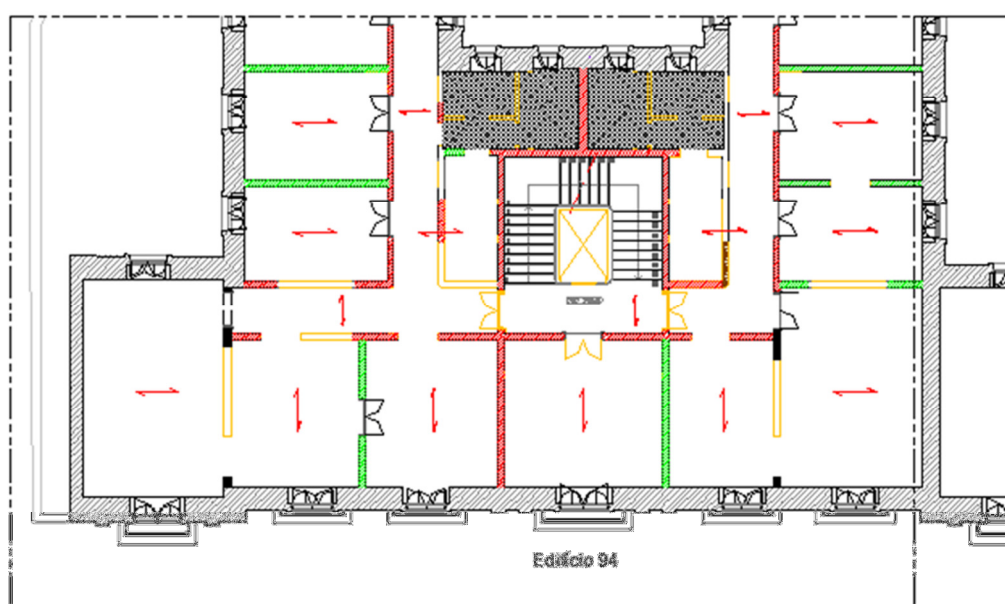


Figura 6.4 – Orientação dos vigamentos de madeira [37].



Figura 6.5 – Soalho à inglesa.

## **7. Desempenho teórico de vigamentos de madeira com classificação prévia**

O desempenho teórico será analisado tendo em conta modelos estruturais do pavimento, através do programa estrutural SAP2000. Através destes modelos é possível simular características e o comportamento real da estrutura.

Durante o estudo, surgiu a necessidade de obtenção de uma classificação prévia da classe de madeira em causa porque esta se encontrava bastante suja, sendo que, para se realizar uma classificação visual mais precisa seria necessário lavá-la. No entanto isso causaria um aumento de humidade nos vigamentos, o que seria prejudicial para o ensaio de carga, dado que a humidade altera a resistência e o módulo de elasticidade da madeira. Assim, através de alguns aspetos visíveis foi atribuída uma classificação prévia à madeira existente, sendo que no Capítulo 9 serão descritos os métodos de classificação visual de estruturas de madeira em serviço, bem como uma melhor classificação, tendo em conta a sua classe de resistência.

Importa salientar que a classificação prévia tem como principal objetivo a obtenção do módulo de elasticidade, de forma a ser estimado o comportamento da estrutura para os dois patamares de carga a considerar no ensaio, incluindo a verificação ao estado limite último e de deformação de acordo com o Eurocódigo 5.

### **7.1. Medição da percentagem de humidade nos vigamentos**

O teor em água na madeira que por sua vez está relacionado com a percentagem de humidade é um fator que condiciona bastante o comportamento e as propriedades da madeira. Devido ao aumento do teor em água, a resistência e o módulo de elasticidade da madeira também diminui para valores de teor em água abaixo do ponto de saturação das fibras, PSF [3].

A importância da medição da percentagem de humidade na madeira deve-se também ao facto de nos locais onde essa humidade é mais elevada existir maior probabilidade de ataque biológico.

Para a medição da percentagem de humidade nos vigamentos utilizou-se um higrómetro (Figura 7.1).



**Figura 7.1 – Higrómetro.**

A medição é feita através de um dispositivo que se crava na viga de madeira, que por sua vez se liga ao higrómetro, que faz a medição da humidade (Figura 7.2). Os valores obtidos de humidade situam-se entre os 14 e os 16%.



**Figura 7.2 – Medição de percentagem de humidade.**

## **7.2. Classificação visual prévia dos vigamentos de madeira**

A classificação visual da madeira é estabelecida através da apreciação das suas características e dos defeitos associados à sua estrutura, bem como ao corte praticado e às alterações associadas a empenos, fendas e degradação biológica [16].

Para além da limitação que este tipo de classificação possui, dado que só é possível classificar os defeitos reconhecíveis visualmente, quando esta madeira pertence a uma estrutura em serviço torna-se mais difícil fazer essa classificação.

Devido à sujidade das vigas não se consegue observar diversas características, nomeadamente a inclinação do fio da madeira. Tratando-se de peças que se encontram em serviço, não se consegue visualizar o topo das mesmas, o que não permite retirar qualquer conclusão acerca da sua taxa de crescimento. No entanto, e apesar de algumas dificuldades na visualização dos defeitos, de um modo geral, os vigamentos encontram-se num bom estado de conservação. A maioria dos vigamentos apresenta algumas fendas (Figura 7.3) e verifica-se a presença de nós de pequenas dimensões com pouca relevância. Tendo em conta uma primeira análise visual, os vigamentos, aparentemente, não apresentam indícios de ataque biológico. No entanto, como é visível na Figura 7.3, a viga esteve em contacto com água, que por sua vez poderá ter originado a degradação devido a organismos vivos, mesmo que esta não seja visível.



**Figura 7.3 – Fendas e humidade num vigamento de madeira.**

Tendo em conta os diversos fatores analisados que importam numa classificação visual, nomeadamente a cor da madeira em causa e os defeitos que apresenta, considera-se que a madeira em causa pode ser de pinho bravo, podendo ser considerada como pertencendo a uma classe de qualidade E, ou seja, à classe de madeira para estruturas.

### 7.3. Modelos estruturais e deformações teóricas

O modelo estrutural foi definido usando as características geométricas da estrutura, tendo-se considerado elementos lineares sem empenos e as dimensões reais da estrutura. O procedimento para análise das deformações finais para a combinação rara e para a combinação em estado limite último foi realizado do mesmo modo em todos os ensaios e, portanto, somente este ensaio apresenta a descrição detalhada da análise. Os ensaios são realizados em 4 pavimentos distintos. Mediram-se as deformações e 5 pontos distintos, a meio vão de todas as vigas (DCVA, DCVB e DCVC) e a  $\frac{1}{4}$  e  $\frac{3}{4}$  da viga central (DDVB e DEVB, respectivamente.)

- **Ensaio 1**

Para o cálculo das deformações teóricas utilizou-se as dimensões dispostas na Tabela 7.1, bem como o valor das forças a que a estrutura está sujeita. As dimensões necessárias para a análise são a altura da viga (h), a largura de viga (b) e a largura de influência da viga ( $L_{inf.}$ ). As forças a ter com conta são as devidas ao peso do soalho (RCP) e à sobrecarga a colocar no pavimento durante o ensaio (SC).

**Tabela 7.1 – Dados utilizados para análise do desempenho teórico no Ensaio 1.**

	Viga A	Viga B	Viga C
h (cm)	22,5	23	22,5
b (cm)	7,5	7,5	7,5
$L_{inf.}$ (cm)	0,4075	0,44	0,4325
RCP (kN/m)	0,04	0,04	0,04
SC (kN/m)	0,82	0,88	0,87

Conforme a Figura 7.4, considerou-se uma estrutura composta com três vigas simplesmente apoiadas. A carga a que a estrutura está sujeita é diferente nas várias vigas porque se teve em conta as larguras de influência reais a que cada uma está sujeita. O programa de cálculo estrutural SAP2000 considera o peso próprio das vigas e portanto não é necessário considerar essa carga isoladamente.

Nesta análise foi considerada uma madeira de pinho bravo de classe de qualidade E, cujo módulo de elasticidade médio é 12GPa e a massa volúmica média 580 kg/m<sup>3</sup>.

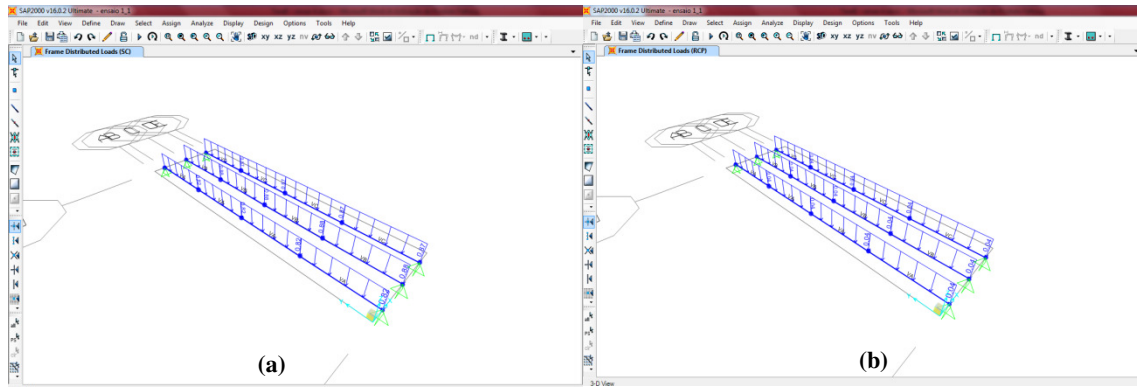


Figura 7.4 – Modelo estrutural e cargas aplicadas no Ensaio 1. (a) Sobrecarga. (b) RCP

Nesta análise interessa analisar as deformações em duas situações, utilizando a combinação rara e a em estado limite último.

A combinação rara é dada por:

$$C_{rara} = 1 \times PP_{viga} + 1 \times RCP + 1 \times SC \quad (7.1)$$

A combinação em estado limite ultimo é dada por:

$$C_{ELU} = 1 \times PP_{viga} + 1 \times RCP + 1,5 \times SC \quad (7.2)$$

Como seria de esperar o peso próprio da viga ( $PP_{viga}$ ) e a restante carga permanente (RCP) não são majoradas pelo fator de 1,35, porque as vigas e os soalhos já estão em serviço [39].

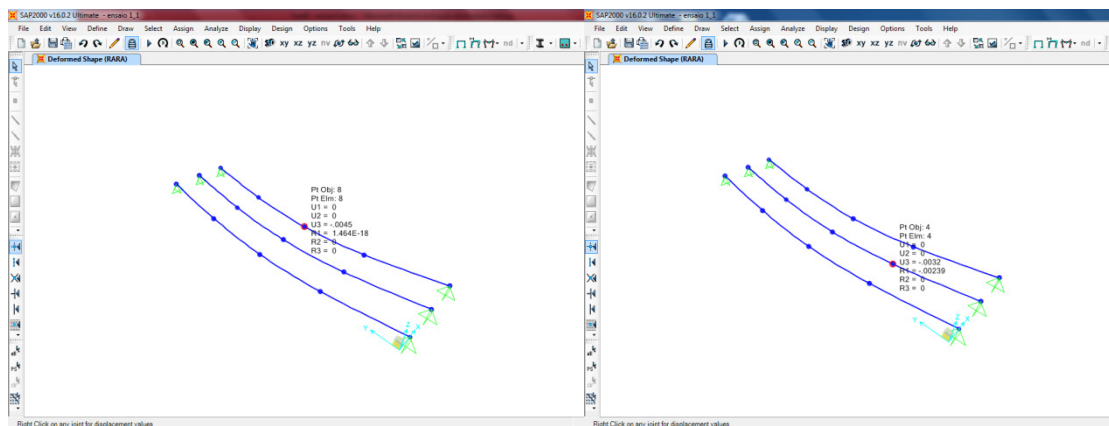


Figura 7.5 – Deformada da estrutura e valores das deformações para a combinação rara.

As deformações resultantes estão indicadas na Tabela 7.2. Os valores das deformações nos pontos centrais das vigas são iguais porque, na análise estrutural colocou-se essa condição (Opção do SAP2000 “Define constraints”), de forma a representar o efeito membrana do soalho, havendo assim uma redistribuição de esforços na estrutura.

**Tabela 7.2 – Valores das deformações para a combinação rara e em estado limite último – Ensaio 1.**

Defletómetro	Deformações (m)	
	Rara	ELU
DCVA	0,0045	0,0064
DEVB	0,0032	0,0046
DCVB	0,0045	0,0064
DDVB	0,0032	0,0046
DCVC	0,0045	0,0064

- **Ensaio 2**

O modelo estrutural do ensaio 2 é semelhante ao do ensaio 1, diferindo apenas nas dimensões das vigas, afastamento entre elas e conseqüentemente nas larguras de influência a que cada uma está sujeita (Tabela 7.3). Considerou-se portanto, três vigas simplesmente apoiadas, sujeitas a dois tipos de carregamento, o peso do soalho (RCP) e a sobrecarga (SC). As combinações utilizadas são as mesmas que no ensaio 1, a combinação rara que resulta do somatório de todas as cargas a que a estrutura está sujeita, incluindo o peso próprio, e a combinação em estado limite último, que multiplica somente o valor da sobrecarga por 1,5.

**Tabela 7.3 - Dados utilizados para análise do desempenho teórico no Ensaio 2.**

	VA	VB	VC
h (cm)	22	21,5	22
b (cm)	7,5	6,5	7
L <sub>inf.</sub> (cm)	0,4775	0,44	0,4525
RCP (kN/m)	0,05	0,04	0,05
SC (kN/m)	0,96	0,88	0,91

As deformações resultantes estão representadas na Tabela 7.4, verificando-se, e como seria de esperar, que todos os pontos centrais têm o mesmo valor. Neste caso, para a combinação rara, uma deformação de 5,3 mm e em estado limite último, uma deformação de 7,7mm.

**Tabela 7.4 - Valores das deformações para a combinação rara e em estado limite último – Ensaio 2.**

Defletómetro	Deformações (m)	
	Rara	ELU
DCVA	0,0053	0,0077
DEVB	0,0038	0,0055
DCVB	0,0053	0,0077
DDVB	0,0038	0,0055
DCVC	0,0053	0,0077

- **Ensaio 3**

Na Tabela 7.5 estão representadas as dimensões e as cargas utilizadas na análise estrutural do ensaio 3. A análise das deformações foi realizada de igual forma utilizada no ensaio 1 e 2.

**Tabela 7.5 - Dados utilizados para análise do desempenho teórico no Ensaio 3.**

	VA	VB	VC
h (cm)	23	23	22
b (cm)	7,5	7,5	7,5
L <sub>inf.</sub> (cm)	0,4525	0,41	0,4025
RCP (kN/m)	0,05	0,04	0,04
SC (kN/m)	0,91	0,82	0,81

As deformações resultantes estão representadas na tabela seguinte (Tabela 7.6). Mais uma vez, as deformações resultantes no ponto a meio vão da viga são todas iguais e de valor 4,7 e 6,8 mm, para a combinação rara e em estado limite ultimo respetivamente. Tendo em conta que o modelo estrutural considerado é o de viga simplesmente apoiada com carga uniformemente distribuída, as deformações no ponto a um quarto de vão e a três quartos de vão da viga B são iguais.

**Tabela 7.6 - Valores das deformações para a combinação rara e em estado limite último – Ensaio 3.**

Defletómetro	Deformações (m)	
	Rara	ELU
DCVA	0,0047	0,0068
DEVB	0,0034	0,0048
DCVB	0,0047	0,0068
DDVB	0,0034	0,0048
DCVC	0,0047	0,0068

- **Ensaio 4**

Na Tabela 7.7 estão indicadas as medidas e os valores de cargas necessárias para a análise estrutural.

**Tabela 7.7 - Dados utilizados para análise do desempenho teórico no Ensaio 4.**

	VA	VB	VC
h (cm)	22,5	21	22,5
b (cm)	7,5	7,5	7,5
L <sub>inf.</sub> (cm)	0,5025	0,405	0,3825
RCP (kN/m)	0,05	0,04	0,04
SC (kN/m)	1,01	0,81	0,77

Os valores restantes da deformação da análise estrutural do ensaio 4, para a combinação rara e em estado limite último estão indicados na Tabela 7.8. O valor máximo da deformação para a combinação rara é 4,6mm e para a combinação em estado limite último é 6,6mm.

**Tabela 7.8 - Valores das deformações para a combinação rara e em estado limite último – Ensaio 4.**

Defletómetro	Deformações (m)	
	Rara	ELU
DCVA	0,0046	0,0066
DEVB	0,0033	0,0047
DCVB	0,0046	0,0066
DDVB	0,0033	0,0047
DCVC	0,0046	0,0066

## **8. Desempenho real de vigamentos de madeira**

No processo de reabilitação de edifícios antigos, um dos aspetos essenciais a ter em conta é a conservação dos pavimentos de madeira. Os problemas que estas estruturas apresentam são, maioritariamente, devido a ataques de agentes biológicos, ao contacto com a água ou a deficientes disposições construtivas, podendo resultar em estruturas com excessiva deformabilidade, verificando-se, em alguns casos, a rotura de alguns dos seus elementos estruturais. A existência destas situações e o desconhecimento do real comportamento das estruturas de madeira leva a que, num grande número de intervenções, os pavimentos de madeira sejam substituídos, ao invés da sua manutenção ou reabilitação [40].

No entanto, é possível melhorar o comportamento dos pavimentos de madeira, adequando-o aos padrões atualmente exigidos, através de diversas ações que reduzem os níveis de deformação e de vibração que possam apresentar. Para isso é fundamental conhecer as características dos pavimentos, nomeadamente o papel do soalho na distribuição de cargas entre vigas e no aumento da rigidez [40].

### **8.1. O sistema de distribuição de carga em pavimentos de madeira**

Observam-se com frequência pavimentos que, mesmo apresentando graves danos estruturais, não sofrem colapsos integrais devido ao facto da sua estrutura ser consideravelmente mais redundante do que se admite nas análises teóricas habituais. De facto, o efeito estrutural proporcionado pelo soalho pregado, pelos tetos e pelos tarugos pode ser preponderante no comportamento do pavimento, sobretudo pela mobilização do efeito de membrana ou de diafragma, que se traduz pelo designado fator de distribuição de carga,  $K_{sys}$  [36].

O fator de distribuição de carga aumenta a resistência global do pavimento, ao ter em conta dois efeitos principais. Por um lado, a reduzida probabilidade de um elemento mais fraco ser posicionado num local em que as tensões sejam particularmente altas, e por outro, o facto dos elementos mais rígidos receberem uma maior percentagem da carga aplicada. Este efeito permite que as cargas sejam repartidas de forma proporcional à rigidez e por sua vez à resistência de determinado elemento [40].

Quando os elementos estruturais apresentam um comportamento não linear, ou seja, encontram-se submetidos a cargas próximas da rotura, o efeito da distribuição de carga acontece da mesma

forma. De facto, se a rigidez do elemento diminui devido à fendilhação ou a deformações plásticas, a carga é redistribuída pelo sistema e a viga parcialmente degradada é capaz de contribuir para a capacidade de carga do pavimento. O fator de distribuição de carga é relativamente insensível às variações das condições de apoio, à secção, número e espaçamento das vigas e ao rácio entre cargas permanentes e sobrecargas [40].

## 8.2. Ensaio de carga

O ensaio de carga em causa tem como principal objetivo a avaliação do comportamento estrutural de determinado painel de pavimentos quando submetido a cargas verticais. Procura-se assim estimar a eficácia do soalho na diminuição das deformações nos pavimentos e posteriormente analisar as diferenças entre as deformações reais e as deformações teóricas. As deformações serão medidas com o auxílio de defletómetros (Figura 8.1).

São ensaios não destrutivos, pois a capacidade elástica dos elementos não é excedida, não provocando assim a inutilização do pavimento.



**Figura 8.1 – Defletómetro.**

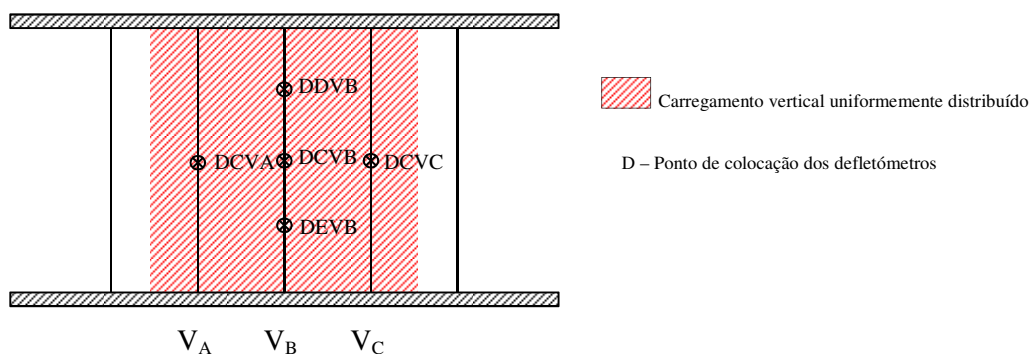
### 8.2.1. Descrição do Ensaio

O ensaio de carga consistiu em isolar uma faixa de pavimento com cerca de 1,2m de largura, constituído por 3 vigas e submetê-lo a um carregamento vertical, uniformemente distribuído.

Foi escolhida uma faixa que se encontrasse em bom estado de conservação e foi isolada através do corte com serra de soalho, de forma a desligá-lo do restante pavimento. Foi montada uma estrutura para suporte dos defletómetros e uma estrutura de andaime para a leitura dos valores da deformação dada pelos defletómetros (Figura 8.2). Os defletómetros foram posicionados em 5 pontos conforme a Figura 8.3, com uma estrutura independente do painel e da plataforma de acesso.



**Figura 8.2 – Montagem dos defletómetros.**



**Figura 8.3 – Planta da faixa ensaiada com localização dos defletómetros.**

A carga foi aplicada através de sacos de argamassa de 30 Kg, cada (Figura 8.4). Foram considerados dois patamares de carga, numa primeira fase  $2 \text{ kN/m}^2$  e de seguida  $3 \text{ kN/m}^2$ , que correspondem à combinação rara e à combinação em estado limite último, respetivamente.



**Figura 8.4 – Sacos de argamassa utilizados no ensaio**

Mediram-se as deformações (Figura 8.5) e posteriormente procedeu-se à descarga do pavimento com os mesmos patamares de carga considerados no carregamento, voltando-se a medir as deformações.



**Figura 8.5 – Medição das deformações.**

Tendo em conta os objetivos referidos, de determinar a influência do soalho no comportamento do pavimento, cortou-se o macheado do soalho e repetiu-se o ensaio, conforme a Figura 8.6.

O Ensaio foi repetido em 4 painéis de pavimentos distintos.



**Figura 8.6 – Corte do macheado do soalho.**

É de salientar que foram necessários diversos trabalhos preparatórios para a realização do ensaio, nomeadamente a remoção total dos tetos e o corte das vigas nos apoios para garantir a sua descontinuidade e ser possível considerar o modelo de viga simplesmente apoiada, como ilustrado na Figura 8.7.



**Figura 8.7 – Corte do vigamento junto ao apoio para evitar o efeito de continuidade.**

### 8.2.2. Resultados dos ensaios

Como referido anteriormente, foram feitos ensaios de carga-descarga em 4 pavimentos diferentes. Em cada ensaio foram registados os valores do deslocamento em 2 patamares de carga, 2 kN/m<sup>2</sup> e 3kN/m<sup>2</sup>, que correspondem a cerca 10 kN e 15 kN, respetivamente.

Usando a expressão da Resistência dos Materiais, que traduz uma situação semelhante à do ensaio de carga, é possível chegar ao valor do módulo de elasticidade real a meio vão através de:

$$E = \frac{5pl^4}{384 \delta_{tot} I} \quad (8.1)$$

Em que  $p$  é a força aplicada,  $l$  é o comprimento da viga, o  $I$  corresponde ao momento de inércia da viga e o  $\delta_{tot}$  à deformação medida.

Para o cálculo do módulo de elasticidade a um quarto de vão e a três quartos de vão utiliza-se a expressão:

$$E = \frac{px(x^3 - 2lx^2 + l^3)}{24 \delta_{tot} I} \quad (8.2)$$

Em que  $p$  é a força aplicada,  $x$  é a distancia do ponto que se pretende calcular a deformação,  $l$  é o comprimento da viga, o  $I$  corresponde ao momento de inércia da viga e o  $\delta_{tot}$  à deformação medida.

- **Ensaio 1**

- *Com a contribuição do soalho:*

Através da Tabela 8.1 verifica-se que no ensaio E1 a viga DCVB (central) apresentou uma flecha máxima a meio vão de 4,77mm, sendo este ponto o que sofreu maior deslocamento neste ensaio. As duas vigas adjacentes VA e VB apresentam uma deformação máxima de 4,03 e 3,36 mm, respetivamente.

**Tabela 8.1 – Valores da deformação das várias vigas e módulos de elasticidade para o Ensaio 1, com a contribuição do soalho.**

Defletómetro	Valores para 2 kN/m <sup>2</sup>		Valores para 3 kN/m <sup>2</sup>	
	Deformação total $\delta_{tot}$ (mm)	E (kN/mm <sup>2</sup> )	Deformação total $\delta_{tot}$ (mm)	E (kN/mm <sup>2</sup> )
DCVA	4,03	12,23	5,67	12,41
DEVB	3,53	10,00	4,88	10,34
DCVB	4,77	10,39	6,65	10,65
DDVB	3,79	9,31	5,75	8,78
DCVC*	3,36	15,48	4,82	15,43

No entanto, tendo em conta os valores das deformações dos pontos centrais das vigas VA e VB, verifica-se que o valor da deformação no ponto DCVC é menor do que seria de esperar. Consequentemente o módulo de elasticidade é de tal forma maior o que leva a crer que possa ter havido algum problema nesse ponto. Deste modo exclui-se o ponto central da viga VC para o cálculo do módulo de elasticidade.

Através do valor dos vários módulos de elasticidade calculados e indicados na Tabela 8.1, é possível considerar um módulo de elasticidade médio, que neste caso é igual a  $E_{\text{médio}}=10,51\text{kN/mm}^2$ .

Mostra-se na Figura 8.8 o Gráfico carga vs deslocamento das 5 vigas ensaiadas.

---

\* Ponto de valor anómalo de deformação e módulo de elasticidade.

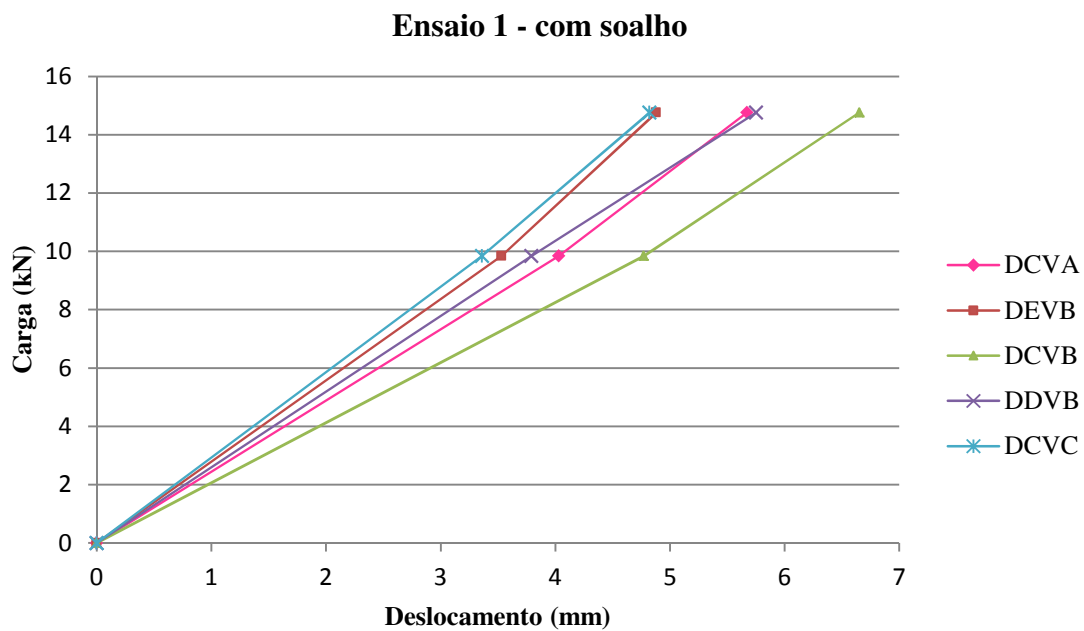


Figura 8.8 – Gráfico carga vs deslocamento para as 5 vigas do Ensaio 1 com soalho.

Devido a alguns problemas técnicos não foi possível medir as deformações da descarga.

*- Sem a contribuição do soalho:*

Depois do corte do macheado do soalho, de forma a este não contribuir para um aumento da rigidez do pavimento, obtiveram-se as deformações apresentadas na Tabela 8.2 e consequentemente os valores do módulo de elasticidade. Verifica-se que o ponto central da viga A é onde existe a maior deformação. De modo análogo à situação anterior, o ponto central de VC apresenta uma deformação baixa e consequentemente um módulo de elasticidade elevado. Assim, também para este caso não se considera o ponto DCVC para o cálculo do módulo de elasticidade médio.

**Tabela 8.2 - Valores da deformação das várias vigas e módulos de elasticidade para o Ensaio 1, sem a contribuição do soalho - carga.**

Defletómetro	Valores para 2 kN/m <sup>2</sup>		Valores para 3 kN/m <sup>2</sup>	
	Deformação total $\delta_{tot}$ (mm)	E (kN/mm <sup>2</sup> )	Deformação total $\delta_{tot}$ (mm)	E (kN/mm <sup>2</sup> )
DCVA	4,75	10,38	6,85	10,27
DEVB	3,61	9,78	4,85	10,41
DCVB	4,71	10,52	6,51	10,88
DDVB	3,72	9,49	4,97	10,16
DCVC*	3,55	14,65	4,68	15,89

Procedeu-se ao descarregamento do pavimento de modo a ficar uma carga total de aproximadamente 2kN/m<sup>2</sup>. Foram registadas as deformações e verificou-se que, à semelhança do que ocorreu no caso de carregamento, o ponto central da viga A é onde se observa a maior flecha. Nesta situação o ponto central de VC possui uma flecha mais elevada o que sugere que o erro anteriormente ocorrido possa ter diminuído. Ainda assim não se considera o valor do módulo de elasticidade para o ponto DCVC obtido aquando da descarga da viga no cálculo no módulo de elasticidade total.

**Tabela 8.3 - Valores da deformação das várias vigas e módulos de elasticidade para o Ensaio 1, sem a contribuição do soalho e valores residuais - descarga.**

Defletómetro	Valores para 2 kN/m <sup>2</sup>		Valores para 0 kN/m <sup>2</sup>
	Deformação total $\delta_{tot}$ (mm)	E (kN/mm <sup>2</sup> )	Deformação final $\delta_{fin}$ (mm)
DCVA	5,03	9,80	0,93
DEVB	3,76	9,39	-0,06
DCVB	4,01	12,36	-0,80
DDVB	3,84	9,19	-0,02
DCVC*	3,77	13,79	-1,15

De modo análogo ao que foi feito anteriormente, é possível determinar um valor médio para o módulo de elasticidade, que neste caso é aproximadamente  $E_{médio}=10,22\text{kN/mm}^2$ .

Na Figura 8.9, é apresentado o Gráfico carga-descarga vs deformação para este caso de estudo.

\* Ponto de valor anómalo de deformação e módulo de elasticidade.

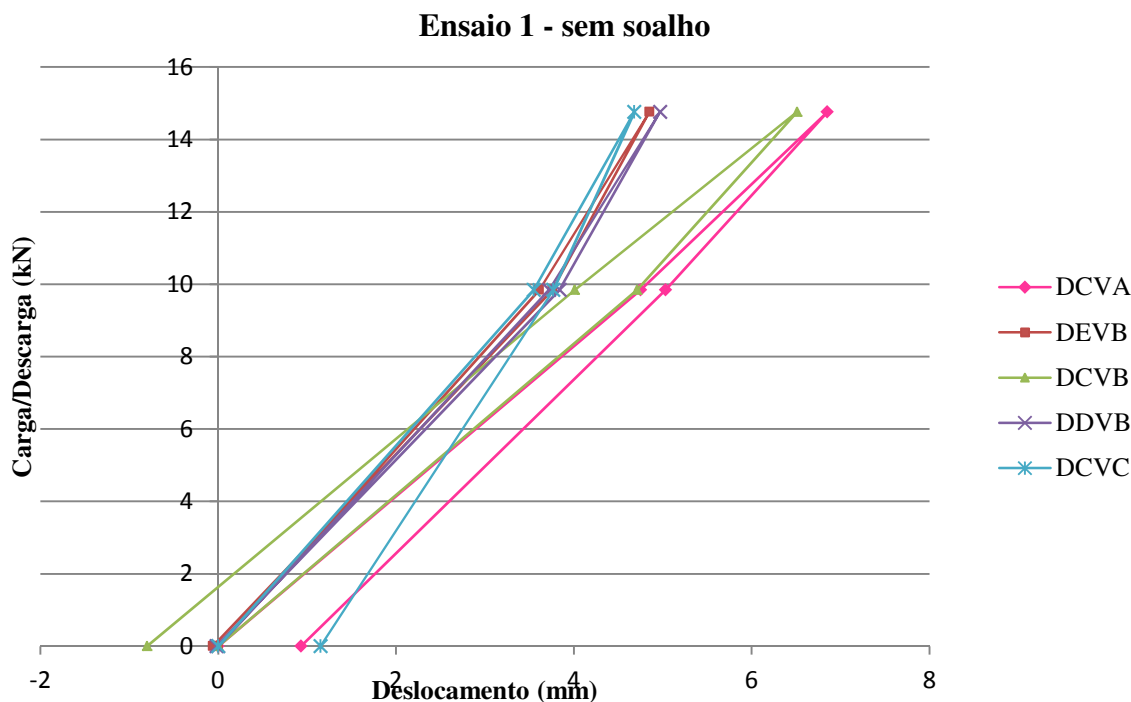


Figura 8.9 - Gráfico carga/descarga vs deslocamento para as 5 vigas do Ensaio 1 sem soalho.

- **Ensaio 2**

- Com a contribuição do soalho:

No ensaio do segundo pavimento verifica-se que as maiores flechas são justamente nos mesmos pontos do primeiro ensaio. As deformações máximas, com já era de esperar, são nos pontos centrais das vigas sendo que a deformação máxima registada é na viga B e tem o valor de 8,78mm.

Na Tabela 8.4 estão registados os valores das deformações nos vários pontos bem como o módulo de elasticidade correspondente. Os valores do módulo de elasticidade obtidos para os dois patamares de carga são bastante semelhantes em todos os pontos, exceto no ponto DCVB. O módulo de elasticidade obtido é de 13,66 kN/mm<sup>2</sup> e 11,25 kN/mm<sup>2</sup> para o 1º e 2º patamar de carga, respetivamente. Deste modo, o valor obtido para o 1º patamar de carga é elevado comparativamente com o 2º, que por sua vez está próximo do esperado. O elevado valor do módulo de elasticidade pode estar relacionado com erros na medição da deformação, excluindo assim esse valor no cálculo do módulo de elasticidade médio.

**Tabela 8.4 - Valores da deformação das várias vigas e módulos de elasticidade para o Ensaio 2, com a contribuição do soalho - carga.**

Defletómetro	Valores para 2 kN/m <sup>2</sup>		Valores para 3 kN/m <sup>2</sup>	
	Deformação total $\delta_{tot}$ (mm)	E (kN/mm <sup>2</sup> )	Deformação total $\delta_{tot}$ (mm)	E (kN/mm <sup>2</sup> )
DCVA	5,76	10,54	8,23	10,54
DEVB	4,65	10,53	6,5	10,83
DCVB	5,03*	13,66*	8,78	11,25
DDVB	4,42	11,07	6,3	11,17
DCVC	5,53	11,08	8,2	10,72

Na Tabela 8.5 estão registadas as deformações e módulos de elasticidade obtidos através do descarregamento do pavimento. Os valores, nalguns casos são um pouco diferentes, que se poderão dever a diversos fatores que serão analisados posteriormente. Neste caso também houve um aumento da deformação residual o que poderá traduzir algum problema na execução do ensaio.

**Tabela 8.5 - Valores da deformação das várias vigas e módulos de elasticidade para o Ensaio 2, com a contribuição do soalho e valores residuais - descarga.**

Defletómetro	Valores para 2 kN/m <sup>2</sup>		Valores para 0 kN/m <sup>2</sup>
	Deformação total $\delta_{tot}$ (mm)	E (kN/mm <sup>2</sup> )	Deformação final $\delta_{fin}$ (mm)
DCVA	6,50	9,34	-1,26
DEVB	4,20	11,65	-0,50
DCVB	6,70	10,25	-1,71
DDVB	5,95	8,23	-1,47
DCVC	6,32	9,69	-1,65

Neste caso, o valor médio para o módulo de elasticidade é  $E_{médio}=10,50\text{kN/mm}^2$ .

Na Figura 8.10 está representado o gráfico carga/descarga vs deslocamento do segundo ensaio ainda com o soalho.

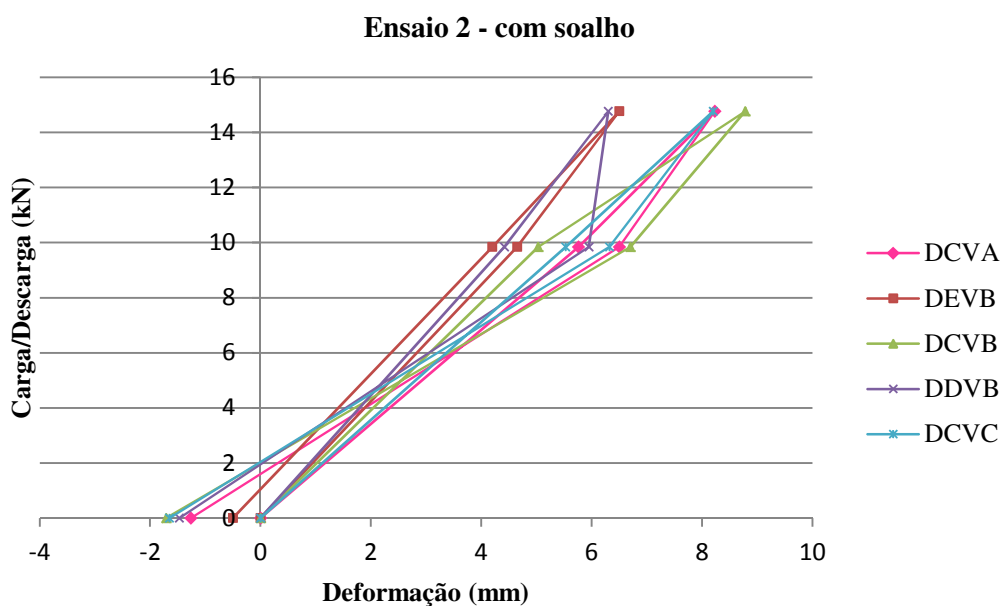


Figura 8.10 - Gráfico carga/descarga vs deslocamento para as 5 vigas do Ensaio 2 com soalho.

- Sem a contribuição do soalho:

Depois do corte do machedo do soalho, as deformações e módulos de elasticidade correspondentes estão indicados na Tabela 8.6. As maiores deformações verificam-se nos pontos centrais dos vigamentos. Através da análise da tabela denota-se que a maioria dos valores do módulo de elasticidade diminui no 2º patamar de carga.

Tabela 8.6 - Valores da deformação das várias vigas e módulos de elasticidade para o Ensaio 2, sem a contribuição do soalho – carga.

Defletómetro	Valores para 2 kN/m <sup>2</sup>		Valores para 3 kN/m <sup>2</sup>	
	Deformação total $\delta_{tot}$ (mm)	E (kN/mm <sup>2</sup> )	Deformação total $\delta_{tot}$ (mm)	E (kN/mm <sup>2</sup> )
DCVA	5,96	10,19	7,62	7,97
DEVB	4,51	10,85	6,34	7,72
DCVB	6,9	9,96	7,48	9,18
DDVB	4,28	11,44	5,92	8,27
DCVC	5,71	10,73	7,16	8,56

Após a descarga do pavimento registaram-se para valores de deformação e módulos de elasticidade os valores indicados na Tabela 8.7. As vigas exibem um comportamento linear tal como nos outros casos e recuperaram quase na totalidade as deformações na descarga.

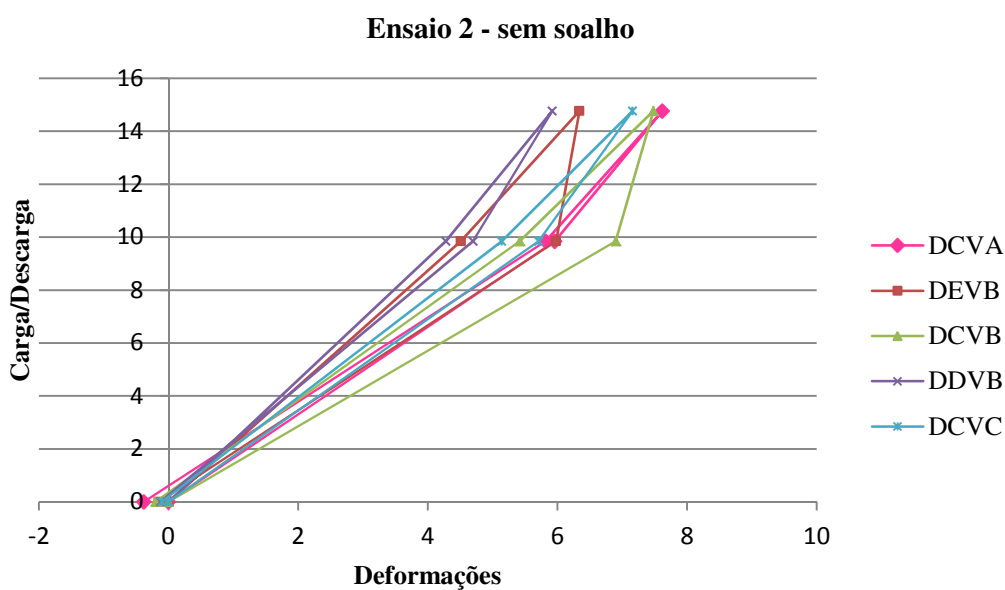
**Tabela 8.7 - Valores da deformação das várias vigas e módulos de elasticidade para o Ensaio 2, sem a contribuição do soalho e valores residuais - descarga**

Defletómetro	Valores para 2 kN/m <sup>2</sup>		Valores para 0 kN/m <sup>2</sup>
	Deformação total $\delta_{tot}$ (mm)	E (kN/mm <sup>2</sup> )	Deformação final $\delta_{fin}$ (mm)
DCVA	5,82	10,43	-0,38
DEVB	5,98	8,18	-0,15
DCVB	5,42	12,67	-0,20
DDVB	4,70	10,41	-0,12
DCVC	5,14	11,92	-0,10

Verifica-se que o ponto central de VB depois da descarga atinge uma deformação menor do que a registada quando realizado o carregamento, que se traduz num aumento do módulo de elasticidade. Ainda assim são considerados todos os valores para o cálculo do módulo de elasticidade médio por estes se localizarem num intervalo de valores aceitável.

Tendo em conta os valores do módulo de elasticidade, neste caso, resulta um  $E_{médio}=9,90\text{kN/mm}^2$ .

Conforme o realizado nos ensaios anteriores, foi possível obter o Gráfico carga/descarga vs deformação do segundo ensaio, não considerando o efeito do soalho, e que está representado na Figura 8.11.



**Figura 8.11 - Gráfico carga/descarga vs deslocamento para as 5 vigas do Ensaio 2 sem soalho.**

- **Ensaio 3**

- Com a contribuição do soalho:

Os resultados das deformações do ensaio 3, para os dois patamares de carga, estão dispostos na Tabela 8.8. O ponto onde se verifica uma maior deformação é o ponto central da viga A, cujo valor é 5,54mm.

**Tabela 8.8 - Valores da deformação das várias vigas e módulos de elasticidade para o Ensaio 3, com a contribuição do soalho - carga.**

Defletómetro	Valores para 2 kN/m <sup>2</sup>		Valores para 3 kN/m <sup>2</sup>	
	Deformação total $\delta_{tot}$ (mm)	E (kN/mm <sup>2</sup> )	Deformação total $\delta_{tot}$ (mm)	E (kN/mm <sup>2</sup> )
DCVA	4,6	10,34	5,54	12,54
DEVB	2,85	11,63	3,93	12,03
DCVB	3,73	12,47	4,45*	14,91*
DDVB	2,2*	15,06*	3,43	13,78
DCVC	2,83*	18,38*	4,4*	16,88*

À semelhança do que foi realizado dos ensaios anteriores procedeu-se à descarga do pavimento. Os valores da deformação para o descarregamento do mesmo pavimento encontram-se na Tabela 8.9. Verifica-se que o ponto com maior deformação é o ponto central da viga A, tal como no carregamento.

**Tabela 8.9 - Valores da deformação das várias vigas e módulos de elasticidade para o Ensaio 3, com a contribuição do soalho e valores residuais – descarga.**

Defletómetro	Valores para 2 kN/m <sup>2</sup>		Valores para 0 kN/m <sup>2</sup>
	Deformação total $\delta_{tot}$ (mm)	E (kN/mm <sup>2</sup> )	Deformação final $\delta_{fin}$ (mm)
DCVA	4,50	10,57	-1,73
DEVB*	2,25	14,73	-0,60
DCVB*	3,30	14,09	-0,10
DDVB	2,62	12,65	-0,80
DCVC*	3,40	15,30	-0,20

Tendo em conta os valores indicados nas duas tabelas anteriores, verificam-se valores bastante baixos de deformação e conseqüentemente elevados valores para o módulo de elasticidade. Tal

\* Pontos de valor anómalo de deformação e módulo de elasticidade.

facto sugere graves erros na execução do ensaio ou particularidades da estrutura, que permitem uma maior contribuição do soalho na deformação do pavimento. Tratando-se ainda de um limite elevado (tendo em conta que o módulo de elasticidade correspondente a madeira de classe EE é  $14\text{kN/mm}^2$ , e está é bastante difícil de encontrar), considera-se para o cálculo do módulo de elasticidade médio somente todos os valores abaixo de  $14\text{kN/mm}^2$ .

O módulo de elasticidade médio é portanto  $E_{\text{médio}}=12,00\text{kN/mm}^2$ .

O gráfico carga/descarga vs deformação resultante deste ensaio está representado na Figura 8.12.

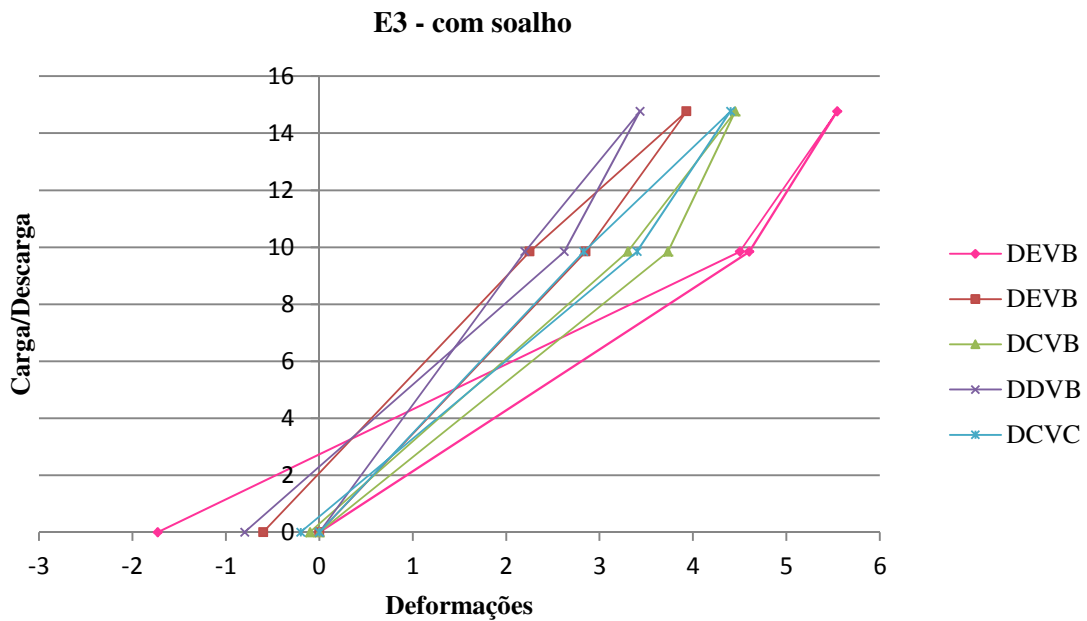


Figura 8.12 - Gráfico carga/descarga vs deslocamento para as 5 vigas do Ensaio 3 com soalho.

- Sem a contribuição do soalho:

Os resultados do valor das deformações e consequentemente do módulo de elasticidade vêm dispostos na Tabela 8.10. O valor da maior deformação é novamente maior no ponto central da viga A, no entanto os restantes valores da deformação são bastante reduzidos e por sua vez o módulo de elasticidade, o que poderá traduzir algum problema na execução do ensaio.

**Tabela 8.10 - Valores da deformação das várias vigas e módulos de elasticidade para o Ensaio 3, sem a contribuição do soalho - carga.**

Defletómetro	Valores para 2 kN/m <sup>2</sup>		Valores para 3 kN/m <sup>2</sup>	
	Deformação total $\delta_{tot}$ (mm)	E (kN/mm <sup>2</sup> )	Deformação total $\delta_{tot}$ (mm)	E (kN/mm <sup>2</sup> )
DCVA	4,6	10,34	5,4*	15,10*
DEVB	1,62*	20,45*	2,55*	29,18*
DCVB	2,9*	16,03*	3,15*	22,88*
DDVB	2,83	11,71	3,86*	16,70*
DCVC	2,05*	25,38*	4,3*	36,23*

Os valores da deformação registados aquando do descarregamento da viga estão indicados na Tabela 8.11. De modo análogo ao carregamento, o ponto central da viga A é onde se regista a maior deformação. Mais uma vez os restantes valores das deformações não parecem ser os mais razoáveis.

**Tabela 8.11 - Valores da deformação das várias vigas e módulos de elasticidade para o Ensaio 3, sem a contribuição do soalho e valores residuais – descarga.**

Defletómetro	Valores para 2 kN/m <sup>2</sup>		Valores para 0 kN/m <sup>2</sup>
	Deformação total $\delta_{tot}$ (mm)	E (kN/mm <sup>2</sup> )	Deformação final $\delta_{fin}$ (mm)
DCVA	4,32	11,01	-1,20
DEVB	1,77*	18,72*	-0,40
DCVB	2,13*	21,83*	-0,58
DDVB	2,97	11,16	-0,02
DCVC	2,35*	22,14*	-0,10

De modo análogo ao que foi realizado no caso em que se considera a contribuição do soalho serão tidos somente em conta, para o cálculo do valor de elasticidade médio, os valores de módulos de elasticidade superiores a 14kN/mm<sup>2</sup>.

Para este caso o módulo de elasticidade médio é  $E_{médio}=11,86\text{kN/mm}^2$ .

---

\* Valor anómalo de deformação e módulo de elasticidade.

A Figura 8.13 representa o gráfico carga/deslocamento vs deformação resultante do terceiro ensaio.

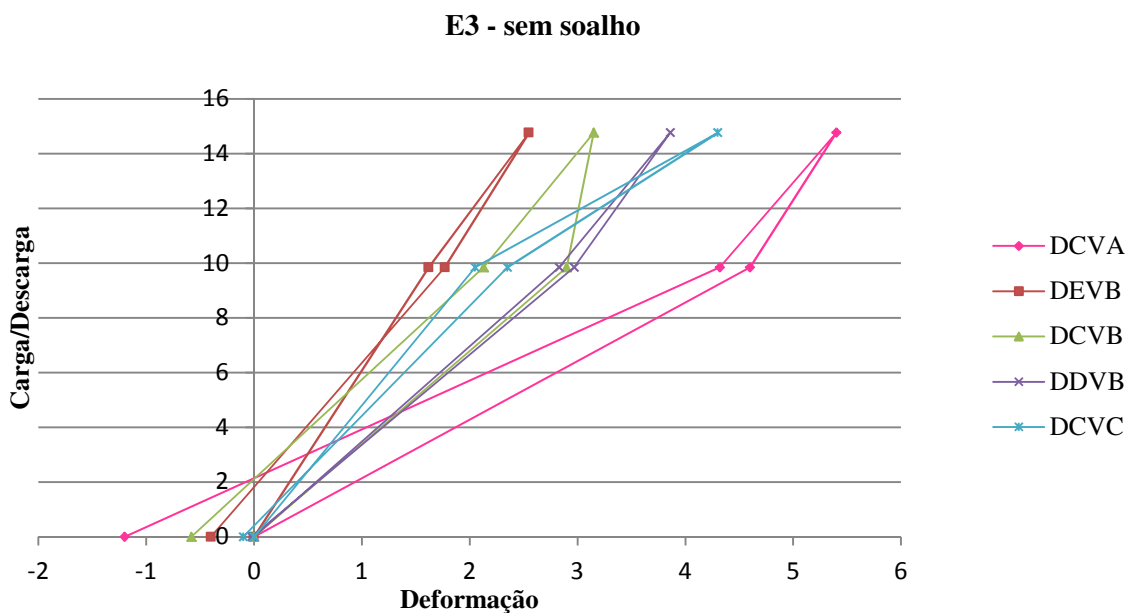


Figura 8.13 - Gráfico carga/descarga vs deslocamento para as 5 vigas do Ensaio 3 sem soalho.

- **Ensaio 4**

- Com a contribuição do soalho:

Na Tabela 8.12 estão indicados os valores das deformações bem como os valores dos módulos de elasticidade correspondentes. Verifica-se que é no ponto central da viga A que ocorreu uma maior deformação. No ponto à direita da viga B registou-se um valor muito reduzido de deformação, comparativamente aos outros dois pontos da mesma viga. Este facto, pode estar relacionado com algum tipo de problema no defletómetro, nomeadamente a sua instalação.

**Tabela 8.12 - Valores da deformação das várias vigas e módulos de elasticidade para o Ensaio 4, com a contribuição do soalho – carga.**

Defletómetro	Valores para 2 kN/m <sup>2</sup>		Valores para 3 kN/m <sup>2</sup>	
	Deformação total $\delta_{tot}$ (mm)	E (kN/mm <sup>2</sup> )	Deformação total $\delta_{tot}$ (mm)	E (kN/mm <sup>2</sup> )
DCVA	8,5	7,01	11,28	7,59
DEVB	4,53	9,42	6,24	9,78
DCVB	3,46*	17,30*	6,9	12,41
DDVB	1,84*	23,18*	2,35*	25,96*
DCVC	3,24*	14,37*	5,45	12,82

Para a descarga nesta situação obteve-se os valores que estão indicados na Tabela 8.13. Confirma-se que a maior deformação ocorre no ponto central da viga A e verifica-se novamente uma deformação muito baixa comparativamente aos outros pontos da mesma viga. Consequentemente um módulo de elasticidade é bastante elevado.

**Tabela 8.13 - Valores da deformação das várias vigas e módulos de elasticidade para o Ensaio 4, com a contribuição do soalho e valores residuais – descarga.**

Defletómetro	Valores para 2 kN/m <sup>2</sup>		Valores para 0 kN/m <sup>2</sup>
	Deformação total $\delta_{tot}$ (mm)	E (kN/mm <sup>2</sup> )	Deformação final $\delta_{fin}$ (mm)
DCVA	8,10	7,36	-0,10
DEVB	4,88	8,74	-0,95
DCVB	3,88	15,43*	0,00
DDVB	1,08	39,50*	0,00
DCVC	3,92	11,88	-0,12

Considerando que os valores do módulo de elasticidade para o ponto à direita da viga B não fazem qualquer sentido, foram excluídos do cálculo do módulo de elasticidade médio. De modo análogo ao realizado no Ensaio 3 foram excluídos todos os valores superiores a 14kN/mm<sup>2</sup> no cálculo do módulo de elasticidade médio. Assim o valor resultante é  $E_{médio}=9,67\text{kN/mm}^2$ .

No Gráfico que se segue (Figura 8.14) estão representados os valores de carga/descarga vs deslocamento para este ensaio.

\* Valor anómalo de deformação e módulo de elasticidade.

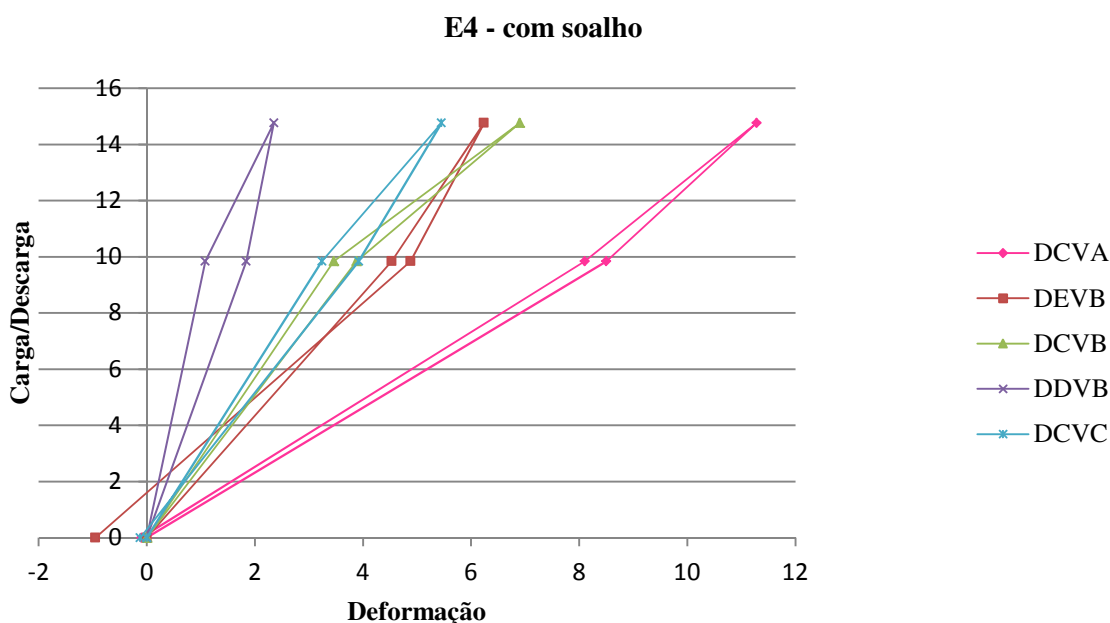


Figura 8.14 - Gráfico carga/descarga vs deslocamento para as 5 vigas do Ensaio 4 com soalho.

- Sem a contribuição do soalho:

Na Figura 8.14 estão indicados os valores da deformação obtida depois do corte do soalho. O ponto com maior deformação é novamente o ponto central da viga A.

Tabela 8.14 - Valores da deformação das várias vigas e módulos de elasticidade para o Ensaio 4, sem a contribuição do soalho - carga.

Defletómetro	Valores para 2 kN/m <sup>2</sup>		Valores para 3 kN/m <sup>2</sup>	
	Deformação total $\delta_{tot}$ (mm)	E (kN/mm <sup>2</sup> )	Deformação total $\delta_{tot}$ (mm)	E (kN/mm <sup>2</sup> )
DCVA	8,15	7,31	12,6	6,79
DEVB	3,9	10,94	5,72	10,66
DCVB	5,32	10,82	7,8	10,98
DDVB	3,95	10,80	5,55	10,99
DCVC	3,97	11,73	5,77	12,11

Após a descarga, o ponto com maior deformação é o mesmo e, depois da descarga total, verificam-se valores muito baixos de deformação residual (Tabela 8.15). Comparando os valores de deformação e módulo de elasticidade obtidos com caso do soalho macheado e sem macheado, verifica-se uma alteração dos mesmos para valores bastante mais razoáveis e que vão de encontro com a realidade. Este facto pode ser devido a qualquer problema com próprio

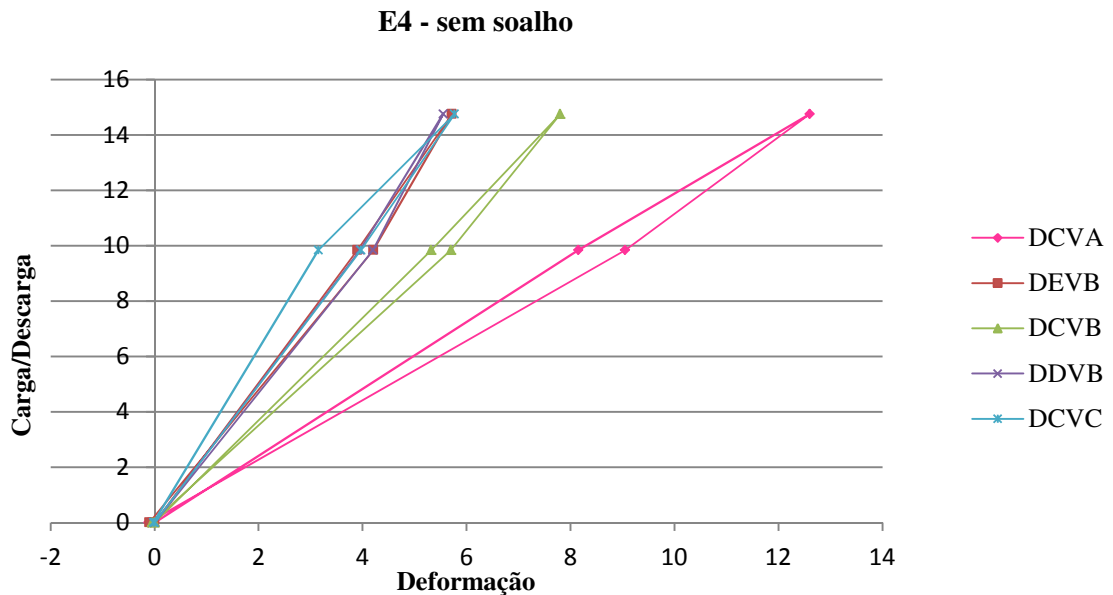
soalho ou até mesmo com a transmissão de cargas à viga, podendo o soalho deformar-se sem transmitir à viga e iludindo o real valor da deformação.

**Tabela 8.15 - Valores da deformação das várias vigas e módulos de elasticidade para o Ensaio 4, sem a contribuição do soalho e valores residuais – descarga.**

Defletómetro	Valores para 2 kN/m <sup>2</sup>		Valores para 0 kN/m <sup>2</sup>
	Deformação total $\delta_{tot}$ (mm)	E (kN/mm <sup>2</sup> )	Deformação final $\delta_{final}$ (mm)
DCVA	9,05	6,59	-0,12
DEVB	4,21	10,13	-0,10
DCVB	5,70	10,50	-0,05
DDVB	4,20	10,16	0,00
DCVC	3,15*	14,78*	-0,02

Do cálculo do módulo de elasticidade médio resulta um  $E_{médio}=10,07\text{kN/mm}^2$ .

A Figura 8.15 representa o gráfico carga/descarga no ensaio 4, sem considerar a influência do soalho.



**Figura 8.15 - Gráfico carga/descarga vs deslocamento para as 5 vigas do Ensaio 4 sem soalho.**

\* Valor anómalo de deformação e módulo de elasticidade.

## **9. Desempenho teórico de vigamentos de madeira**

À semelhança do que foi realizado anteriormente, o desempenho teórico será analisado tendo em conta modelos estruturais do pavimento, com o apoio do programa estrutural SAP2000.

O modelo estrutural utilizado tem em conta as características geométricas da estrutura, tendo-se considerado elementos lineares sem empenos e as dimensões reais da estrutura para que seja possível simular as características e o comportamento real da estrutura.

### **9.1. Classificação visual de estruturas de madeira em serviço**

#### **9.1.1. Método de classificação visual**

Numa inspeção visual detalhada de uma estrutura de madeira em serviço é necessário analisar diversos fatores, tais como: a identificação da espécie de madeira, a determinação do teor de humidade, os esforços a que o elemento está sujeito, bem como a identificação de danos biológicos [41].

- **Identificação da espécie de madeira**

A identificação da espécie de madeira pode ser realizada através da inspeção visual. Em alguns casos, podem ser necessárias amostras para a identificação da espécie em causa, através da análise macroscópica ou microscópica [41].

- **Determinação do teor de humidade**

O teor de humidade deve ser verificado nos pontos onde há maior risco de ataque biológico, ou seja, junto às ligações. A humidade em determinado elemento deve ser medida em vários pontos e em várias profundidades.

Através das medições do teor em humidade é possível determinar as condições ambientais locais, assim como a classe de risco para cada elemento. No entanto, num elemento podem ser verificadas condições ambientais distintas. Com esta análise é possível estabelecer uma relação com o avanço do ataque biológico e estabelecer as intervenções necessárias para a redução do risco de ataque [41].

- Esforços a que o elemento está sujeito

A avaliação de estruturas de madeira com valor histórico pressupõe sempre a reutilização dos elementos. Assim, a primeira etapa na avaliação de madeira antiga é considerar as suas condições de carga para posterior análise das tensões a que esta está sujeita. Deste modo, é necessário numa primeira análise o reconhecimento do sistema estrutural em causa.

As regras de classificação atuais utilizadas para estruturas de madeira correntes não se adequam para a classificação de madeira velha por uma série de razões. No entanto, os elementos de madeira podem ser analisados conforme o tipo de elemento estrutural, ou seja, consoante o tipo de função que tem em determinada estrutura. Para elementos sujeitos a flexão, onde poderá haver distribuição de carga (caso das vigas), os defeitos mais importantes a ter com conta na classificação são os nós e as fendas. As fendas são prejudiciais em locais onde existe esforço de corte e os nós são limitativos em zonas tracionadas. Os nós localizados na parte comprimida da viga não são significativos [41].

- Identificação de danos biológicos

Na identificação de danos biológicos é importante reconhecer, identificar e caracterizar. Nesta análise devem estabelecer-se relações entre os danos biológicos e as condições ambientais. Como foi referido anteriormente, é importante uma análise do teor de humidade na peça.

Na presença de um ataque de agentes biológicos, a estimativa da seção transversal efetiva é bastante difícil dado que o elemento está em serviço. No entanto, existem técnicas não destrutivas, nomeadamente os métodos de perfuração, que podem ajudar a estabelecer a perda de densidade devido ao ataque dos fungos com a redução das propriedades mecânicas da madeira [41].

#### 9.1.2. Classificação visual

Tal como foi referido anteriormente, para a realização de uma inspeção visual *in situ* importa analisar 4 parâmetros: Identificação da espécie de madeira, análise do teor em água, análise dos esforços a que a peça está sujeita e identificação de danos biológicos.

- Identificação da espécie de madeira

A madeira em causa possui uma cor amarelo-pálida no borne e castanho avermelhada pouco acentuada no cerne, é também heterogénea e de textura grosseira, ainda assim, não é possível concluir-se de que espécie de madeira se trata. A identificação da espécie de madeira em causa deveria ser feita em laboratório onde fosse possível analisar a sua estrutura microscópica. No entanto, devido a essa impossibilidade considera-se a madeira em causa é de pinho bravo.

- Determinação do teor de humidade

A medição do teor em humidade dos vigamentos foi feita de acordo com o já descrito no capítulo 7.1. Para uma análise mais detalhada dos defeitos da madeira foi necessário lavar as vigas com jatos de água, no entanto os vigamentos de madeira não sofreram alterações dos níveis de humidade. Todos os pontos onde foi efetuada a medição apresentam um teor de humidade entre os 14 e os 16%.

- Esforços a que o elemento está sujeito

Conforme referido anteriormente uma peça de madeira que já se encontre em serviço tem de ser analisada segundo os esforços a que esta está sujeita.

Tratando-se de uma viga simplesmente apoiada sujeita a um carregamento uniformemente distribuído importa analisar os nós na zona central da viga, por ser onde se verifica maiores esforços de tração e, por isso, aonde a descontinuidade longitudinal causada pelos nós é mais pernicioso. Junto aos apoios é importante analisar as fendas pois é onde existe maior esforço de corte.

De seguida serão analisadas separadamente todos os vigamentos e serão enquadrados em determinada classe de resistência, segundo os limites estabelecidos pela norma e que estão representados no Anexo A.

Ensaio 1 – Viga A

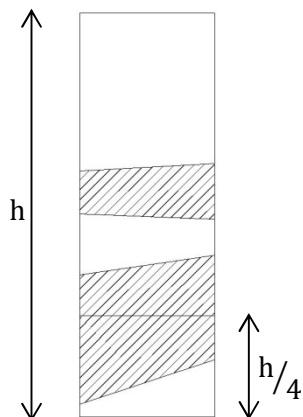


Figura 9.1 - Projeção dos nós para avaliação do KAR marginal e KAR total – viga A do Ensaio 1.

Tabela 9.1 – Avaliação do KAR marginal e KAR total da viga A do Ensaio 1.

Área marginal (cm <sup>2</sup> )	42,19
Área marginal ocupada pelos nós (cm <sup>2</sup> )	27,56
Área total do vigamento (cm <sup>2</sup> )	168,75
Área total ocupada pelos nós (cm <sup>2</sup> )	69,38
KAR marginal	0,65
KAR total	0,41

Como,

$$KAR_M \geq \frac{1}{2} \text{ e } KAR_T > \frac{1}{3} \rightarrow \text{REJEITA qualquer uma das classes de qualidade}$$

A viga em causa possui duas fendas que podem ser condicionantes na sua resistência. Junto ao apoio da esquerda observa-se uma fenda repassada de 43 cm de comprimento, aproximadamente. No apoio da direita existe também uma fenda repassada com cerca de 23 cm. Tendo em conta os limites para as fendas indicados no Anexo A, a viga não cumpre os requisitos necessários para se enquadrar numa das classes de qualidade do Pinheiro bravo.

Assim, para esta esta viga é necessário atribuir uma classe de resistência mais baixa do que a considerada inicialmente. Nos modelos estruturais a ser analisados posteriormente utilizar-se-á um módulo de elasticidade menor de valor de 11 GPa.

### Ensaio 1 – Viga B

Na viga B verificam-se dois grupos de nós distintos que podem colocar em causa a resistência da peça, serão analisados independentemente de forma a verificar qual o mais prejudicial.

1º Caso:

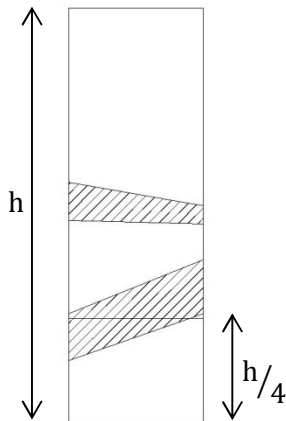


Tabela 9.2 - Avaliação do KAR marginal e KAR total da viga B do Ensaio 1 (1º caso).

Área marginal (cm <sup>2</sup> )	43,13
Área marginal ocupada pelos nós (cm <sup>2</sup> )	7,97
Área total do vigamento (cm <sup>2</sup> )	172,5
Área total ocupada pelos nós (cm <sup>2</sup> )	32,63
KAR marginal	0,18
KAR total	0,19

Figura 9.2 - Projeção dos nós para avaliação do KAR marginal e KAR total – viga B Ensaio 1 (1º caso).

Como,

$$KAR_M \leq \frac{1}{5} \text{ e } KAR_T \leq \frac{1}{5} \rightarrow \text{Classe de qualidade EE}$$

2º Caso:

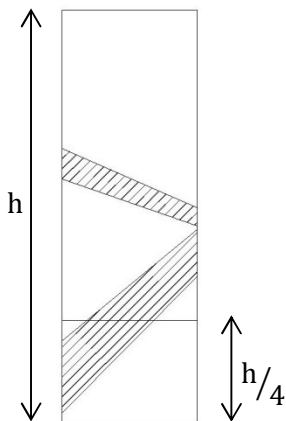


Tabela 9.3 - Avaliação do KAR marginal e KAR total da viga B do Ensaio 1 (2º caso).

Área marginal (cm <sup>2</sup> )	43,13
Área marginal ocupada pelos nós (cm <sup>2</sup> )	12,29
Área total do vigamento (cm <sup>2</sup> )	172,5
Área total ocupada pelos nós (cm <sup>2</sup> )	34,88
KAR marginal	0,28
KAR total	0,20

Figura 9.3 - Projeção dos nós para avaliação do KAR marginal e KAR total – viga B Ensaio 1 (2º caso).

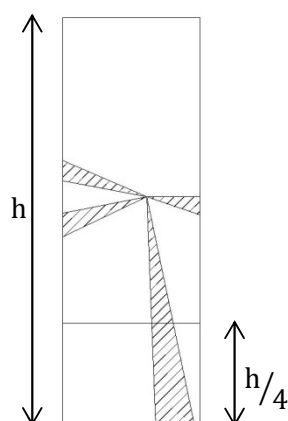
Como,

$$KAR_M \leq \frac{1}{2} \text{ e } KAR_T \leq \frac{1}{2} \rightarrow \text{Classe de qualidade E}$$

Na viga A do ensaio 1 observa-se uma fenda não repassada horizontal com cerca de 31cm junto ao apoio da esquerda, que está dentro dos limites estabelecidos na norma. Verifica-se ainda, junto ao apoio da direita, uma fenda repassada com cerca de 30cm e uma não repassada com cerca de 36 cm, ambas horizontais. A fenda não repassada não apresenta qualquer inconveniente, no entanto a fenda repassada não está de acordo com os limites estipulados para as classes de pinho bravo.

Portanto, neste caso, também se terá de optar por uma madeira com módulo de elasticidade menor, cujo valor é 11GPa.

#### Ensaio 1 – Viga C



**Tabela 9.4 - Avaliação do KAR marginal e KAR total da viga C do Ensaio 1.**

Área marginal (cm <sup>2</sup> )	42,19
Área marginal ocupada pelos nós (cm <sup>2</sup> )	9,18
Área total do vigamento (cm <sup>2</sup> )	168,75
Área total ocupada pelos nós (cm <sup>2</sup> )	20,2
KAR marginal	0,22
KAR total	0,12

**Figura 9.4 - Projeção dos nós para avaliação do KAR marginal e KAR total – viga C Ensaio 1.**

Como,

$$KAR_M \leq \frac{1}{2} \text{ e } KAR_T \leq \frac{1}{2} \rightarrow \text{Classe de qualidade E}$$

Neste caso, o vigamento apresenta uma fenda horizontal não repassada ao longo de toda a viga, mas que de acordo com os limites exigidos, exclui a peça das duas classes de qualidade em causa. Deste modo, é necessário enquadrar esta viga numa classe de resistência menor.

Ensaio 2 – Viga A

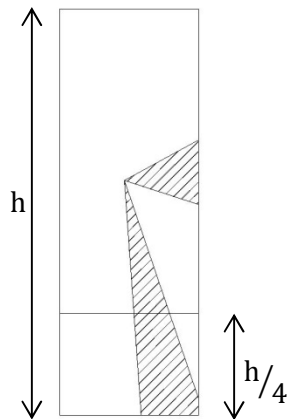


Figura 9.5 - Projeção dos nós para avaliação do KAR marginal e KAR total – viga A Ensaio 2.

Tabela 9.5 - Avaliação do KAR marginal e KAR total da viga A do Ensaio 2.

Área marginal (cm <sup>2</sup> )	41,25
Área marginal ocupada pelos nós (cm <sup>2</sup> )	14,54
Área total do vigamento (cm <sup>2</sup> )	165
Área total ocupada pelos nós (cm <sup>2</sup> )	28,48
KAR marginal	0,35
KAR total	0,17

Como,

$$KAR_M \leq \frac{1}{2} \text{ e } KAR_T \leq \frac{1}{2} \rightarrow \text{Classe de qualidade E}$$

Neste caso, a viga apresenta uma fenda horizontal não repassada ao longo de todo o seu comprimento, o que não satisfaz os limites exigidos pela norma. Assim, mais uma vez terá de se admitir uma classe de resistência menor.

Ensaio 2 – Viga B

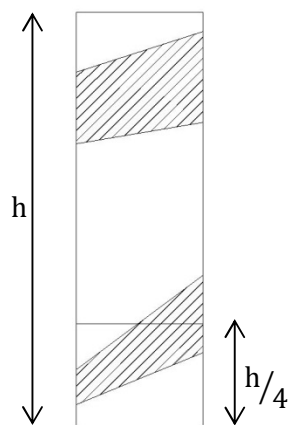


Figura 9.6 - Projeção dos nós para avaliação do KAR marginal e KAR total – viga B Ensaio 2.

Tabela 9.6 - Avaliação do KAR marginal e KAR total da viga B do Ensaio 2.

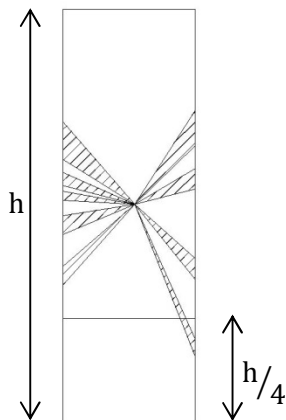
Área marginal (cm <sup>2</sup> )	34,94
Área marginal ocupada pelos nós (cm <sup>2</sup> )	14,5
Área total do vigamento (cm <sup>2</sup> )	139,75
Área total ocupada pelos nós (cm <sup>2</sup> )	46,15
KAR marginal	0,41
KAR total	0,33

Como,

$$KAR_M \leq \frac{1}{2} \text{ e } KAR_T \leq \frac{1}{2} \rightarrow \text{Classe de qualidade E}$$

Este vigamento apresenta fendas oblíquas repassadas ao longo de toda a viga, que variam entre os 30 e os 60 cm, o que faz com que não sejam cumpridos os limites necessários. Desta forma, terá de se optar por uma classe de resistência mais baixa.

### Ensaio 2 – Viga C



**Tabela 9.7 - Avaliação do KAR marginal e KAR total da viga C do Ensaio 2.**

Área marginal (cm <sup>2</sup> )	38,5
Área marginal ocupada pelos nós (cm <sup>2</sup> )	0,52
Área total do vigamento (cm <sup>2</sup> )	154
Área total ocupada pelos nós (cm <sup>2</sup> )	17,88
KAR marginal	0,01
KAR total	0,12

**Figura 9.7 - Projeção dos nós para avaliação do KAR marginal e KAR total – viga C Ensaio 2.**

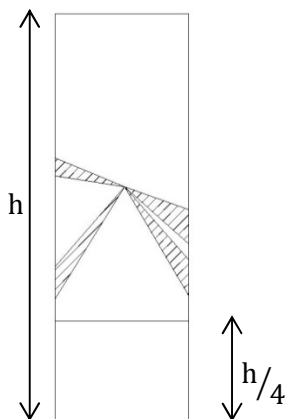
Como,

$$KAR_M \leq \frac{1}{5} \text{ e } KAR_T \leq \frac{1}{5} \rightarrow \text{Classe de qualidade EE}$$

No entanto a classe de qualidade EE não admite medula no interior da peça, o que significa que esta pertence a uma classe de qualidade E.

Neste caso, a viga apresenta uma falha horizontal ao longo de todo o elemento, o que não cumpre com os critérios exigidos. Desta forma a classe de qualidade referida anteriormente não é válida neste caso e é necessário atribuir à viga uma classe de resistência menor.

Ensaio 3 – Viga A



**Tabela 9.8 - Avaliação do KAR marginal e KAR total da viga A do Ensaio 3.**

Área marginal (cm <sup>2</sup> )	43,13
Área marginal ocupada pelos nós (cm <sup>2</sup> )	0
Área total do vigamento (cm <sup>2</sup> )	172,5
Área total ocupada pelos nós (cm <sup>2</sup> )	12,53
KAR marginal	0,00
KAR total	0,07

**Figura 9.8 - Projeção dos nós para avaliação do KAR marginal e KAR total – viga A Ensaio 3.**

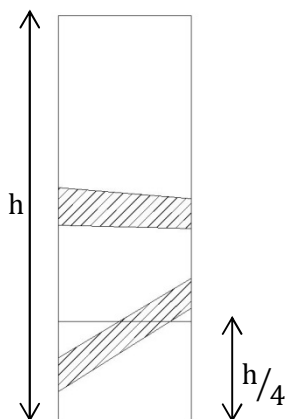
Como,

$$KAR_M \leq \frac{1}{5} \text{ e } KAR_T \leq \frac{1}{5} \rightarrow \text{Classe de qualidade EE}$$

Mais uma vez, a classe de qualidade EE não admite medula no interior da peça, o que significa que esta pertence a uma classe de qualidade E.

A viga em causa apresenta uma fenda repassada ao longo de todo o seu comprimento, e por isso não cumpre os limites exigidos na norma.

Ensaio 3 – Viga B



**Tabela 9.9 - Avaliação do KAR marginal e KAR total da viga B do Ensaio 3.**

Área marginal (cm <sup>2</sup> )	43,13
Área marginal ocupada pelos nós (cm <sup>2</sup> )	8,95
Área total do vigamento (cm <sup>2</sup> )	172,5
Área total ocupada pelos nós (cm <sup>2</sup> )	27,75
KAR marginal	0,21
KAR total	0,16

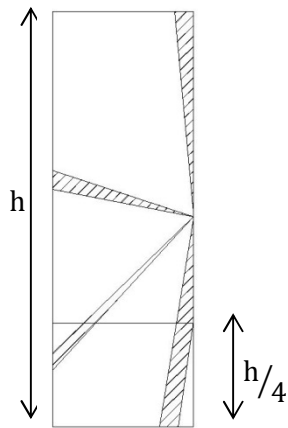
**Figura 9.9 - Projeção dos nós para avaliação do KAR marginal e KAR total – viga B Ensaio 3.**

Como,

$$KAR_M \leq \frac{1}{2} \text{ e } KAR_T \leq \frac{1}{2} \rightarrow \text{Classe de qualidade E}$$

Neste caso, o vigamento apresenta uma fenda não repassada ao longo de todo o seu comprimento. Assim, este elemento não cumpre as exigências para ser considerado da classe de qualidade acima referida. Deste modo é necessário atribuir a este elemento uma classe de resistência menor.

### Ensaio 3 – Viga C



**Tabela 9.10 - Avaliação do KAR marginal e KAR total da viga C do Ensaio 3.**

Área marginal (cm <sup>2</sup> )	41,63
Área marginal ocupada pelos nós (cm <sup>2</sup> )	6,78
Área total do vigamento (cm <sup>2</sup> )	165
Área total ocupada pelos nós (cm <sup>2</sup> )	20,36
KAR marginal	0,16
KAR total	0,12

**Figura 9.10 - Projeção dos nós para avaliação do KAR marginal e KAR total – viga C Ensaio 3.**

Como,

$$KAR_M \leq \frac{1}{5} \text{ e } KAR_T \leq \frac{1}{5} \rightarrow \text{Classe de qualidade EE}$$

Neste caso, a viga apresenta uma fenda ao longo de todo o seu comprimento. Apesar da fenda ser parcialmente repassada, não cumpre com as exigências estabelecidas na norma.

#### Ensaio 4 – Viga A

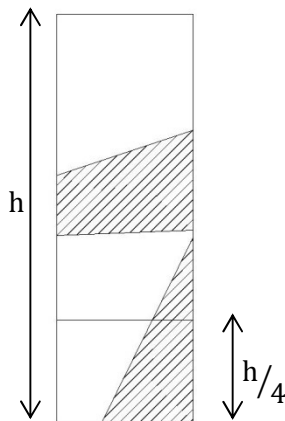


Figura 9.11 - Projeção dos nós para avaliação do KAR marginal e KAR total – viga A Ensaio 4.

Tabela 9.11 - Avaliação do KAR marginal e KAR total da viga A do Ensaio 4.

Área marginal (cm <sup>2</sup> )	42,19
Área marginal ocupada pelos nós (cm <sup>2</sup> )	20,37
Área total do vigamento (cm <sup>2</sup> )	168,75
Área total ocupada pelos nós (cm <sup>2</sup> )	58,5
KAR marginal	0,48
KAR total	0,35

Como,

$$KAR_M \leq \frac{1}{2} \text{ e } KAR_T \leq \frac{1}{2} \rightarrow \text{Classe de qualidade E}$$

A viga em causa apresenta uma fenda repassada com cerca de 50cm no apoio da esquerda e uma fenda não repassada com cerca de 1,5cm junto ao apoio da direita. No entanto, não são cumpridas as exigências no que respeita às limitações das mesmas e portanto é necessário considerar que o elemento pertence a uma classe de resistência menor.

#### Ensaio 4 – Viga B

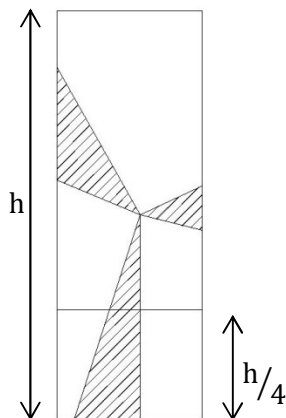


Figura 9.12 - Projeção dos nós para avaliação do KAR marginal e KAR total – viga B Ensaio 4.

Tabela 9.12 - Avaliação do KAR marginal e KAR total da viga B do Ensaio 4.

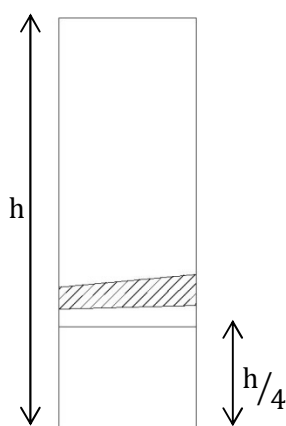
Área marginal (cm <sup>2</sup> )	42,19
Área marginal ocupada pelos nós (cm <sup>2</sup> )	14
Área total do vigamento (cm <sup>2</sup> )	157,5
Área total ocupada pelos nós (cm <sup>2</sup> )	34
KAR marginal	0,33
KAR total	0,22

Como,

$$KAR_M \leq \frac{1}{2} \text{ e } KAR_T \leq \frac{1}{2} \rightarrow \text{Classe de qualidade E}$$

A viga em causa apresenta uma fenda não repassada no apoio da direita com cerca de 1,45m. Segundo os limites estabelecidos pela norma, não poderá ser considerada da classe de qualidade acima indicada.

Ensaio 4 – Viga C



**Tabela 9.13 - Avaliação do KAR marginal e KAR total da viga C do Ensaio 4.**

Área marginal (cm2)	42,17
Área marginal ocupada pelos nós (cm2)	0
Área total do vigamento (cm2)	168,75
Área total ocupada pelos nós (cm2)	10,88
KAR marginal	0,00
KAR total	0,06

**Figura 9.13 - Projeção dos nós para avaliação do KAR marginal e KAR total – viga C Ensaio 4.**

Como,

$$KAR_M \leq \frac{1}{5} \text{ e } KAR_T \leq \frac{1}{5} \rightarrow \text{Classe de qualidade EE}$$

Neste caso verifica-se uma fenda repassada ao longo de todo o comprimento da viga. Deste modo, não são cumpridos os parâmetros exigidos pela norma e este elemento é considerado de uma classe de resistência inferior.

- Identificação de danos biológicos

No que refere ao ataque devido por organismos vivos, todos os vigamentos, à exceção das vigas B e C do ensaio 2, apresentam uma madeira sã, sem quaisquer indícios de degradação biológica. As vigas B e C do ensaio 2 apresentam características que sugerem um possível ataque de caruncho, nomeadamente as galerias que estes fazem ao alimentar-se da madeira (Figura 9.14). O ataque devido ao caruncho provoca uma redução da secção transversal da peça. No entanto não é possível estimar qual a dimensão do ataque de forma a estabelecer a classe de risco do elemento.



**Figura 9.14 – Indício de ataque biológico nos vigamentos de madeira.**

## **9.2. Modelos estruturais e deformações teóricas**

Os modelos estruturais analisados neste capítulo têm em conta as características geométricas da estrutura e a classificação visual feita anteriormente. A classificação visual indica que a classe de qualidade utilizada previamente não corresponde à realidade, a madeira em causa pertence a uma classe de qualidade menor. Todos os vigamentos serão considerados com um módulo de elasticidade de 11GPa e uma massa volúmica de 420kg/m<sup>3</sup>.

A análise estrutural é realizada à semelhança do Capítulo 7.3, alterando somente as características da madeira em causa.

- **Ensaio 1**

Para o primeiro ensaio as deformações obtidas através da análise estrutural são as representadas na Tabela 9.14.

**Tabela 9.14 - Valores das deformações para a combinação rara e em estado limite último – Ensaio 1.**

Defletómetro	Deformações (m)	
	Rara	ELU
DCVA	0,0048	0,0069
DEVB	0,0034	0,0049
DCVB	0,0048	0,0069
DDVB	0,0034	0,0049
DCVC	0,0048	0,0069

- **Ensaio 2**

A Tabela 9.15 indica os valores das deformações teóricas nos diversos pontos para o segundo ensaio.

**Tabela 9.15 - Valores das deformações para a combinação rara e em estado limite último – Ensaio 2.**

Defletómetro	Deformações (m)	
	Rara	ELU
DCVA	0,0057	0,0082
DEVB	0,0041	0,0059
DCVB	0,0057	0,0082
DDVB	0,0041	0,0059
DCVC	0,0057	0,0082

- **Ensaio 3**

Na tabela seguinte (Tabela 9.16) estão indicadas os valores das deformações teóricas para o terceiro ensaio.

**Tabela 9.16 - Valores das deformações para a combinação rara e em estado limite último – Ensaio 3.**

Defletómetro	Deformações (m)	
	Rara	ELU
DCVA	0,005	0,0073
DEVB	0,0036	0,0051
DCVB	0,005	0,0073
DDVB	0,0036	0,0051
DCVC	0,005	0,0073

- **Ensaio 4**

Tendo em conta as características estruturais do quarto pavimento estudado, obtiveram-se as deformações representadas na Tabela 9.17.

**Tabela 9.17 - Valores das deformações para a combinação rara e em estado limite último – Ensaio 4.**

Defletómetro	Deformações (m)	
	Rara	ELU
DCVA	0,0049	0,0071
DEVB	0,0035	0,0051
DCVB	0,0049	0,0071
DDVB	0,0035	0,0051
DCVC	0,0049	0,0071



## 10. Discussão dos resultados da análise experimental

No presente capítulo e numa primeira fase serão analisados todos os resultados obtidos experimentalmente, comparando-os entre si de forma a estabelecer algumas relações e identificar possíveis erros experimentais. Posteriormente serão estabelecidas relações entre os resultados obtidos experimentalmente e os obtidos através da análise teórica do pavimento.

- **Comparação de deformações totais,  $\delta_{tot}$ , entre ensaios para o caso de carga**

- *Com a contribuição do soalho:*

Segundo a Tabela 10.1, verifica-se, tal como seria de esperar, que as maiores deformações ocorrem nos pontos centrais da viga, ou seja, a meio vão. No entanto, a maior deformação na maior parte dos casos ocorre no ponto central da viga A. Tendo em conta a estrutura em si, e analisando as larguras de influência a que cada viga está sujeita, a largura da faixa da viga A é mais pequena que a B somente no ensaio 1. Dado que a carga a que cada viga está sujeita está diretamente relacionada com a largura de influência, pode justificar o facto da deformação no ponto central da viga A seja mais pequena do que a meio vão da viga B. De forma análoga, nos restantes ensaios a largura de influência da viga B é menor que a da viga A e consequentemente o valor da deformação será menor em B.

Os pontos que se situam a um quarto de vão (DEVB) e a três quartos de vão (DDVB) da viga B, deviam, à partida, ter deformações semelhantes, tendo em conta o modelo estrutural de viga simplesmente apoiada. Essa semelhança de deformações é verificada, exceto no ensaio 3 que no ponto DEVB resultou um deslocamento de 4,53mm e no ponto DDVB de 1,84mm. Esta diferença não possui qualquer significado estrutural, tendo certamente ocorrido por erros de execução do ensaio ou falha com o defletómetro.

**Tabela 10.1 – Deformações totais para carregamento de 2 kN/m<sup>2</sup> – com soalho.**

Ensaio	Deformação total $\delta_{tot}$ para carregamento 2 kN/m <sup>2</sup> (mm)				
	DCVA	DEVB	DCVB	DDVB	DCVC
E1	4,03	3,53	4,77	3,79	3,36
E2	5,76	4,65	5,03	4,42	5,53
E3	4,6	2,85	3,73	2,2	2,83
E4	8,5	4,53	3,46	1,84	3,24

Analisando o patamar de carga seguinte,  $3\text{kN/m}^2$  (Tabela 10.2), são verificadas as mesmas analogias e retiradas as mesmas conclusões. No entanto, no ensaio 2, apesar da largura de influência da viga A ser maior que a de B verifica-se uma deformação maior no ponto B. Porém, esta diferença é na ordem das centésimas de milímetro e portanto não tem qualquer significado.

**Tabela 10.2 - Deformações totais para carregamento de  $3\text{kN/m}^2$  – com soalho.**

Ensaio	Deformação total $\delta_{tot}$ para carregamento $3\text{kN/m}^2$ (mm)				
	DCVA	DEVB	DCVB	DDVB	DCVC
E1	5,67	4,88	6,65	5,75	4,82
E2	8,23	6,5	8,78	6,3	8,2
E3	5,54	3,93	4,45	3,43	4,4
E4	11,28	6,24	6,9	2,35	5,45

- Sem a contribuição do soalho:

Tendo em conta a Tabela 10.3, onde estão indicadas as deformações totais para o primeiro patamar de carga, verifica-se em todos os ensaios que os pontos com maior deformação são os pontos centrais das vigas. No entanto, no terceiro ensaio, a deformação do ponto a meio vão da viga B está bastante próximo do ponto a três quartos da mesma viga, o que não seria de esperar numa situação normal. Esta semelhança poderá dever-se a uma perda de resistência ao longo da viga, o que provoca uma redistribuição dos esforços ao longo da vida, podendo ainda estar relacionada com erros de medição e instrumentação. A deformação dos pontos a um quarto e a três quartos de vão da viga B são muito semelhantes em todos os ensaios, conforme o esperado, dado tratar-se de uma viga simplesmente apoiada.

**Tabela 10.3 - Deformações totais para carregamento de  $2\text{kN/m}^2$  – sem soalho.**

Ensaio	Deformação total $\delta_{tot}$ para carregamento $2\text{kN/m}^2$ (mm)				
	DCVA	DEVB	DCVB	DDVB	DCVC
E1	4,75	3,61	4,71	3,72	3,55
E2	5,96	4,51	6,9	4,28	5,71
E3	4,6	1,62	2,9	2,82	2,05
E4	8,15	3,9	5,32	3,95	3,97

As deformações finais para o segundo patamar de carga, ou seja, os  $3\text{kN/m}^2$ , possuem as mesmas relações acima descritas. As deformações aumentam de forma linear e não se verifica

nenhum ponto onde possa ter existido algum tipo de problema após o carregamento, para além daqueles mencionados anteriormente.

**Tabela 10.4 - Deformações totais para carregamento de 3 kN/m<sup>2</sup> – sem soalho.**

Ensaio	Deformação total para carregamento 3 KN/m <sup>2</sup> (mm)				
	DCVA	DEVB	DCVB	DDVB	DCVC
E1	6,85	4,85	6,51	4,97	4,68
E2	7,62	6,34	7,48	5,92	7,16
E3	5,4	2,55	3,15	3,86	4,3
E4	12,6	5,72	7,8	5,55	5,77

- **Comparação de deformações totais,  $\delta_{tot}$ , entre ensaios para o caso de descarga**

- Com a contribuição do soalho:

Para o caso de descarregamento de 1kN/m<sup>2</sup>, verifica-se, pela Tabela 10.5, que os pontos com maior deformação são os pontos centrais das vigas. No ensaio 4, o valor da deformação nos pontos a um quarto de vão e a três quartos de vão da viga B são bastante diferentes, o que indica que poderá ter ocorrido algum problema de medição ou instrumentação. As diferenças no valor das deformações dos pontos centrais das vigas prende-se com o facto de esta estarem sujeitas a larguras de influência diferentes.

**Tabela 10.5 - Deformações totais para descarregamento de 1 kN/m<sup>2</sup> – com soalho.**

Ensaio	Deformação total para descarregamento de 1 KN/m <sup>2</sup> (mm)				
	DCVA	DEVB	DCVB	DDVB	DCVC
E1	Não foi possível fazer o registo				
E2	6,5	4,2	6,7	5,95	6,32
E3	4,5	2,25	3,3	2,62	3,4
E4	8,1	4,88	3,88	1,08	3,92

Tendo em conta a descarga total dos pavimentos (Tabela 10.6), demonstra-se que na maioria dos pontos possui uma deformação residual. O valor registado no final da descarga é maior do que o registado no início do carregamento. Alguns dos valores registados são pouco significativos, no entanto verifica-se que, em alguns pontos, o valor da deformação residual é bastante significativo, como é o caso da deformação final do ponto A, no ensaio 3.

**Tabela 10.6 - Deformações totais para descarregamento total – com soalho.**

Ensaio	Deformação residual para descarregamento total (mm)				
	DCVA	DEVB	DCVB	DDVB	DCVC
E1	Não foi possível fazer o registo				
E2	-1,26	-0,5	-1,71	-1,47	-1,65
E3	-1,73	-0,6	-0,1	-0,8	-0,2
E4	-0,1	-0,95	0	0	-0,12

- Sem a contribuição do soalho:

Tendo em conta o descarregamento do pavimento sem que haja contribuição do soalho, as deformações medidas (Tabela 10.7) são de certa forma as esperadas. Verificam-se as maiores deformações nos pontos centrais das vigas. Tal como referido anteriormente, a deformação no ponto a três quartos da viga B é bastante semelhante, neste caso até superior, ao ponto central da mesma viga no terceiro ensaio, o que segundo o modelo de viga simplesmente apoiada não é possível acontecer. Assim, presume-se que neste ensaio ocorreu um problema na sua execução ou que a viga possui uma alteração de resistência ao longo do seu comprimento.

**Tabela 10.7 - Deformações totais para descarregamento de 1 kN/m<sup>2</sup> – sem soalho.**

Ensaio	Deformação total para descarregamento 1 KN/m <sup>2</sup> (mm)				
	DCVA	DEVB	DCVB	DDVB	DCVC
E1	5,03	3,76	4,01	3,84	3,77
E2	5,82	5,98	5,42	4,7	5,14
E3	4,32	1,77	2,13	2,97	2,35
E4	9,05	4,21	5,7	4,2	3,15

No que respeita às deformações registadas aquando do descarregamento total do pavimento (Tabela 10.8), verifica-se a presença de uma deformação residual, à semelhança do que foi registado anteriormente. A deformação registada no final da descarga é menor que a registada no início do carregamento. Neste caso, sem a contribuição do efeito membrana que o soalho pode proporcionar ao pavimento, as deformações residuais registadas são menores do que no caso em que se considerava o soalho ainda machedado.

**Tabela 10.8 - Deformações totais para descarregamento total – sem soalho.**

Ensaio	Deformação residual para descarregamento total (mm)				
	DCVA	DEVB	DCVB	DDVB	DCVC
E1	0,93	-0,06	-0,8	-0,02	-1,15
E2	-0,38	-0,15	-0,2	-0,12	-0,1
E3	-1,2	-0,4	-0,58	-0,02	-0,1
E4	-0,12	-0,1	-0,05	0	-0,02

- **Comparação de deformações totais,  $\delta_{tot}$ , com e sem contribuição do soalho**

- Carga:

Através da Tabela 10.9 é possível analisar as principais diferenças dos valores das deformações com e sem a contribuição do soalho para o primeiro patamar de carga. Os valores das deformações são idênticos com e sem o soalho macheado. Verifica-se assim que, neste caso, o soalho não contribui para o aumento da resistência do pavimento e não possui o efeito membrana que seria de esperar.

**Tabela 10.9 – Deformações totais com e sem contribuição do soalho, carregamento 2kN/m<sup>2</sup>.**

Ensaio		Deformação total para carregamento 2 kN/m <sup>2</sup> (mm)				
		DCVA	DEVB	DCVB	DDVB	DCVC
E1	c/ soalho	4,03	3,53	4,77	3,79	3,36
	s/ soalho	4,75	3,61	4,71	3,72	3,55
E2	c/ soalho	5,76	4,65	5,03	4,42	5,53
	s/ soalho	5,96	4,51	6,9	4,28	5,71
E3	c/ soalho	4,6	2,85	3,73	2,2	2,83
	s/ soalho	4,6	1,62	2,9	2,82	2,05
E4	c/ soalho	8,5	4,53	3,46	1,84	3,24
	s/ soalho	8,15	3,9	5,32	3,95	3,97

No entanto para o segundo patamar de carga, ou seja, 3 kN/m<sup>2</sup>, verifica-se, através da Tabela 10.10, que, na maioria dos casos, o valor da deformação é menor para o caso em que há contribuição do soalho, o que sugere que o soalho poderá contribuir para um aumento da resistência do pavimento. No entanto, existem casos em que a deformação é maior quando o soalho ainda está macheado, o que poderá indicar que o corte do soalho não contribui para o

aumento de resistência do pavimento, mas contribui para a forma como as forças são distribuídas.

**Tabela 10.10 - Deformações totais com e sem contribuição do soalho, carregamento 3kN/m<sup>2</sup>.**

Ensaio		Deformação total para carregamento 3 kN/m <sup>2</sup> (mm)				
		DCVA	DEVB	DCVB	DDVB	DCVC
E1	c/ soalho	5,67	4,88	6,65	5,75	4,82
	s/ soalho	6,85	4,85	6,51	4,97	4,68
E2	c/ soalho	8,23	6,5	8,78	6,3	8,2
	s/ soalho	7,62	6,34	7,48	5,92	7,16
E3	c/ soalho	5,54	3,93	4,45	3,43	4,4
	s/ soalho	5,4	2,55	3,15	3,86	4,3
E4	c/ soalho	11,28	6,24	6,9	2,35	5,45
	s/ soalho	12,6	5,72	7,8	5,55	5,77

- Descarga:

Para o caso da descarga do pavimento, os valores tabelados (Tabela 10.11) não são conclusivos em relação ao efeito do soalho no aumento da resistência do pavimento e consequente diminuição da deformação dos vigamentos. Como se pode comprovar pelos valores indicados na tabela abaixo, existem situações em que há realmente um aumento das deformações após o corte do machedo do soalho, verificando-se também situações inversas.

**Tabela 10.11 - Deformações totais com e sem contribuição do soalho, descarregamento 1kN/m<sup>2</sup>.**

Ensaio		Deformação total para descarregamento 1 KN/m <sup>2</sup> (mm)				
		DCVA	DEVB	DCVB	DDVB	DCVC
E1	c/ soalho	Não foi possível fazer o registo				
	s/ soalho	5,03	3,76	4,01	3,84	3,77
E2	c/ soalho	6,5	4,2	6,7	5,95	6,32
	s/ soalho	5,82	5,98	5,42	4,7	5,14
E3	c/ soalho	4,5	2,25	3,3	2,62	3,4
	s/ soalho	4,32	1,77	2,13	2,97	2,35
E4	c/ soalho	8,1	4,88	3,88	1,08	3,92
	s/ soalho	9,05	4,21	5,7	4,2	3,15

Segundo a Tabela 10.12, as deformações residuais, quando ocorre o descarregamento total do pavimento, são maiores no caso do soalho machedo. Como já referido anteriormente, os

valores das deformações medidas após a descarga total são menores do que as medidas inicialmente.

**Tabela 10.12 - Deformações totais com e sem contribuição do soalho, descarregamento total.**

Ensaio		Deformação total para descarregamento total (mm)				
		DCVA	DEVB	DCVB	DDVB	DCVC
E1	c/ soalho	Não foi possível fazer o registo				
	s/ soalho	0,93	-0,06	-0,8	-0,02	-1,15
E2	c/ soalho	-1,26	-0,5	-1,71	-1,47	-1,65
	s/ soalho	-0,38	-0,15	-0,2	-0,12	-0,1
E3	c/ soalho	-1,73	-0,6	-0,1	-0,8	-0,2
	s/ soalho	-1,2	-0,4	-0,58	-0,02	-0,1
E4	c/ soalho	-0,1	-0,95	0	0	-0,12
	s/ soalho	-0,12	-0,1	-0,05	0	-0,02

- **Comparação de módulos de elasticidade reais**

Os valores de módulos de elasticidade reais a ter em conta são obtidos com base em todas as considerações feitas no anterior capítulo 8.2.2, em que foram excluídos determinados valores considerados anómalos.

- *Com a contribuição do soalho:*

Para os casos em que o soalho ainda estava machedo obteve-se os módulos de elasticidade representados na Tabela 10.13, estes situam-se entre os 9 e os 12 kN/mm<sup>2</sup>.

**Tabela 10.13 – Valor médio dos módulos de elasticidade – com soalho.**

Ensaio	Módulo de Elasticidade (kN/mm <sup>2</sup> )
E1	10,51
E2	10,50
E3	12,00
E4	9,67

- Sem a contribuição do soalho:

Conforme o indicado na Tabela 10.14, os valores do módulo de elasticidade situam-se entre os 9 e os 12 kN/mm<sup>2</sup>.

**Tabela 10.14 - Valor médio dos módulos de elasticidade – sem soalho.**

Ensaio	Módulo de Elasticidade (kN/mm <sup>2</sup> )
E1	10,22
E2	9,90
E3	11,86
E4	10,07

- Para o 1º patamar de carga (2kN/m<sup>2</sup>):

Analisando os módulos de elasticidade obtidos para o 1º patamar de carga (Tabela 10.17), verifica-se que o seu valor situa-se entre os 8 e os 12 kN/mm<sup>2</sup> tendo em conta o efeito do soalho e entre os 10 e os 11 kN/mm<sup>2</sup> não considerando o efeito do soalho.

**Tabela 10.15 – Valores médios dos módulos de elasticidade para o 1º patamar de carga.**

Ensaio	Módulo de Elasticidade (kN/mm <sup>2</sup> )	
	Com soalho	Sem soalho
E1	10,48	10,04
E2	11,45	10,63
E3	11,48	11,02
E4	8,21	10,41

- Para o 2º patamar de carga (3kN/m<sup>2</sup>):

Tendo em conta a Tabela 10.16 os módulos de elasticidade, para o 2º patamar de carga, variam entre os 10 e os 13 kN/mm<sup>2</sup> tendo em conta a contribuição do soalho e entre os 8 e os 11 kN/mm<sup>2</sup> não considerando o soalho macheado. Neste caso, não foi considerado o valor do módulo de elasticidade correspondente ao ensaio 3 para o caso do soalho sem macheado dado que todos os valores se encontravam fora do limite estabelecido.

**Tabela 10.16 - Valores médios dos módulos de elasticidade para o 2º patamar de carga.**

Ensaio	Módulo de Elasticidade (kN/mm <sup>2</sup> )	
	Com soalho	Sem soalho
E1	10,54	10,43
E2	10,91	8,34
E3	12,78	-
E4	10,65	10,31

- Descarga:

Para o caso da descarga, obteve-se um módulo de elasticidade que varia entre os 9 e os 12kN/mm<sup>2</sup> para o caso em que há contribuição do soalho e entre os 10 e os 11 para o caso contrário.

**Tabela 10.17 – Valores médios dos módulos de elasticidade para a descarga.**

Ensaio	Módulo de Elasticidade (kN/mm <sup>2</sup> )	
	Com soalho	Sem soalho
E1	-	10,91
E2	9,83	10,73
E3	11,61	11,08
E4	9,33	9,34

- Considerando somente as vigas centrais:

Tendo em conta os módulos de elasticidade nas vigas centrais, observa-se que para o caso em que se considera o soalho macheado, os seus valores variam entre os 9 e os 13kN/mm<sup>2</sup>. Para o caso em que o soalho não está macheado os valores do módulo de elasticidade variam entre os 9 e os 12kN/mm<sup>2</sup>.

**Tabela 10.18 – Valores médios dos módulos de elasticidade para vigas centrais.**

Ensaio	Módulo de Elasticidade (kN/mm <sup>2</sup> )	
	Com soalho	Sem soalho
E1	9,91	10,24
E2	10,96	9,85
E3	12,51	11,43
E4	10,09	10,94

- Excluindo as vigas com deformação final superior a 0,5mm:

Conforme indicado na Tabela 10.19, os valores do módulo de elasticidade variam entre os 9 e os 13kN/mm<sup>2</sup> tendo em conta a contribuição do soalho e caso contrario varia entre os 9 e os 12kN/mm<sup>2</sup>. São excluídos os valores superiores a 14kN/mm<sup>2</sup>.

**Tabela 10.19 - Valores médios dos módulos de elasticidade excluindo as vigas com deformação final superior a 0,5mm.**

Ensaio	Módulo de Elasticidade (kN/mm <sup>2</sup> )	
	Com soalho	Sem soalho
E1	9,91	10,12
E2	10,96	9,85
E3	12,47	11,43
E4	9,44	10,07

- **Comparação entre deformações teóricas e reais**

- *Ensaio 1:*

Para o primeiro patamar de carga do ensaio 1 verifica-se que as deformações obtidas experimentalmente são semelhantes as esperadas. No ponto central da viga C a deformação real é ligeiramente menor que a teórica, no entanto como comprovado anteriormente, o ponto em causa é considerado anómalo devido à sua baixa deformação e consequente elevado módulo de elasticidade.

**Tabela 10.20 – Comparação entre deformações reais e teóricas – Ensaio 1, 1º patamar de carga.**

Defletómetro	Deformações reais - valores para 2 kN/m <sup>2</sup> (mm)		Deformações teóricas (mm)	
	com soalho	sem soalho	Classif. prévia	Classificação visual
DCVA	4,03	4,75	4,5	4,9
DEVB	3,53	3,61	3,2	3,5
DCVB	4,77	4,71	4,5	4,9
DDVB	3,79	3,72	3,2	3,5
DCVC	3,36*	3,55*	4,5	4,9

\* Deformações consideradas anómalas.

A Tabela 10.21 indica os valores das deformações reais e teóricas para o 2º patamar de carga. As deformações reais na maioria dos casos são bastante semelhantes às deformações esperadas. Conforme o verificado para o 1º patamar de carga, também é no ponto central de VC que se observa um deslocamento real menos idêntico ao teórico. No entanto, já anteriormente se tinha desconsiderado o valor em causa.

**Tabela 10.21 - Comparação entre deformações reais e teóricas – Ensaio 1, 2º patamar de carga.**

Defletómetro	Deformações reais - valores para 3 kN/m <sup>2</sup> (mm)		Deformações teóricas (mm)	
	com soalho	sem soalho	Classif. prévia	Classificação visual
DCVA	5,57	5,96	6,4	6,9
DEVB	4,88	4,51	4,6	4,9
DCVB	6,65	6,9	6,4	6,9
DDVB	5,75	4,28	4,6	4,9
DCVC	4,82*	5,71*	6,4	6,9

- Ensaio 2:

Os valores das deformações para o primeiro e segundo patamar de carga estão representados nas Tabela 10.22 e Tabela 10.23, respetivamente. Nos dois casos, os valores obtidos experimentalmente são da mesma ordem de grandeza dos valores teóricos. Apesar de existirem valores de deformação reais que são superiores aos valores de deformações teóricas para a classe C24, não é necessário admitir uma classe de resistência menor porque a diferença não é significativa.

**Tabela 10.22 - Comparação entre deformações reais e teóricas – Ensaio 2, 1º patamar de carga.**

Defletómetro	Deformações reais - valores para 2 kN/m <sup>2</sup> (mm)		Deformações teóricas (mm)	
	com soalho	sem soalho	Classif. prévia	Classificação visual
DCVA	5,76	5,76	5,3	5,7
DEVB	4,65	4,65	3,8	4,1
DCVB	5,03	5,03	5,3	5,7
DDVB	4,42	4,42	3,8	4,1
DCVC	5,53	5,53	5,3	5,7

\*Deformações consideradas anómalas.

**Tabela 10.23 - Comparação entre deformações reais e teóricas – Ensaio 2, 2º patamar de carga**

Defletómetro	Deformações reais - valores para 3 kN/m <sup>2</sup> (mm)		Deformações teóricas (mm)	
	com soalho	sem soalho	Classif. prévia	Classificação visual
DCVA	8,23	7,63	7,7	8,2
DEVB	6,5	6,34	5,5	5,9
DCVB	8,78	7,48	7,7	8,2
DDVB	6,3	5,92	5,5	5,9
DCVC	8,2	7,16	7,7	8,2

- Ensaio 3:

Os valores das deformações obtidas experimentalmente e através de modelos teóricos para o ensaio 3 estão representadas nas Tabela 10.24 e Tabela 10.25. Neste caso as deformações teóricas são menores do que deformações reais o que sugere que as vigas deste pavimento deveriam pertencer a uma classe de resistência maior. Contudo, tendo em conta a classificação visual realizada no capítulo 9.1.2, os defeitos que estas possuem não o permitem. No entanto, e conforme o referido anteriormente, existem diversos pontos que possuem deformações muito baixas e módulos de elasticidade elevados. Mesmo não considerando os pontos em que se verificam anomalias, as deformações reais são menores que as deformações teóricas.

**Tabela 10.24 - Comparação entre deformações reais e teóricas – Ensaio 3, 1º patamar de carga.**

Defletómetro	Deformações reais - valores para 2 kN/m <sup>2</sup> (mm)		Deformações teóricas (mm)	
	com soalho	sem soalho	Classif. prévia	Classificação visual
DCVA	4,6	4,6	4,7	5
DEVB	2,85	1,62*	3,4	3,6
DCVB	3,73	2,9*	4,7	5
DDVB	2,2*	2,82	3,4	3,6
DCVC	2,83*	2,05*	4,7	5

---

\*Deformações consideradas anómalas.

**Tabela 10.25 - Comparação entre deformações reais e teóricas – Ensaio 3, 2º patamar de carga.**

Defletómetro	Deformações reais - valores para 3 kN/m <sup>2</sup> (mm)		Deformações teóricas (mm)	
	com soalho	sem soalho	Classif. prévia	Classificação visual
DCVA	5,54	5,4*	6,8	7,3
DEVB	3,93	2,55*	4,8	5,1
DCVB	4,45*	3,15*	6,8	7,3
DDVB	3,43	3,86*	4,8	5,1
DCVC	4,4*	4,3*	6,8	7,3

- Ensaio 4:

Os valores das deformações para o ensaio 4 estão indicados nas tabelas Tabela 10.26 e Tabela 10.27. Apesar de se verificarem algumas exceções, a maioria dos valores reais são da mesma ordem de grandeza dos teóricos. No entanto o ponto onde se verifica uma maior diferença, quer no 1º patamar de carga quer no 2º, é o ponto central da viga A. O valor obtido sugere que a viga em causa deveria ser considerada como sendo de uma classe de resistência inferior à considerada ou pode existir algum defeito localizado grave que não foi detetado e que coloca em causa a resistência da viga.

**Tabela 10.26 - Comparação entre deformações reais e teóricas – Ensaio 4, 1º patamar de carga.**

Defletómetro	Deformações reais - valores para 2 kN/m <sup>2</sup> (mm)		Deformações teóricas (mm)	
	com soalho	sem soalho	Classif. prévia	Classificação visual
DCVA	8,5	8,15	4,6	4,9
DEVB	4,53	3,9	3,3	3,5
DCVB	3,46*	5,32	4,6	4,9
DDVB	1,84*	3,95	3,3	3,5
DCVC	3,24*	3,97	4,6	4,9

\*Deformações consideradas anómalas.

**Tabela 10.27 - Comparação entre deformações reais e teóricas – Ensaio 4, 2º patamar de carga.**

Defletómetro	Deformações reais - valores para 3 kN/m <sup>2</sup> (mm)		Deformações teóricas (mm)	
	com soalho	sem soalho	Classif. prévia	Classificação visual
DCVA	11,28	12,6	6,6	7,1
DEVB	6,24	5,72	4,7	5,1
DCVB	6,9	7,8	6,6	7,1
DDVB	2,35*	5,55	4,7	5,1
DCVC	5,45	5,77	6,6	7,1

Tendo em conta a Tabela 10.27 a única deformação que parece menos correta é a do ponto DDVB com soalho macheado. Contudo, este problema terá sido devido a erro de leitura ou algum problema que ocorreu no pavimento durante a execução do ensaio, se se tratasse de um valor real após o corte do macheado do soalho as deformações continuariam a ser baixas e tal não ocorre.

De um modo geral, os ensaios permitem tirar diversas conclusões acerca do desempenho dos pavimentos em causa.

No Ensaio 1 verificam-se anomalias no ponto DCVC para o caso do soalho macheado, o valor da deformação é muito baixo o que resulta um módulo de elasticidade elevado. Tendo em conta que o erro se mantém para os dois patamares de carga, este poderá ter sido causado por problemas com o defletómetro. Apesar de no caso do soalho sem macheado o valor da deformação ter diminuído, não atingiu valores compatíveis com os das restantes medições. Ainda assim os restantes pontos possuem deformações razoáveis verificando-se, como seria de esperar, maiores deformações nos pontos a meio vão, e deformações compatíveis entre si, para as diversas vigas e diversos casos de carga. Analisando os módulos de elasticidade, depois de excluídos os valores anómalos, estes encontram-se praticamente no mesmo intervalo em valores em todos os casos. À exceção do ponto considerado anómalo todas as deformações reais são muito próximas das teóricas, se se considerar a madeira como enquadrada na classe de resistência C24.

No que refere aos resultados obtidos no Ensaio 2, estes podem ser considerados corretos e como é de esperar os maiores valores de deformação encontra-se nos pontos a meio vão das vigas. Ainda assim, no 1º patamar de carga verifica-se um valor baixo de deformação no ponto DCVB mas que é corrigido na 2ª fase do carregamento, o que leva a querer que existiu um erro de medição relacionado com a 1ª fase, caso contrário a deformação continuaria a ser menor

comparada com as restantes. À semelhança do Ensaio 1, e depois de excluídos os pontos considerados anómalos obtiveram-se módulos de elasticidade muito próximos nas várias considerações.

O Ensaio 3 é o ensaio onde são verificadas as maiores dispersões nos valores da deformação. Existindo essa possibilidade, teria feito sentido realizar de novo este ensaio para tentar perceber se as anomalias teriam sido devidas a erros na execução do ensaio de carga ou se devido a alguma particularidade desta parte da estrutura do pavimento. No entanto, analisando as deformações obtidas, denota-se que apesar de serem baixas as deformações mais elevadas, as anomalias encontram-se nos pontos a meio vão das vigas, o que reforça a tese de que poderá haver alguma particularidade estrutural, nomeadamente o soalho estar a deformar-se sem transmitir essa deformação à viga, iludindo assim o valor real da deformação. A maioria dos resultados da deformação foi eliminada no caso do soalho macheado e sem macheado. Ainda assim, com os restantes resultados que pareciam satisfatórios foram determinados os vários módulos de elasticidade, que se enquadra no que seria de esperar. Tendo em conta que a maioria dos valores para a deformação real são anómalos, torna-se difícil realizar uma análise comparativa com os valores de deformação teórica.

Tendo em conta dos valores das deformações registados para o Ensaio 4, verificam-se, mais uma vez, alguns valores muito baixos que conduzem a módulos de elasticidade elevados, que não vai ao encontro do que seria de esperar. No entanto este facto só se nota quando o soalho está macheado, pois após o corte do soalho e depois de medidas as novas deformações, verificam-se que estas são aceitáveis, bem como o módulo de elasticidade correspondente. Deste modo, os erros verificados podem estar associados a erros de medição ou até mesmo à instalação do defletómetro, bem como algum problema no soalho, a exemplo do aventado para o ensaio 3, a alguma dificuldade na transmissão de carga do soalho para a viga. É de salientar que, no ensaio 4, o ponto DCVA possui uma deformação bastante elevada, sendo que este facto sugere que a viga em causa pode possuir um defeito que não foi corretamente analisado. O valor do módulo de elasticidade, calculado após a exclusão dos valores discrepantes, localizar-se-ia no intervalo de valores esperado.

No que respeita à contribuição do soalho no aumento da resistência do pavimento, não foi possível encontrar uma correlação constante ao longo dos diversos ensaios. Ainda assim, comparando as deformações no caso do soalho macheado e sem macheado, denota-se que estas se encontram muito próximas, se se excluir os valores discrepantes – deformações anormalmente baixas ou elevadas - o que sugere que para este caso de estudo o soalho não tem qualquer contribuição para o aumento da rigidez do pavimento.

De um modo geral, as deformações reais e teóricas são bastante semelhantes quando excluídos os valores considerados anómalos. Tal facto sugere que as considerações feitas relativamente à escolha da classe de resistência vão de encontro ao real comportamento do pavimento. No entanto, a classe de resistência considerada inicialmente é adequada para a verificação ao Estado Limite de Deformação mas para o Estado Limite Último não, uma vez que as peças apresentam defeitos. A classificação visual pode ser considerada adequada para o cálculo das deformações mas é importante que as peças de madeira sejam bem observadas para procurar os defeitos mais importantes, pois estes conduziram, pelo menos neste caso, a uma redução da classe.

## 11. Conclusão

Para uma correta análise de estruturas de madeira são necessários conhecimentos básicos acerca do material. Portanto, numa primeira fase desta dissertação foi necessário analisar todas as características da madeira como material, bem como as suas limitações e aspetos a ter em conta aquando da sua utilização.

Posteriormente à análise de todas as características e aspetos necessários para um melhor conhecimento da madeira como material estrutural, começou-se a desenvolver o objetivo principal do presente trabalho, a avaliação do desempenho real e teórico de vigamentos de madeira. A avaliação do desempenho real foi realizada através de ensaios de carga, onde foram medidas as deformações resultantes em quatro pavimentos distintos. Posteriormente foram calculados os módulos de elasticidade correspondentes a cada deformação, para que fosse possível estimar um módulo de elasticidade médio. O desempenho teórico foi analisado tendo em conta modelos estruturais, cujas características e dimensões correspondiam às do pavimento em causa, para simular da melhor forma o comportamento real da estrutura. As características da madeira em causa foram analisadas através da inspeção visual, que foi classificada segundo os limites de defeitos presentes na norma do Pinheiro bravo.

Durante a execução deste trabalho foi ainda possível analisar a contribuição do soalho na resistência do pavimento. Analisando as deformações resultantes para o pavimento ensaiado com a contribuição do soalho (com o macheado) e sem essa contribuição (após corte do macheado), não parecem existir correlações de aumento sistemático da deformação após corte. Existem casos em que as deformações medidas são menores no caso do soalho macheado e outros em que são menores no soalho não macheado. Assim conclui-se que, pelo menos, para este pavimento, o soalho não apresentou qualquer contribuição para o aumento da sua rigidez.

Tendo em conta os módulos de elasticidade obtidos no desempenho real do pavimento e as diversas análises realizadas no capítulo 10, pode-se afirmar que este situa-se entre os 10 e os 12GPa. Apesar de não se conseguir obter um valor exato, é possível estabelecer um intervalo de valores. Segundo a classificação visual realizada para a obtenção da classe de resistência da madeira, chegou-se à conclusão que a madeira possui módulo de elasticidade médio de  $11\text{kN/mm}^2$ . O valor do módulo de elasticidade obtido na classificação visual localiza-se no intervalo de valores do desempenho real.

Deste modo, pode concluir-se que, através de uma cuidadosa observação das características dos pavimentos de madeira, tendo em conta o conjunto de parâmetros previstos na normativa aquando da sua avaliação, é possível estabelecer uma correta avaliação das classes de madeira existente num determinado edifício, e com isso verificar a segurança desses pavimentos, tendo em vista a sua futura reutilização. Uma classificação visual rigorosa, em pavimentos de madeira, poderá ser de grande utilidade para a realização de intervenções de reabilitação cuidadas, permitindo tirar maior partido das potencialidades dos pavimentos e possivelmente manter alguns que estariam à partida destinados à substituição.

É de salientar que durante a execução do trabalho foram cometidos alguns erros, impossíveis de corrigir devido ao intervalo de tempo disponível para realizar os ensaios de carga – que decorreram em simultaneamente com a obra de demolição parcial do edifício, entretanto concluída. Como foi referido anteriormente em todos os ensaios, e principalmente no ensaio 3, observam-se valores muito baixos de deformação e consequentemente valores muito elevados de módulo de elasticidade, o que não foi de encontro ao que seria de esperar, pelo que deveria ter sido repetido se tal fosse possível, mas essa repetição, a ocorrer, teria de ter sido feita após análise dos resultados, nomeadamente depois de calculados os módulos de elasticidade. No entanto, nessa fase, já não foi possível repetir os ensaios. Os erros no valor da deformação resultante podem ser devidos a vários fatores, nomeadamente erros de medições, erros de execução do ensaio ou até mesmo devido a particularidades que a estrutura apresenta e que não foram observadas pormenorizadamente – por exemplo, juntas no sarrafo entre o soalho e o vigamento que atenuem a deformação das vigas.

Através de uma análise aos erros obtidos é possível estabelecer uma relação entre eles. Quando um erro (aparente) se mantém ao longo de todo o ensaio (com e sem soalho macheado) pode-se considerar que, ou é um erro de facto, relacionado com a leitura ou com um instrumento de medição específico, ou é uma anomalia que está relacionada com fatores intrínsecos da própria estrutura (tal como, a anormal transmissão da deformação do soalho ao pavimento ou um defeito que não tenha sido particularmente analisado). Assim, por exemplo, quando o valor da deformação só é anómalo em determinado patamar de carregamento pode-se considerar com alguma certeza que se trata de uma falha relacionada com a instrumentação ou a leitura.

No que refere à classificação da madeira, e já numa fase final da elaboração da dissertação, verificou-se que poderá ter ocorrido um equívoco, pelo menos parcial, na identificação da

espécie de madeira. A madeira foi considerada como sendo da espécie de Pinheiro bravo (*Pinus pinaster*) mas em algumas situações, e após a lavagem e análise da densidade e espessura dos anéis de crescimento nos topos de algumas peças, que não poderiam ter sido observadas antes dos ensaios, constatou-se que se pode estar na presença de madeira de casquinha (*Pinus sylvestris* L.), o que não seria incharacterístico dada a época de construção do edifício, uma vez que ocorriam situações em que se utilizavam na mesma obra vigamentos de uma ou outra espécie das referidas anteriormente. Contudo, a classe de resistência considerada para posterior análise teórica foi obtida tendo em conta as regras de limite de defeitos para o pinho bravo e portanto interessa ressaltar que, a serem alguns dos vigamentos de casquinha, esta análise pode não estar absolutamente correta.

Esta dissertação serve de base para um trabalho que poderá ser bastante mais abrangente, mantendo-se ainda assim os seus objetivos. Futuramente e para continuar a desenvolver este trabalho seria importante realizar os mesmos ensaios de carga em laboratório, onde existe um maior controlo e onde os erros são minimizados. Para tal, as vigas foram separadas e encontram-se armazenadas pelo empreiteiro. Seria também importante perceber quais as diferenças de deformações obtidas *in situ* e em laboratório, bem como alargar o conjunto de edifícios a ensaiar, não só para analisar o desempenho real e teórico de mais do que um caso, mas também para tentar perceber se existirá, noutros casos, com outras tipologias de soalho – diferentes ligações, maiores espessuras - realmente alguma contribuição do soalho no aumento da resistência de pavimentos e se é possível estabelecer alguma relação desse tipo (correlação que, no presente trabalho, e para o universo ensaiado, não ocorre). Ainda em laboratório, para além da classificação visual da madeira ser bastante mais fácil, poderiam ser determinados outros parâmetros importantes, tais como a massa volúmica e densidade do material.

Assim, considera-se que, os próximos passos a ter em conta para o seguimento deste trabalho seriam a realização de ensaios de carga em laboratório das vigas aqui ensaiadas *in situ*, bem como de novos conjuntos de ensaios, *in situ* e em laboratório, bem como a posterior classificação da madeira (também em laboratório) para outros pavimentos de edifícios, alargando assim a amostragem.



## 12. Bibliografia

---

- [1] Dias, A., Cruz, H., Machado, J. S., Custódio, J. E. P., Palma, P. M. C., (2009). “*Avaliação, Conservação e Reforço de Estruturas de Madeira*”. Lisboa: Verlag Dashofer;
- [2] Martins, T. F., (2010). “*Dimensionamento de Estruturas em Madeira: Coberturas e Pavimentos*”. Tese de Mestrado, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal;
- [3] Cachim, P. B., (2007). “*Construções em madeira – A madeira como Material de Construção*”. Porto: Pubindústria;
- [4] Gardiner, D., (s.d.). “*Australian Recreational Aviation*”. Obtido em 5 de Julho de 2012, de: [http://flysafe.raa.asn.au/scratchbuilder/wood\\_strength\\_values.html](http://flysafe.raa.asn.au/scratchbuilder/wood_strength_values.html);
- [5] Cruz, H., Nunes, L., (2005). “Madeira. In *Materiais de Construção. Guia de Utilização.*” *Loja de Imagem. Arquitectura e Vida/ Engenharia e Vida*, Lisboa. pp 76-94;
- [6] LNEC E31 (1955). *Terminologia de madeiras*. Especificações LNEC. Lisboa;
- [7] LNEC M9 (1997). *Humidade da madeira*. Madeira para construção. Lisboa;
- [8] EC 408:2003 – *Timber structures. Structural timber and glued laminated timber. Determination of some physical and mechanical properties*. CEN – Comité Europeen de Normalization, Bruxelas, Bélgica;
- [9] NP 618:1973 – *Ensaio de compressão axial*. IGPAI, Lisboa, Portugal;
- [10] EN 384:1995 – *Structural timber. Determination of characteristic values of mechanical properties and density*. CEN – Comité Europeen de Normalization, Bruxelas, Bélgica;

- 
- [11] NP 623:1973 – *Ensaio de corte*. IGPAI, Lisboa, Portugal;
- [12] *Encyclopedia Encydia*. Obtido em 27 de Agosto de 2012:  
[http://pt.encydia.com/es/Flex%C3%A3o\\_mec%C3%A2nica](http://pt.encydia.com/es/Flex%C3%A3o_mec%C3%A2nica);
- [13] NP 619:1973 – *Ensaio de flexão estática*, IGPAI, Lisboa, Portugal;
- [14] Pfeil, W., Pfeil, M., (2008). “*Estruturas de Madeira*”, Rio de Janeiro: LTC;
- [15] NP 180:1962 – *Anomalias e Defeitos da Madeira*. IPQ. Monte da Caparica;
- [16] LNEC M2 (1997). *Pinho Bravo para estruturas*. Madeiras para construção. Lisboa;
- [17] EN 14081-1:2005 - *Timber structures – Strength graded structural timber with rectangular cross section – Part 1: General requirements*. CEN – Comité Europeen de Normalization, Bruxelas, Bélgica;
- [18] LNEC M1 (1997). *Especificação de Madeiras para Estruturas*. Madeiras para construção Lisboa;
- [19] NP 4305: 1995 – *Madeira serrada de pinheiro bravo para estruturas: classificação visual*. IPQ. Monte da Caparica;
- [20] EN 338: 2009 – *Structural timber. Strength classes*. CEN – Comité Europeen de Normalization, Bruxelas, Bélgica;
- [21] NP EN 1995-1-1:1998 – *Projecto de estruturas de madeira. Regras gerais e regras para edifícios*. Instituto Português da Qualidade. Monte da Caparica.
- [22] Cruz, H., (2001). “*Patologia, Avaliação e Conservação de Estruturas de Madeira*.” Comunicação apresentada no II Curso Livre Internacional de Património, Santarém.

---

[23] Henriques, M. D., (2011). “*Tratamento e Consolidação de Madeira de Pinho Degradada em Elementos Estruturais de Edifícios Antigo*”. Tese de Doutoramento, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal;

[24] Basement Systems. Obtido em 26 de Setembro de 2012 de:  
<http://www.basementsystems.com/mold/dry-rot.html>;

[25] ISS Portugal. Obtido em 26 de Setembro de 2012 de:  
[http://www.pt.issworld.com/servicos\\_disponiveis/manutencao\\_e\\_gestao\\_de\\_edificios/pc/servicos/tm/pages/default.aspx](http://www.pt.issworld.com/servicos_disponiveis/manutencao_e_gestao_de_edificios/pc/servicos/tm/pages/default.aspx);

[26] sacra M.I.X. – Manejo de Insecto Xilófagos. Obtido em 26 de Setembro de 2012 de:  
<http://www.sacramix.net/>;

[27] EN 335-1:2006 – *Durability of wood and wood-based products. Definition of use classes. Part 1: General*. CEN – Comité Europeen de Normalization, Bruxelas, Bélgica;

[28] Peraza, F.; Arriaga, F.; Peraza, J. E., (s.d.). “*Tableros de Madera de Uso Estructural*”. Madrid: AITIM;

[29] TRIA – Protecção passiva contra incêndios, “*Protecção da Madeira contra o fogo*”. Obtido a 16 de Janeiro de:  
<http://tria.pt/ppci/index.php?sc=biblioteca&page=N03-AT02>;

[30] EN 2080:1985 – *Preservação de madeiras. Tratamentos de madeira para construção*. CEN – Comité Europeen de Normalization, Bruxelas, Bélgica;

[31] Nunes, L., Sousa, P. P., (1995). “Durability – Preservative treatment” in *Timber Engineering STEP 1*, Centrum Hout, pp. A15/1-A15/8;

---

[32] TORAFORTE – Excelencia em Madeira. Obtido em 20 de Outubro de 2012 de:

<http://toraforte.com.br/servicos.asp>;

[33] Forestis – Associação Florestal de Portugal. *Nemátodo da madeira do pinheiro*: Ficha técnica. Obtido em 20 de Outubro de 2012 de:

[www.forestis.pt/forestis/multimedia/File/ficha\\_NMP\\_1.pdf](http://www.forestis.pt/forestis/multimedia/File/ficha_NMP_1.pdf)

[34] Cruz, H., (2011). “Inspeção, avaliação e conservação de estruturas de madeira.” *1ª Jornadas de Materiais de Construção*, Lisboa;

[35] Appleton, J., (2001). “*Madeira em fundações. Pavimentos e escadas: Soluções, patologias, consolidação e reforço*”. Associação de empresas de construção e obras públicas e serviços. Lisboa;

[36] Appleton, J., (2011). “*Reabilitação de edifícios antigos. Patologias e tecnologias de intervenção*”. Lisboa: Orion;

[37] A2P. (2013). “*Diagnóstico estrutural e construtivo de um conjunto de edifícios na avenida Duque de Loulé*”. Relatório Prévio. Lisboa.

[38] Arquivo Municipal de Lisboa - Obra 25471 - Proc 3284-1ªREP-PG-1908

[39] EN 1991-1-1:2009 – *Ações em Estruturas*, LNEC, Lisboa, Portugal;

[40] Ilharco, T.; Guedes, J.; Costa, A.; Arêde, A.; Paupério, E., (2012). “Avaliação da Distribuição de Carga em Pavimentos de Madeira Através de Ensaio In Situ” *in Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões* Vol.21. pp. 1-11 ISSN 1646-7078;

[41] Cruz, H., Yeomans, D., Tsakanika, E., Macchioni, N., Jorissen, A., Touza, M., Mannucci, M., Lourenço, P.B. (2013). Guidelines for the On-Site Assessment of Historic Timber

---

Structures, *International Journal of Architectural Heritage: Conservation, Analysis, and Restoration*, DOI:10.1080/15583058.2013.774070;



## ANEXOS

### A. Classes de Qualidade e Resistência

Quadro A.1 - Classes de Qualidade estabelecidas para a madeira de Pinheiro bravo [16].

Características e defeitos da madeira		Classes de Qualidade		
		Classe EE		Classe E
Nós	KAR marginal	$\leq 1/5$	$\leq 1/2$	$>1/2$
	KAR total	$\leq 1/5$	$\leq 1/2$	$\leq 1/3$
Fio		$\leq 1/10$	$\leq 1/6$	
Taxa de crescimento		$\leq 6$ mm	$\leq 10$ mm	
Fendas	Não repassadas	Fendas superficiais com $L_f \leq 300$ mm podem ser ignorados		
		$L_f \leq 1/4 l$ e $L_f \leq 600$ mm	$L_f \leq 1/4 l$ e $L_f \leq 900$ mm	
	Repasadas	Não mais do que uma fenda com o comprimento máximo, por cada metro		
		Permitidas só nos topos: $L_f \leq 600$ mm e $L_f \leq 1,0 \times h$	Permitidas só nos topos: $L_f \leq 1,5 \times h$	
Descaio		$\leq 1/4 b$ ; $\leq 1/4 h$ no comprimento total	$\leq 1/3 b$ ; $\leq 1/3 h$ no comprimento total	
		$\leq 1/3 b$ ; $\leq 1/3 h$ ao longo de 300 mm (se o topo tiver 3 ou 4 arestas vivas)	$\leq 1/2 b$ ; $\leq 1/2 h$ ao longo de 300 mm (se o topo tiver 3 ou 4 arestas vivas)	
Empenos	Em arco de face (em 2 m)	Se $b = 35$ mm $\rightarrow X \leq 30$ mm. Se $b \geq 75$ mm $\rightarrow X \leq 10$ mm (interpol para valores de espessura intermédios)		
	Em arco de canto (em 2 m)	Se $h = 60$ mm $\rightarrow X \leq 10$ mm. Se $h \geq 250$ mm $\rightarrow X \leq 5$ mm (interpol para valores de largura intermédios)		
	Em hélice (em 2 m)	$Z \leq 1,5$ mm por cada 25 mm largura da peça		
	Em meia cana	$X_t \leq 1$ mm por cada 25 mm largura da peça		
Bolsas de resina e casca inclusa	Não repassadas	Sem limites caso sejam mais curtas que a largura da peça. Se tal não se verificar aplicam-se os limites das fendas		
	Repasadas	Sem limites caso o seu comprimento seja $\leq 1/2$ la largura da peça. Se tal não se verificar aplicam-se os limites das fendas		
Medula		Não admitida	Admitida	

$l$  – comprimento;  $h$  – largura;  $b$  – espessura da peça. A restante simbologia encontra-se definida nas figuras do capítulo 2.6.1.

**Quadro A.2 – Valores característicos das propriedades mecânicas da madeira de Pinheiro bravo [16].**

Propriedades Mecânicas		Classe de Qualidade	
		EE	E
(Valores característicos)			
Flexão estática (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{m,k}$	35	18
Tracção paralela às fibras (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{t,0,k}$	21	10,8
Tracção perpendicular às fibras (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{t,90,k}$	0,49	0,46
Compressão paralela às fibras (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{c,0,k}$	24,7	18
Compressão perpendicular às fibras (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{c,90,k}$	7,3	6,9
Corte (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{v,k}$	3,4	2,0
Módulo de elasticidade (kN/mm <sup>2</sup> )			
Paralelo às fibras			
(Valor médio)	$E_{mean}$	14	12
(Valor característico)	$E_{0,05}$	9,38	8,0
Perpendicular às fibras (Valor médio)			
	$E_{mean}$	0,46	0,40
Módulo de distorção (kN/mm <sup>2</sup> )	$G_{mean}$	0,87	0,75
Massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> )			
(Valor médio)	$\rho_{mean}$	610	580
(Valor característico)	$\rho_k$	490	460

**Quadro A.3 - Exemplos de Classes de Resistência [16].**

Propriedades	Classes de Resistência					
	(Resinosas)				(Folhosas)	
(Valores característicos)	C16	C18	C24	C30	D40	C30
	N/mm <sup>2</sup>				N/mm <sup>2</sup>	
Flexão estática	16	18	24	30	40	60
Tracção paralela às fibras	10	11	14	18	24	36
Tracção perpendicular às fibras	0,3	0,3	0,4	0,4	0,6	0,7
Compressão paralela às fibras	17	18	21	23	26	32
Compressão perpendicular às fibras	4,6	4,8	5,3	5,7	8,8	10,5
Corte	1,8	2,0	2,5	3,0	3,8	5,3
Módulo de elasticidade	kN/mm <sup>2</sup>				kN/mm <sup>2</sup>	
Paralelo às fibras						
(Valor médio)	8	9	11	12	11	17
(Valor característico)	5,4	6,0	7,4	8,0	9,4	14,3
Perpendicular às fibras (Valor médio)	0,27	0,30	0,37	0,40	0,75	1,13
Módulo de distorção (Valor característico)	0,50	0,56	0,69	0,75	0,70	1,06
Massa volúmica	kg/m <sup>3</sup>				kg/m <sup>3</sup>	
(Valor médio)	370	380	420	460	700	840
(Valor característico)	310	320	350	380	590	700

**Quadro A.4 - Classe de Qualidade/ Classe de Resistência para algumas madeiras correntemente utilizadas em estruturas [16].**

<b>Madeira</b>	<b>Classe de Qualidade (norma)</b>	<b>Classe de Resistência</b>
Pinho bravo ( <i>Pinus pinaster</i> Ait.)	E (NP 4305)	C18*
Casquinha ( <i>Pinus silvestris</i> L.)	SS (BS 4978)	C24
	GS (BS 4978)	C16
Espruce ( <i>Picea abies</i> Karst.)	S13 (DIN 4074)	C30
	S10 (DIN 4074)	C24
	S7 (DIN 4074)	C16
Câbala ( <i>Milicia excelsa</i> A. Chev. Ou <i>M. regia</i> A. Chev.)	HS (BS 5756)	D40

\* Para a classe E do Pinho bravo, recomenda-se a adoção dos valores indicados na Ficha LNEC M2: “Pinho bravo para estruturas”