

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DAS PRINCIPAIS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE PEÇAS ESTRUTURAIS EM MADEIRA ANTIGA

SAMUEL SOARES CAMARINHA PEREIRA

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

Orientador: Professor Doutor José Manuel Marques Amorim de Araújo Faria

JULHO DE 2009

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2008/2009

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2008/2009 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2008*.

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

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar o meu profundo agradecimento ao orientador, o Prof. José Amorim Faria, por me ter concedido a possibilidade de realizar esta dissertação e por tudo aquilo que me proporcionou ao longo deste semestre de trabalho em conjunto. Agradeço fundamentalmente o conhecimento que me transmitiu, sobre um material de construção especial e tantas vezes difícil de entender, e a capacidade que teve de me elucidar nos momentos de incerteza e alguma ignorância. Obrigado pelos conselhos e opiniões valiosas.

Deixo aqui uma palavra de apreço ao Engenheiro Rui Sousa, principalmente pela amabilidade demonstrada, pela enorme paciência e pelo auxílio importante na realização dos ensaios mecânicos no Laboratório de Sistemas e Componentes da FEUP.

Ao Prof. António Arêde pelo contributo na realização dos ensaios à flexão no Laboratório de Engenharia Estrutural e Sísmica da FEUP e aos seus funcionários, Sr. Valdemar e André, pela simpatia e disponibilidade demonstradas.

Ao Engenheiro Tiago Dias agradeço o interesse em ajudar e a cordialidade com que sempre me tratou.

Aos meus amigos, particularmente ao Leonel Carvalho, pela amizade de tantos anos e por todos os momentos saudáveis de companheirismo. A todos os outros que sempre me apoiaram, agradeço profundamente.

Estou eternamente agradecido aos meus pais, Maria de Fátima Pereira e Joaquim Pereira, por me terem dado todas as condições para que a conclusão deste trabalho se tornasse mais simples. À minha mãe, deixo aqui um abraço sincero por ter acreditado sempre em mim e me ter ajudado a sonhar. Obrigada por confiares em mim.

RESUMO

A madeira só deve ser aplicada como componente de um sistema estrutural se forem conhecidas as suas características e propriedades e os factores que influenciam o seu comportamento físico e mecânico. Só assim, se poderá envolver a madeira num projecto estrutural com a segurança desejável e depositando total confiança no seu comportamento futuro. O controlo de qualidade pretende proporcionar garantias aos projectistas e construtores ao limitar o efeito negativo provocado pela variabilidade das propriedades mecânicas. A classificação de madeira é o conceito seguido actualmente na certificação de qualidade de madeira para estruturas, procurando dotá-la de um cariz mais rigoroso, envolvendo classes de resistência caracterizadas pela presença de largas margens de segurança em relação aos valores das principais propriedades mecânicas.

Esta dissertação surgiu como um meio de validação de uma metodologia de classificação de madeira antiga e apresenta-se como a prolongamento da campanha realizada no ano lectivo de 2007/2008 para a dissertação de Sónia Franco, concluída na FEUP. Recorreu-se à experimentação para comprovar e fundamentar a proposta de classificação visual de madeira, aplicável a elementos estruturais existentes, principalmente em processos de reabilitação, baseada num mecanismo de limitação de defeitos e que foi realizada na dissertação referida.

O método proposto na citada dissertação foi ligeiramente revisto pelo orientador que pretende realizar sucessivas campanhas experimentais que permitem melhorar continuamente o método. Por essa razão, o método de classificação proposto assume neste documento a designação de “método Amorim Faria”.

Assim, aplicaram-se os critérios definidos no método a casos concretos, utilizando provetes de madeira de carvalho e castanho, provenientes de vigas de um edifício em reabilitação e de outras afectadas por um incêndio verificado noutra edifício (removendo a parte ardida).

A componente experimental constituiu-se como uma peça basilar no desenvolvimento deste trabalho. Parte dos provetes, cerca de setenta e nove, foram submetidos a uma intensa inspecção visual, aplicando as formas de medição de defeitos e os respectivos limites apresentados na proposta, com a finalidade de atribuir uma das duas classes sugeridas: *Aprovada* ou *Rejeitada*.

Realizaram-se vários ensaios mecânicos, testando os provetes de madeira antiga à compressão axial e à flexão, englobando todos os provetes, ou seja, incluindo também aqueles que foram rejeitados, com o objectivo de se encontrar valores de certas propriedades mecânicas (resistência à compressão axial, resistência à flexão, módulo de elasticidade em flexão) para se comparar com os considerados na proposta citada e ainda para se obter mais informações a respeito de outras propriedades, como é o caso do módulo de elasticidade em compressão paralela às fibras.

Com este trabalho, nomeadamente com os ensaios mecânicos realizados, conseguiu-se perceber a madeira como elemento estrutural, interpretando o seu comportamento face às solicitações em causa. Por outro lado, os resultados encontrados foram importantes no processo de validação da proposta de classificação visual constituída pelo “método Amorim Faria” e para entender de que forma se poderá melhorar o sistema de classificação de madeira antiga.

PALAVRAS-CHAVE: Estruturas de madeira; Reabilitação, Classificação de madeiras, Ensaio mecânicos, Propriedades mecânicas.

ABSTRACT

Wood must only be used as a component of a structural system if its characteristics and properties as well as the factors that influence its physical and mechanical behavior are known. Only under these circumstances, we will be able to involve the wood in a structural project with the desirable security and having a full trust in its future behavior. The quality control aims to offer guarantees to the drafters and builders by creating a limit to the negative impact caused by the variability of the mechanical properties. The classification of the wood is the most up to date concept used in the quality certification of wood for structures, trying to provide it with a stricter countenance involving classes of resistance characterized by the presence of large security margins concerning the values of the main mechanical properties.

This dissertation appeared as a way of validation of a methodology of classification of ancient wood and presents itself as the extension of the campaign which took place during the 200//2008 school year regarding the dissertation of Sónia Franco, concluded at the FEUP. It has been appealed to the experiment in order to confirm and establish a fundament concerning the proposal of visual classification of the wood, applicable to the existing structural elements, mainly in recovery actions, based on a mechanism of failure limitation and which took place in the above mentioned dissertation.

The method suggested in the mentioned dissertation, has been slightly reviewed by the dissertation supervisor, who aims to perform several experimental campaigns allowing to improve continuously the method. For this reason, the proposed method of classification assumes in this document the designation of “Amorim Faria method”.

Therefore, the criteria defined in the method, have been applied to specific cases, using oak and chestnut-tree wood, proceeding of beams from a building under reconstruction as well as other wood affected by a fire occurred in another building (having removed the burnt section).

The experimental component has turned itself as main element in the development of this work. Part of the wood unites, approximately seventy nines, have been submitted to an intense visual inspection, using the ways of failures evaluation as well as the respective limits presented in the proposal, with the aim to attribute one of the two suggested classification: Approved of Rejected.

Several mechanical trials have taken place, in order to test the old wood units towards the axial compression and the flexion. These actions have included all the wood units, which means as well those that had been rejected, with the purpose to find values of certain mechanical properties (resistance to axial compression, resistance to flexion, module of elasticity in flexion), so that they can be compared with those considered in the mentioned proposal and also in order to get additional informations about other properties, such as the module of elasticity in parallel compression to the fibres.

With this work, namely with the mechanical trials that took place, it has been possible to understand the wood as a structural element, interpreting its behavior towards the requirements in question. On the other side, the achieved results have been important in the process of validation of the proposal of visual classification part of the “Amorim Faria method”, as well as in order to understand the best way to improve the system of classification of ancient wood.

KEY-WORDS: Wood structures. Recovery. Wood classification. Mechanical trials. Mechanical properties.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES E OBJECTIVOS DA DISSERTAÇÃO	1
1.2. SUPORTE DO TRABALHO REALIZADO	3
1.3. ESTRUTURAÇÃO E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	4
2. MADEIRA ESTRUTURAL – PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS	7
2.1. ÂMBITO.....	7
2.2. ESPECIFICIDADES DA MADEIRA	7
2.2.1. ÁRVORE E MADEIRA	7
2.2.2. IMPORTÂNCIA DAS ESPÉCIES	9
2.2.3. EXISTÊNCIA DE DEFEITOS	10
2.2.4. DURABILIDADE NATURAL.....	11
2.2.5. EVOLUÇÃO DAS PROPRIEDADES AO LONGO DO TEMPO	11
2.2.6. MADEIRA MACIÇA E DERIVADOS	11
2.3. PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS.....	12
2.3.1. FACTORES CONDICIONANTES DAS PROPRIEDADES	12
2.3.2. PROPRIEDADES FÍSICAS	14
2.3.3. PROPRIEDADES MECÂNICAS	18
2.3.3.1. Propriedades na direcção do fio.....	19
2.3.3.2. Propriedades na direcção perpendicular ao fio	20
2.3.4. DUREZA	22
2.4. DEFEITOS DAS MADEIRAS.....	22
2.4.1. ASPECTOS GERAIS.....	22
2.4.2. DEFEITOS DE CRESCIMENTO.....	23
2.4.2.1. Nós	23
2.4.2.2. Desvios da inclinação do fio.....	23

2.4.2.3. Lenho de reacção	24
2.4.2.4. Outros defeitos de crescimento	24
2.4.3. DEFEITOS DE SECAGEM	25
2.4.3.1. Fendas	25
2.4.4. DEFEITOS DE EXPLORAÇÃO E ALTERAÇÃO	26
2.5. DEGRADAÇÃO DAS PEÇAS ESTRUTURAIS DE MADEIRA	26
2.5.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	26
2.5.2. AGENTES BIÓTICOS E PATOLOGIAS ASSOCIADAS	26
2.5.3. AGENTES ABIÓTICOS E PATOLOGIAS ASSOCIADAS	29

3. PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA ESTRUTURAL

31

3.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

31

3.2. PROPRIEDADES DA MADEIRA NOVA

31

3.2.1. CLASSES DE QUALIDADE

31

3.2.1.1. Classificação visual

32

3.2.1.2. Classificação por máquina

33

3.2.2. CLASSES DE RESISTÊNCIA

35

3.2.3. RELAÇÃO ENTRE CLASSES DE QUALIDADE E CLASSES DE RESISTÊNCIA

37

3.3. AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MADEIRA ESTRUTURAL ANTIGA

37

3.3.1. MÉTODO SIMPLIFICADO BASEADO NA EN 408

38

3.3.2. UTILIZAÇÃO DE EQUIPAMENTOS DE AVALIAÇÃO POR ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

40

3.3.2.1. Ultra-sons

41

3.3.2.2. Resistograph

42

3.3.2.3. Georradar

43

3.3.2.4. Pylodin

43

3.3.2.5. Outras técnicas não destrutivas

44

3.3.3. DEFINIÇÃO DAS PROPRIEDADES POR LIMITAÇÃO DE DEFEITOS – MÉTODO AMORIM FARIA

45

4. CAMPANHA EXPERIMENTAL

49

4.1. OBJECTIVO/OBJECTO

49

4.2. CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

50

4.2.1. AMOSTRAS PARA OS ENSAIOS À COMPRESSÃO PARALELA AO FIO

50

4.2.2. AMOSTRAS PARA OS ENSAIOS À FLEXÃO	52
4.2.3. GENERALIDADES RELACIONADAS COM AS AMOSTRAS	54
4.3. CLASSIFICAÇÃO VISUAL DAS AMOSTRAS À FLEXÃO	58
4.3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	58
4.3.2. APLICAÇÃO DO MÉTODO “AMORIM FARIA” ÀS AMOSTRAS À FLEXÃO	58
4.3.2.1. Procedimento seguido na aplicação do método	58
4.3.2.2. Tipologia dos registos realizados	59
4.3.2.3. Classificação final do conjunto de amostras ensaiadas.....	61
4.4. DETERMINAÇÃO DA MASSA VOLÚMICA	63
4.4.1. GENERALIDADES.....	63
4.4.2. AMOSTRAS ENSAIADAS À COMPRESSÃO AXIAL.....	64
4.4.3. AMOSTRAS ENSAIADAS À FLEXÃO	65
4.5. ENSAIOS À COMPRESSÃO.....	65
4.5.1. INTRODUÇÃO AO TRABALHO DESENVOLVIDO	65
4.5.2. ESQUEMA DE ENSAIO	67
4.5.3. PROCEDIMENTO DE ENSAIO À COMPRESSÃO AXIAL.....	68
4.6. ENSAIOS À FLEXÃO.....	71
4.6.1. ASPECTOS GERAIS.....	71
4.6.2. ESQUEMA DE ENSAIO	72
4.6.3. PROCEDIMENTO DE ENSAIO À FLEXÃO	75
 5. TRATAMENTO E ANÁLISE DE RESULTADOS.....	 77
5.1. INTRODUÇÃO.....	77
5.2. CONCEITOS ESTATÍSTICOS	78
5.3. MASSA VOLÚMICA	79
5.3.1. RESULTADOS OBTIDOS.....	79
5.3.1.1. Lotes ensaiados à flexão	79
5.3.1.2. Lotes ensaiados à compressão.....	82
5.3.2. TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS OBTIDOS NA DETERMINAÇÃO DA MASSA VOLÚMICA.....	84
5.3.2.1. Lotes ensaiados à flexão	84
5.3.2.2. Lotes ensaiados à compressão.....	86
5.4. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	88
5.4.1. APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS	88

5.4.1.1. Mecanismo de rotura.....	88
5.4.1.2. Resultados dos ensaios realizados	91
5.4.1.3. Obtenção dos valores da resistência à compressão paralela ao fio	94
5.4.2. TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS VALORES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL	99
5.4.2.1. Considerações gerais sobre o trabalho realizado	99
5.4.2.2. Lote “Dc”	99
5.4.2.3. Lote “Ac”	101
5.5. RESISTÊNCIA À FLEXÃO	103
5.5.1. CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES.....	103
5.5.2. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	104
5.5.2.1. Tipos de mecanismos de rotura	104
5.5.2.2. Resultados alcançados nos ensaios à flexão	105
5.5.2.3. Determinação dos valores de tensão de rotura à flexão.....	110
5.5.2.4. Análise de resultados obtidos.....	112
5.5.3. TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS RESULTADOS DA RESISTÊNCIA À FLEXÃO.....	114
5.5.3.1. Aspectos relevantes.....	114
5.5.3.2. Lote “D”	114
5.5.3.3. Lote “G”	115
5.6. MÓDULO DE ELASTICIDADE	116
5.6.1. MÓDULO DE ELASTICIDADE OBTIDO A PARTIR DOS ENSAIOS À FLEXÃO.....	116
5.6.1.1. Aspectos Gerais.....	116
5.6.1.2. Resultados alcançados com base na norma EN 408	117
5.6.1.3. Tratamento estatístico dos valores obtidos	121
5.6.2. MÓDULO DE ELASTICIDADE CALCULADO COM BASE NOS ENSAIOS À COMPRESSÃO PARALELA AO FIO.....	123
5.6.2.1. Considerações acerca da determinação do módulo de elasticidade	123
5.6.2.2. Correlações da extensão entre placas com a extensão do terço central	124
5.6.2.3. Resultados obtidos.....	126
5.6.2.4. Tratamento dos resultados alcançados.....	129
 6. INTERPRETAÇÃO DE RESULTADOS	 131
6.1. INTRODUÇÃO	131
6.2. LOTES DE MADEIRA DE CARVALHO	131

6.2.1. MASSA VOLÚMICA.....	131
6.2.2. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO PARALELA AO FIO DA MADEIRA.....	132
6.2.3. RESISTÊNCIA À FLEXÃO	133
6.2.4. MÓDULO DE ELASTICIDADE.....	135
6.3. LOTES DE MADEIRA DE CASTANHO	136
6.3.1. MASSA VOLÚMICA.....	136
6.3.2. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO PARALELA AO FIO DA MADEIRA.....	137
6.3.3. RESISTÊNCIA À FLEXÃO	137
6.3.4. MÓDULO DE ELASTICIDADE.....	138
6.4. VALIDAÇÃO DA CLASSIFICAÇÃO VISUAL	139
7. CONCLUSÃO	141
7.1. PRINCIPAIS RESULTADOS OBTIDOS	141
7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	144
BIBLIOGRAFIA	147
<u>ANEXOS</u>	153

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

FIG. 2.1 – As três direcções segundo as quais a madeira exhibe diferentes propriedades: Radial, Longitudinal e Tangencial	8
FIG. 2.2 – Estrutura do material lenhoso.....	8
FIG. 2.3 – Alguns exemplos da variabilidade de espécies (da esquerda para a direita): Carvalho – <i>Quercus robur</i> , Castanheiro – <i>Castanea sativa</i> , Pinho bravo – <i>Pinus pinaster</i> .	10
FIG. 2.4 – Exemplos de derivados de madeira: à esquerda contraplacado lamelado e à direita aglomerados de fibras.....	12
FIG. 2.5 – Variação da resistência à compressão em função da humidade (UTAD, 1988) ...	14
FIG. 2.6 – Relação da variação dimensional com o teor em água (Negrão, 2004).....	15
FIG. 2.7 – Relação da resistência mecânica com a densidade: 1 – flexão estática; 2 – compressão axial; 3 – Dureza)	17
FIG. 2.8 – Secção de uma viga de madeira exposta ao fogo durante 30 minutos.....	18
FIG. 2.9 – Provetes destinados aos ensaios de tracção axial (UTAD, 1988)	19
FIG. 2.10 – Nós em vigas de madeira serrada de Carvalho.....	23
FIG. 2.11– Representação de uma peça de madeira onde é visível a inclinação do fio	24
FIG. 2.12 – Representação da posição dos lenhos de compressão e de tracção no tronco das árvores (Moreschi, 2005)	24
FIG. 2.13 – Fendas visíveis em vigas de madeira serrada de Carvalho.....	25
FIG. 2.14 – À esquerda degradação por fungos cromogéneos. À direita degradação provocada por bolores (Arriaga, 2002).....	27
FIG. 2.15 – À esquerda é visível a podridão castanha; ao centro a podridão branca ou fibrosa; à direita a podridão branda.....	27
FIG. 2.16 – Térmitas associadas ao ataque provocado	28
FIG. 2.17 – Caruncho associado ao ataque provocado.....	28
FIG. 2.18 – Degradação provocada por agentes abióticos: à esquerda acção da chuva; à direita acção da radiação solar	29

CAPÍTULO 3

FIG. 3.1 – Diferentes fases do procedimento de classificação controlado pela máquina (Sandomeer e Jochen, 2007).....	34
FIG. 3.2 – Atribuição de classes de resistência a madeira em serviço (Franco, 2008).....	39
FIG. 3.3 – Aparelhos de avaliação não destrutiva por avaliação da velocidade de propagação de ultra-sons: à esquerda aparelhos <i>Sylvatest</i> e à direita exhibe-se o PUNDIT (Botelho, 2006)41	

FIG. 3.4 – À esquerda ilustra-se o corpo central do <i>Resistograph</i> . À direita é visível a bateria e impressora portátil (Botelho, 2006)	42
FIG. 3.5 – Informação proporcionada pelo método: radargrama (Botelho, 2006)	43
FIG. 3.6 – À esquerda mostra-se o <i>Pilodyn 6J</i> ; à direita ilustra-se o esquema de funcionamento do <i>Pilodyn</i> (Dias, 2008).....	44
FIG. 3.7 – Exemplos de <i>Metriguard</i> : à esquerda <i>Metriguard 2800 DME</i> ; à direita <i>Metriguard 330 Finger Joint Tester</i>	45

CAPÍTULO 4

FIG. 4.1 – Amostras do lote “Dc”	51
FIG. 4.2 – Origem da madeira ardida. Esquerda: vista exterior sobre o palacete; Direita: Pormenor de um travamento realizado em madeira.....	51
FIG. 4.3 – Preparação das amostras “Ac”. Esquerda: viga de madeira de Carvalho ardida; Centro: corte realizado sobre as vigas; Direita: aspecto final dos provetes “Ac”	52
FIG. 4.4 – Amostras do lote “Ac”	52
FIG. 4.5 – Amostras do lote “D”.....	53
FIG. 4.6 – Preparação das amostras “G”. Esquerda: vigas de madeira ardida retiradas do palacete; Direita: aspecto final dos provetes “G”.....	53
FIG. 4.7 – Amostras do lote “G”.....	54
FIG. 4.8 – Tipo de registo fotográfico realizado. Esquerda: pormenor de um defeito; Direita: vista geral de uma viga	58
FIG. 4.9 – Registo fotográfico realizado para a amostra G5.....	59
FIG. 4.10 – Pesagem de vigas	64
FIG. 4.11– Medição e pesagem das amostras dos lotes “Ac” e “Dc”	65
FIG. 4.12 – Tipos de ensaios à compressão	66
FIG. 4.13 – Vistas do ensaio de compressão axial.....	67
FIG. 4.14 – Transmissão da carga pela subida do prato inferior.....	67
FIG. 4.15 – Defeitos registados antes do ensaio.....	68
FIG. 4.16 – Ajuste do prato superior à amostra	69
FIG. 4.17 – Mecanismo de leitura e controlo do ensaio	69
FIG. 4.18 – Rotura de uma amostra submetida ao ensaio de compressão axial	70
FIG. 4.19 – Amostra exibindo a colocação dos três extensómetros	71
FIG. 4.20 – Secção transversal dos dois tipos de amostras. Esquerda: lote “G”. Direita: lote “D”	72
FIG. 4.21 – Esquema de ensaio da norma EN 408	73
FIG. 4.22 – Esquemas reais de ensaio. Esquerda: viga do lote “D”. Direita: viga do lote “G”	73

FIG. 4.23 – Pormenor da zona de apoio	74
FIG. 4.24 – Pormenores do esquema de ensaio. Esquerda: ligação do extensómetros à peça. Direita: zona de carregamento	75
FIG. 4.25 – Amostras submetidas ao ensaio de flexão.....	76

CAPÍTULO 5

FIG. 5.1 – Distribuição Normal ou Gaussiana	78
FIG. 5.2 – Massa volúmica das amostras do lote “D”	85
FIG. 5.3 – Massa volúmica das amostras do lote “G”	86
FIG. 5.4 – Massa volúmica das amostras do lote “Dc”	87
FIG. 5.5 – Massa volúmica das amostras do lote “Ac”.....	88
FIG. 5.6 – Exemplo de rotura nos provetes de compressão axial. a) Comparação entre dois provetes (antes e depois do ensaio); b) Face comprimida antes do ensaio. c) Vista do provete depois do ensaio. d) Face comprimida depois do ensaio	89
FIG. 5.7 – Mecanismo de rotura: a) Antes de aplicação da carga; b) Colapso das células por quebra das paredes de topo; c) Colapso por varejamento das paredes laterais	90
FIG. 5.8 – Influência dos furos provocados por pregos nas linhas de rotura.....	91
FIG. 5.9 – Tipo de resposta mais frequente obtida nos ensaios à compressão: Força vs Deslocamento entre placas (amostra Ac16)	92
FIG. 5.10 – Tipo de resposta mais frequente obtida nos ensaios à compressão: Força vs Deslocamento entre placas (amostra Dc28)	92
FIG. 5.11 – Conjunto de respostas Força vs Deslocamento entre placas – Lote “Dc”	93
FIG. 5.12 – Conjunto de respostas Força vs Deslocamento entre placas – Lote “Ac”	94
FIG. 5.13 – Tipologia dos gráficos obtidos nos ensaios à compressão: Tensão de compressão vs Extensão entre placas (amostra Ac16).....	95
FIG. 5.14 – Tipologia dos gráficos obtidos nos ensaios à compressão: Tensão de compressão vs Extensão entre placas (amostra Dc28)	95
FIG. 5.15 – Diferença de comportamentos de amostras do mesmo lote (lote Ac).....	98
FIG. 5.16 – Resistência à compressão axial ($f_{c,0}$) – Lote Dc	99
FIG. 5.17 – Faces da amostra Dc25.....	100
FIG. 5.18 – Faces da amostra Dc2.....	100
FIG. 5.19 – Faces da amostra Ac7.....	101
FIG. 5.20 – Faces da amostra Ac12.....	102
FIG. 5.21 – Resistência à compressão axial ($f_{c,0}$) – Lote Ac	103
FIG. 5.22 – Fissura prolongada ao longo da peça.....	104
FIG. 5.23 – Rompimento na zona traccionada	104

FIG. 5.24 – Rotura por corte.....	105
FIG. 5.25 – Conjunto de respostas Força vs Deslocamento a meio vão – Lote “D”	108
FIG. 5.26 – Conjunto de respostas Força vs Deslocamento a meio vão – Lote “G”	108
FIG. 5.27 – Diferença de comportamentos de amostras do mesmo lote (lote D)	109
FIG. 5.28 – Faces da amostra G45	113
FIG. 5.29 – Faces da amostra G22	113
FIG. 5.30 – Aspecto geral da amostra D5	114
FIG. 5.31 – Resistência à flexão ($f_{m,k}$) – Lote “D”	115
FIG. 5.32 – Resistência à flexão ($f_{m,k}$) – Lote “G”	116
FIG. 5.33 – Diferentes Módulos de Elasticidade em flexão – Lote “G”	120
FIG. 5.34 – Módulo de Elasticidade em flexão – Lote “G”	121
FIG. 5.35 – Módulo de Elasticidade em flexão – Lote “D”	122
FIG. 5.36 – Correlação entre extensões obtida a partir de três amostras “Ac”	124
FIG. 5.37 – Correlação entre extensões obtida a partir de cinco amostras “Ac”	125
FIG. 5.38 – Correlação entre extensões obtida a partir de três amostras “Dc”	125
FIG. 5.39 – Módulo de Elasticidade em compressão paralela ao fio – Lote “Dc”	129
FIG. 5.40 – Módulo de Elasticidade em compressão paralela ao fio – Lote “Ac”	130

ÍNDICE DE QUADROS

CAPÍTULO 3

Quadro 3.1 – Normas de classificação visual e classes de qualidade (Arriaga, 2003)	33
Quadro 3.2 – Classes de Resistência. Valores característicos (EN 338 [1])	36
Quadro 3.3 – Relação entre classes de qualidade e classes de resistência (EN 1912 [6]) ...	37
Quadro 3.4 – Classes de Resistência a usar no cálculo de estruturas de madeira portuguesa existentes	40
Quadro 3.5 – Método Amorim Faria: proposta de classificação visual <i>in situ</i> – Pinho (Franco, 2008)	47
Quadro 3.6 – Método Amorim Faria: proposta de classificação visual <i>in situ</i> – Carvalho e Castanho (Franco, 2008)	47
Quadro 3.7 – Método Amorim Faria: Valores de cálculo para a classificação <i>in situ</i> de Pinho (Franco, 2008)	48
Quadro 3.8 – Método Amorim Faria: Valores de cálculo para a classificação <i>in situ</i> de Carvalho e Castanho (Franco, 2008)	48

CAPÍTULO 4

Quadro 4.1 – Número total de amostras	54
Quadro 4.2 – Características gerais da madeira de Castanho	56
Quadro 4.3 – Características gerais da madeira de Carvalho	57
Quadro 4.4 – Ficha de classificação visual (amostra G5)	60
Quadro 4.5 – Classificação visual atribuída às amostras do lote “D”	61
Quadro 4.6 – Classificação visual atribuída às amostras do lote “G”	62

CAPÍTULO 5

Quadro 5.1 – Massa volúmica das amostras do lote “D”	80
Quadro 5.2 – Massa volúmica das amostras do lote “G”	81
Quadro 5.3 – Massa volúmica das amostras do lote “Dc”	82
Quadro 5.4 – Massa volúmica das amostras do lote “Ac”	83
Quadro 5.5 – Valores estatísticos do lote “D”	84
Quadro 5.6 – Valores estatísticos do lote “G”	85
Quadro 5.7 – Valores estatísticos do lote “Dc”	86
Quadro 5.8 – Valores estatísticos do lote “Ac”	87
Quadro 5.9 – Resultados dos ensaios do lote “Dc”	96

Quadro 5.10 – Resultados dos ensaios do lote “Ac”	97
Quadro 5.11 – Valores característicos da resistência à compressão (lote “Dc”)	101
Quadro 5.12 – Valores característicos da resistência à compressão (lote “Ac”)	103
Quadro 5.13 – Resultados dos ensaios de flexão (lote “D”).....	106
Quadro 5.14 – Resultados dos ensaios de flexão (lote “G”)	107
Quadro 5.15 – Tensão de rotura à flexão (lote “G”)	111
Quadro 5.16 – Tensão de rotura à flexão (lote “D”)	112
Quadro 5.17 – Valores característicos da resistência à flexão (lote “D”).....	115
Quadro 5.18 – Valores característicos da resistência à flexão (lote “G”)	116
Quadro 5.19 – Características das amostras dos dois lotes ensaiados	117
Quadro 5.20 – Módulo de Elasticidade em flexão (lote “D”).....	118
Quadro 5.21 – Módulo de Elasticidade em flexão (lote “G”)	119
Quadro 5.22 – Valores característicos do módulo de elasticidade em flexão (lote “G”)	121
Quadro 5.23 – Valores característicos do módulo de elasticidade em flexão (lote “D”)	122
Quadro 5.24 – Módulo de Elasticidade em compressão paralela ao fio (lote “Dc”)	126
Quadro 5.25 – Módulo de Elasticidade em compressão paralela ao fio (lote “Ac”)	128
Quadro 5.26 – Valores característicos do módulo de elasticidade em compressão paralela ao fio (lote “Dc”)	129
Quadro 5.27 – Valores característicos do módulo de elasticidade em compressão paralela ao fio (lote “Ac”)	130

1

INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES E OBJECTIVOS DA DISSERTAÇÃO

O tema desta dissertação é “Avaliação experimental das principais propriedades mecânicas de peças estruturais em madeira antiga”.

A madeira constituiu-se, desde sempre e até ao início do século XX, como o material mais utilizado na vertente estrutural da construção em Portugal, sendo capaz de reunir vários factores interessantes que nenhum outro material igualava, tal como a resistência exibida, a abundância revelada e a facilidade de manuseamento. A madeira serviu de matéria-prima para a construção de obras excepcionais na perspectiva da concepção e da realização.

As excelentes características mecânicas e de durabilidade (quando acondicionada correctamente) evidenciadas pela madeira são as razões fundamentais que justificam o facto de, ainda hoje, ser possível presenciar construções, com vários séculos, em bom estado de conservação e a desempenharem as suas funções com um bom nível de desempenho e de acordo com o inicialmente desejado.

Contudo, mesmo reconhecendo que apresenta qualidades enquanto material vocacionado para a construção, a utilização da madeira em elementos estruturais sofreu no século XX um decaimento acentuado, verificando-se vários exemplos de estruturas de madeira que foram substituídas por outros sistemas constituídos por diferentes materiais (alguns incêndios estiveram na génese desta substituição provocando a destruição completa das peças estruturais de madeira). Esta transferência da responsabilidade estrutural da madeira para outros materiais ficou vincada durante o século XIX com o aparecimento do betão e do aço, materiais capazes de conciliar flexibilidade conceptual (permitiram a construção de estruturas mais audazes) com segurança estrutural e com elevada fiabilidade de propriedades mecânicas. Tratou-se de uma evolução marcante no desenvolvimento da construção já que estes materiais facilitaram a resposta às novas exigências e o acompanhamento do progresso no domínio do cálculo estrutural.

As qualidades comprovadas da madeira para utilização em sistemas estruturais são contrabalançadas com algumas características que induzem receio e insegurança aos projectistas, contribuindo para o decréscimo na sua utilização. A abundância de recursos (várias florestas espalhadas por todo o Mundo) foi assinalada como uma virtude associada ao emprego da madeira, mas também acarreta uma enorme variedade de espécies florestais com propriedades muito distintas, tornando difícil regulamentá-las e normalizá-las. Por outro lado, a madeira é afectada por diversos tipos de defeitos e anomalias que podem ter grande influência na capacidade resistente das peças estruturais, condicionando o comportamento mecânico e denotando mais ou menos fragilidades em peças

aparentemente semelhantes. O comportamento anisotrópico da madeira também se constitui como uma limitação no uso da madeira pois a aplicação correcta das peças tem de ser feita de forma orientada.

Com tudo isto, face às suas vantagens e aos seus inconvenientes, a madeira, que se tratou de um material usado quase de forma empírica durante largos séculos, foi incapaz de acompanhar o rápido desenvolvimento da construção. Mesmo sendo um dos materiais mais antigos usados ao nível estrutural pelo Homem, o conhecimento existente a seu respeito é muito redutor e aumenta ainda mais a insegurança na sua aplicação, contribuindo também para isto o facto de existir, até há poucos anos, um vazio regulamentar e normativo relativamente ao cálculo de estruturas de madeira.

Nos últimos anos, ocorreram enormes avanços nas técnicas de análise experimental e numérica sobre as estruturas antigas, animados também pela crescente consciencialização da necessidade de reabilitação do património arquitectónico edificado. Em Portugal, o conceito de reabilitar edifícios antigos ganha cada vez mais importância e, por este motivo, a utilização da madeira em estruturas tem captado mais interesse, aumentando as percentagens de utilização e da sua recuperação. Hoje em dia, assiste-se a um regresso ao uso da madeira como elemento estrutural pelas vantagens em termos de peso, rapidez de montagem, resistência ao fogo, racionalismo ecológico, economia de custos e facilidade de “desconstrução”. Adicionalmente, começam a ficar disponíveis gradualmente Normas e Pré-normas que procuram preencher o vazio regulamentar que existia em relação à madeira, facilitando o conhecimento dos factores que definem o seu comportamento físico, particularmente os que definem a resistência mecânica, e proporcionam guias que facilitam a sua utilização em projectos estruturais.

É importante perceber que as peças estruturais em madeira apresentam uma grande variabilidade no que refere às propriedades mecânicas devido à diversidade de factores que afectam a sua resistência, tal como anteriormente se disse. Com isto, para que a confiança à volta da utilização da madeira em sistemas estruturais aumente, surgiu a necessidade de criar um esquema de controlo de qualidade que proporcionasse garantias aos construtores acerca das características físicas e mecânicas referentes às peças. O procedimento que actualmente se segue para o efeito descrito é designado por classificação de madeiras e é utilizado já há muitos anos nos países mais desenvolvidos nesta matéria (ao contrário do que se passa em Portugal). Este sistema de “certificação de produto” parte da observação de um elemento em madeira e, juntamente com os parâmetros definidores das características físicas e de resistência, leva à atribuição de uma classe de qualidade que se encontra interligada a uma classe de resistência. A aplicação de classes de resistência a peças de madeira permite desde logo conhecer as suas propriedades mecânicas mais relevantes. Esta forma de controlar é de fácil aplicação a madeira nova, desde que se tenha acesso à informação que define o seu local de origem, mas de difícil aplicação a madeira antiga, isto é, constituinte de sistemas estruturais de edifícios existentes.

Esta dissertação surge como desenvolvimento de uma metodologia de determinação da capacidade resistente de elementos estruturais de madeira por inspecção visual *in situ*, originalmente proposta para madeiras portuguesas antigas na dissertação de Sónia Franco [37]. Esta metodologia consistiu da definição de um processo simples e de aplicação prática em obra, baseado na inspecção visual dos elementos e tendo como fonte de inspiração algumas especificações presentes em normalização existente na Comunidade Europeia ou generalizando conceitos existentes em normas aplicáveis a uma única espécie de madeira, existentes na Europa ou em países europeus mediterrâneos com maior tradição de classificação de madeiras (França, Espanha e Itália).

Essa metodologia propõe um conjunto de linhas gerais que permitem a classificação de peças de madeira estrutural de edifícios, ou seja, madeira antiga, por visualização das particularidades dessas

peças, e possibilitam também uma posterior definição e clarificação da capacidade resistente. Surgiu assim a necessidade de validar e esclarecer o método proposto. Esta dissertação despontou com o interesse em se aplicar os critérios definidos na proposta de classificação visual a provetes de madeira (neste caso de Castanho e Carvalho) atribuindo-lhes uma determinada classificação (conforme satisfizessem ou não os limites definidos) e submetendo-os numa fase posterior a ensaios de resistência mecânica e permitindo validar assim os valores apresentados para as propriedades mecânicas consideradas. Prepararam-se assim dois lotes de peças serradas, um proveniente do mesmo edifício que forneceu amostras para a dissertação de Sónia Franco (Edifício na Ribeira do Porto, Castanho) e outro proveniente de um lote de madeira ardida de Carvalho originalmente recolhida num palacete existente no distrito de Braga.

Os lotes de peças ensaiadas foram preparados de forma aleatória e são constituídos respectivamente por dois sub-lotes de amostras, destinadas a serem ensaiadas à compressão e à flexão. Foram assim ensaiados quatro lotes no total, dois de madeira de Carvalho, provenientes de toros ardidos, um ensaiado à compressão e outro à flexão e dois de madeira de Castanho, também constituídos um por peças a ensaiar à compressão e outro à flexão.

O objectivo principal desta dissertação é assim o de validar um processo de classificação visual de madeira antiga de Carvalho e Castanho por observação *in situ* bem como os valores das principais propriedades mecânicas a usar na verificação estrutural.

Paralelamente pretendia-se também perceber o efeito que um incêndio pode ter nas propriedades das partes residuais não ardidas de toros ou vigas afectadas pelo fogo.

Obviamente que a campanha experimental permitiria ainda retirar conclusões importantes acerca do comportamento mecânico de madeira, bem como validar os métodos de ensaio usados para a avaliação das propriedades das peças.

Finalmente, constituía também um objectivo da dissertação a recolha de informação relevante que permita ajudar a preparar uma nova iteração do método de classificação visual de madeira antiga, designado nesta dissertação como “método Amorim Faria”.

Em conclusão, fundamentalmente, procurou-se assim contribuir para um conhecimento mais abrangente da madeira presente em edifícios susceptíveis de serem alvos de processos de reabilitação, adquirindo mais confiança na solução de conservação integral do existente e aumentando os níveis de eficácia destes processos. Pode-se dizer que os resultados práticos obtidos constituem uma ferramenta a considerar em futuros desenvolvimentos desta temática.

1.2. SUPORTE DO TRABALHO REALIZADO

A principal base de suporte do trabalho elaborado ao longo desta dissertação pode ser dividida fundamentalmente em dois conjuntos:

- Conjunto de normas referentes à classificação de madeiras e as que especificam métodos de ensaios para a determinação de propriedades mecânicas da madeira;
- Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de Mestre em Engenharia Civil realizada por Sónia Franco com o tema de “Proposta de atribuição de propriedades mecânicas a elementos estruturais por inspecção visual *in situ*” (Franco, 2008).

As normas sobre classificação de madeiras, nomeadamente normas definidas a nível europeu pelo Comité Técnico Normalizador e normas de classificação visual utilizadas em alguns países europeus, serviram para se perceber melhor o trabalho desenvolvido até se concluir a proposta de classificação

visual, designada mais tarde por “método Amorim Faria”. Por outro lado, as normas que disciplinam os ensaios de determinação de propriedades mecânicas da madeira, nomeadamente a EN 408 [12], serviram de suporte regulamentar ao longo da campanha experimental realizada, definindo os esquemas de ensaio a utilizar, a velocidade de aplicação de carga, a dimensão dos provetes, entre outras considerações necessárias à sua realização.

O segundo ponto referido constituiu a ferramenta fundamental usada no processo de classificação visual realizado sobre os provetes destinados à execução dos ensaios à flexão. Procurou-se aplicar os critérios apresentados pelo “método Amorim Faria”, primeira evolução do método apresentado na dissertação mencionada, no que diz respeito à limitação dos defeitos, depois de se terem estudado as suas formas de medição.

Existem outros documentos que foram consultados, mas num patamar de importância inferior comparativamente com os dois conjuntos supracitados. Remete-se, ao longo da dissertação, para as referências bibliográficas todos os outros textos que serviram de base aos conteúdos não originais incluídos na dissertação.

1.3. ESTRUTURAÇÃO E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A fim de mais facilmente orientar a leitura do texto apresenta-se em seguida a organização dos capítulos que se seguem à introdução:

- No *Capítulo 2* procura-se demonstrar o carácter particular da madeira como material de construção, expondo especificidades como o seu carácter natural, a anisotropia e a variabilidade de espécies entre outras. Faz-se também algumas referências à durabilidade natural da madeira, destacando os factores que condicionam as propriedades físico-mecânicas, como são os casos dos defeitos intrínsecos à madeira (nós, fendas, inclinação do fio) e a influência dos agentes de degradação, tanto bióticos como abióticos.
- O *Capítulo 3* surge no encadeamento das ideias narradas no capítulo dois referentes às propriedades variáveis da madeira e à problemática da sua utilização enquanto material estrutural. Assim, procura mostrar-se todos os procedimentos existentes que possibilitam a definição das particularidades físicas e mecânicas das peças, tendo como elo de ligação a classificação de madeiras, meio para disciplinar o seu processo construtivo. Resumidamente, descrevem-se as formas de classificação e organização aplicáveis a madeira nova e, numa fase posterior do capítulo, detalham-se os métodos de avaliação das propriedades mecânicas da madeira estrutural antiga, com destaque para o “método Amorim Faria”.
- O *Capítulo 4* abrange a descrição do trabalho experimental realizado no âmbito da dissertação. Expõe-se os principais conceitos e particularidades relacionados com os ensaios, desde os esquemas adoptados até aos procedimentos seguidos na sua execução. Também se descrevem pormenorizadamente os provetes disponíveis para a produção dos ensaios, indicando a sua origem e as suas características mais importantes. Em jeito de conclusão, este capítulo é a transcrição de tudo o que aconteceu na campanha experimental e constitui assim um dos conteúdos principais da dissertação.
- No *Capítulo 5* dá-se continuidade ao trabalho apresentado no capítulo anterior, expondo os resultados obtidos nas diferentes partes que envolveram o trabalho experimental e detalhando o tratamento estatístico que sobre eles incidiu. Apresentam-se os comentários e conclusões de

carácter mais objectivo e que resultam da simples análise de cada conjunto de resultados específicos.

- No *Capítulo 6* caracterizam-se e apresentam-se todas as interpretações de resultados mais relevantes que são possíveis deduzir da campanha experimental efectuada. Organizou-se a apresentação por espécie de madeira e por propriedade estudada e avalia-se genericamente a viabilidade da actual formulação do “método Amorim Faria” para classificar madeira estrutural antiga.
- Finalmente, no *Capítulo 7* resumem-se as principais conclusões da dissertação e propõem-se os mais imediatos caminhos de desenvolvimento futuro para o processo de investigação em curso.

2

MADEIRA ESTRUTURAL – PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS

2.1. ÂMBITO

Com este capítulo, pretende-se fundamentalmente fazer uma breve descrição dos mecanismos e comportamentos da madeira enquanto material de construção. Procura-se evidenciar o carácter particular da madeira como material de construção de origem biológica e como as suas propriedades afectam a resposta estrutural. Neste sentido, numa primeira parte expõe-se as especificidades da madeira salientando-se a índole natural, a anisotropia que influi no comportamento resistente e a grande variabilidade de propriedades verificada entre espécies e entre indivíduos da mesma espécie. A exposição das especificidades culmina com algumas ideias referentes à durabilidade natural da madeira, à forma como as suas propriedades variam ao longo do tempo e ainda ao modo como os derivados conseguem resolver as principais limitações da madeira maciça.

Seguidamente são apresentadas as propriedades físico-mecânicas de maior relevo, as formas de as determinar experimentalmente e os seus factores condicionantes, destacando-se pela sua influência os defeitos naturais das peças de madeira serrada. Os defeitos afectam negativamente a resposta dos elementos face a diferentes solicitações e como tal são apresentados com maior detalhe os que assumem maior importância. Por último mostram-se os agentes de degradação com maior relevância nas peças de madeira e sua forma de manifestação, por serem factores marcantes no seu processo de envelhecimento.

2.2. ESPECIFICIDADES DA MADEIRA

2.2.1. ÁRVORE E MADEIRA

A árvore constitui a génese da madeira. Esta afirmação sustenta-se em características como o carácter natural da madeira, já que esta resulta da transformação desse organismo vivo, heterogeneidade (a composição assenta em células de distintos tipos morfológicos adaptadas ao desempenho de funções específicas) e anisotropia (propriedades diferentes segundo os três eixos direccionais: longitudinal, radial e tangencial). No que se refere à anisotropia, o comportamento da madeira é descrito por uma simplificação designada por transverso isotrópico que consiste em dizer-se que as propriedades no plano xy (plano paralelo às fibras) são iguais em todas as direcções mas diferem das propriedades apresentadas no plano z (plano perpendicular às fibras). Sinteticamente a madeira é um material natural de origem biológica que tem na sua constituição uma matéria heterogénea e anisotrópica.

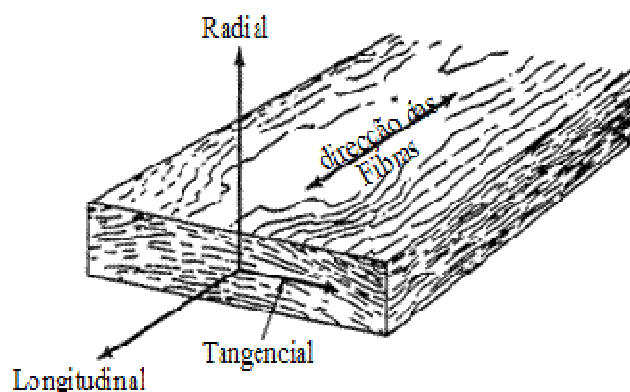


Fig.2.1 – As três direcções segundo as quais a madeira exhibe diferentes propriedades: Radial, Longitudinal e Tangencial

As diversas espécies de árvores podem ser organicamente enquadradas em dois grandes grupos: as Gimnospérmicas e as Angiospérmicas, de onde se destacam respectivamente as subclasses Coníferas (usualmente designadas por Resinosas) e Dicotiledóneas (também conhecidas por Folhosas) que abrangem as árvores madeireiras, isto é, as árvores capazes de produzir madeira com estrutura lenhosa em condições convencionais para utilização. Estas espécies não diferem apenas na aparência exterior, já que as suas diferenças se prolongam também na estrutura anatómica do tecido essencial – o lenho. A título de exemplo, refere-se que as madeiras usadas na campanha experimental desta dissertação, o Carvalho e o Castanho, constituem duas espécies de madeiras folhosas.

A estrutura do material lenhoso é um ponto de distinção entre as diferentes espécies e subespécies de madeiras. Significa isto que, para além da fundamental identificação visual de outras singularidades do material, observáveis em peças resultantes da transformação da árvore, que influenciam o desempenho mecânico de um elemento de madeira, surge a necessidade de se conhecer a estrutura macroscópica da madeira nos seus aspectos mais gerais. A estrutura diferenciada do tecido lenhoso apresenta-se como o principal motivo que justifica a anisotropia e a heterogeneidade da madeira, quer entre espécies, quer em função da localização de onde foi extraída da árvore. Por outro lado, destaca-se a constituição do tronco para se perceber de que forma as diferentes camadas afectam ou contribuem para a capacidade resistente da madeira.

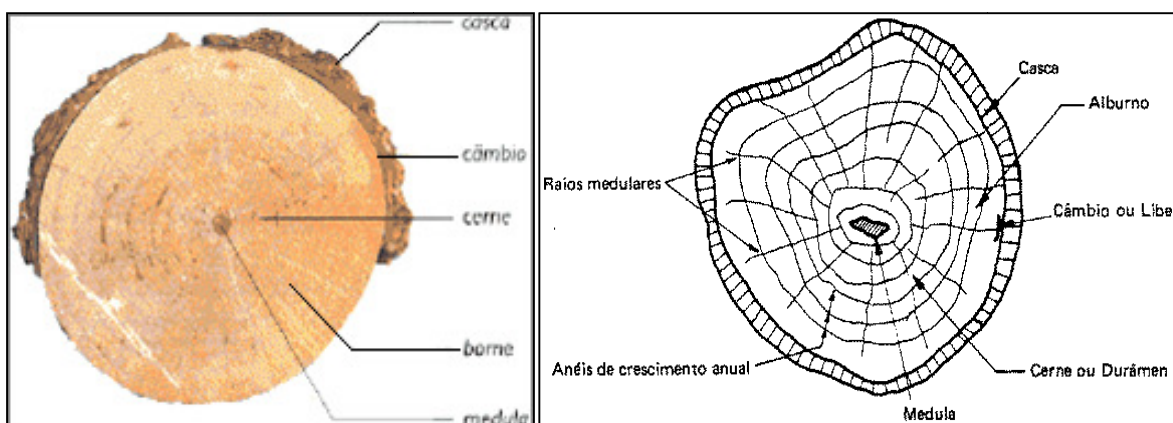


Fig.2.2 – Estrutura do material lenhoso

A casca, sendo a camada mais externa, tem como função proteger o lenho e dirigir a seiva produzida nas folhas da árvore. Não tem importância sobre o ponto de vista estrutural porque é eliminada no aproveitamento do lenho.

O câmbio tem a função de formar novas células sendo por isso responsável pelo crescimento transversal da árvore.

O lenho constitui o suporte fundamental da árvore, conferindo-lhe resistência. A sua estrutura é considerada como parte fulcral na definição das propriedades da madeira, embora não seja capaz de explicar totalmente o comportamento tecnológico do material lenhoso. O lenho encontra-se dividido em duas camadas: uma mais externa e de cor mais clara designada por **borne** (trata-se da madeira mais jovem da árvore) e outra mais interior denominada por **cerne** (Botelho, 2006). O cerne apresenta maior densidade, resistência e estabilidade perante a humidade e agentes de degradação biológica, já que não participa na condução da água, preocupando-se acima de tudo com o suporte mecânico da árvore. Embora possa, dadas as suas características higroscópicas, funcionar como um importante reservatório de água para a planta, o cerne é na sua essência uma estrutura de suporte, não sendo vital para a sobrevivência da árvore. Surge a conveniência de referir que o lenho representa a parte fundamental do tronco no que diz respeito ao fornecimento da matéria-prima para a utilização humana em estruturas ou construção civil.

Como foi referido, a transição entre estas duas camadas está associada a uma mudança de cor. Esta alteração deve-se à deposição de produtos químicos que, para além de diferenciarem visualmente a separação entre o borne e o cerne, proporcionam maior durabilidade ao lenho contra a deterioração provocada por fungos ou por ataques de insectos.

Nas áreas delimitadas pelo borne e cerne são identificáveis os anéis de crescimento anual, consequência do crescimento transversal por acumulação de novas camadas.

A medula é o constituinte central do tronco. Não exhibe capacidade resistente nem durabilidade pelo que a sua presença em peças serradas é tomada como um defeito.

Por último, os raios medulares alongam-se radialmente e desenvolvem-se de uma forma perpendicular ao tronco, desde a medula até à casca. A sua utilidade associa-se ao transporte transversal e armazenamento de substâncias nutritivas. Além desta função contribuem para a rigidez da estrutura do tronco e são auxiliares valiosos na definição qualitativa da madeira.

2.2.2. IMPORTÂNCIA DAS ESPÉCIES

Existem cerca de 30.000 espécies de madeiras conhecidas no mundo, tanto Resinosas como Folhosas. Dentro deste vasto leque de famílias exibem-se algumas centenas de espécies interessantes sob o ponto de vista comercial, servindo como matéria-prima para diferentes trabalhos em madeira (carpintaria) ou fornecendo-a para fins estruturais. Quanto à madeira para estruturas, são conhecidas centenas de espécies de madeira utilizáveis mas apenas algumas delas são comercializadas actualmente. As razões estendem-se a questões regionais (algumas espécies encontram-se em áreas delimitadas), a questões financeiras (sectores de extracção sem grande interesse na sua comercialização) ou relacionam-se simplesmente com a ignorância das propriedades, resistentes ou outras, de espécies menos habituais.



Fig.2.3 – Alguns exemplos da variabilidade de espécies (da esquerda para a direita: Carvalho – *Quercus robur*, Castanheiro – *Castanea sativa*, Pinho bravo – *Pinus pinaster*)

A estrutura e as propriedades físicas da madeira são influenciadas pela grande variabilidade de espécies existente, pela idade e pelas condições de crescimento da árvore. O grau de variabilidade estende-se, dentro de uma dada espécie de árvore e mesmo dentro de uma árvore genérica, podendo-se afirmar que não é possível encontrar numa árvore dois pontos distintos com características semelhantes. Este facto dificulta a classificação por espécie pois é complexo associar madeiras com características anatómicas muito diversas. Por isso, a compreensão do comportamento da madeira deve começar com o conhecimento da sua estrutura fibro-anatómica.

Outro obstáculo à utilização e à caracterização mecânica da madeira deriva do facto de existirem diferentes espécies dentro de uma dada família e das considerações gerais existentes para essa família abrangerem “subclasses” com características e especificações próprias. A família da madeira de Carvalho constitui um exemplo do que se acaba de descrever, uma vez que engloba distintas designações para espécies como o Carvalho vermelho (*Quercus robur*), Carvalho vermelho americano (*Quercus coccinea* por exemplo), Carvalho japonês (*Quercus acutissima*), Carvalho negral (*Quercus pyrenaica*) ou Carvalho português (lusitano – *Quercus faginea*).

Esta variabilidade implica o desenvolvimento de estudos sobre madeiras locais, isto é, madeiras típicas de uma dada região, reunindo informação sobre a espécie para que seja possível universalizar conceitos. Procura-se essencialmente uma oposição ao carácter regional da madeira.

2.2.3. EXISTÊNCIA DE DEFEITOS

A madeira é um material dotado de um carácter especial pela génese que tem e pelas características que apresenta. O seu comportamento pode ser grandemente afectado por irregularidades, anomalias ou alterações na sua constituição original. Pela sua importância, os defeitos naturais das peças necessitam de ser estudados com maior profundidade, recorrendo a análises detalhadas e sistematizadas para se conhecer os efeitos negativos que provocam nas propriedades, tanto físicas como mecânicas, dos elementos de madeira.

Este assunto é detalhado no ponto 2.4. do presente capítulo onde se apresentam os vários tipos de defeitos e de que forma condicionam o comportamento da madeira.

A durabilidade de um elemento depende da sua resistência aos agentes que usualmente a solicitam. Do seu comportamento, resultará a determinação da sua respectiva vida útil e da programação da execução das manutenções.

2.2.4. DURABILIDADE NATURAL

A durabilidade natural, conceito muitos vezes usado para designar a resistência ao ataque de agentes bióticos, é uma característica intrínseca e é variável de espécie para espécie, existindo algumas com reconhecida durabilidade natural (Oliveira) e outras naturalmente mais frágeis (por exemplo o Eucalipto de cerne claro). Contudo, nenhuma espécie é capaz de resistir indefinidamente às intempéries, variações das condições ambientais e ao ataque de microrganismos.

Pela importância que este factor revela, foi necessário regulamentar a sua especificidade. A norma EN 350 [11] traduz a durabilidade natural em valores baseados em testes completos e é constituída por duas partes: a Parte 1 explica os métodos de determinação de durabilidade natural da madeira maciça não tratada em relação ao ataque de insectos ou fungos e apresenta a classificação baseada nos resultados desses métodos; a Parte 2 expõe a durabilidade das espécies mais importantes existentes na Europa.

A madeira, como material usado na construção, é vista frequentemente como sendo não durável porque está susceptível à deterioração, o que é frequentemente entendido como a grande limitação apontada à madeira para que possa ser utilizada como elemento estrutural. Com isto, apesar das excelentes qualidades que a madeira exhibe, é importante proceder ao melhoramento das suas características (usando técnicas adequadas) sempre que o ambiente seja reconhecidamente nefasto. Uma medida para melhorar a durabilidade natural baseia-se na aplicação de produtos preservadores, como oleosos naturais (creosote) e produtos minerais hidrossolúveis (sais de cobre, cromo ou outros metais).

2.2.5. EVOLUÇÃO DAS PROPRIEDADES AO LONGO DO TEMPO

Este tema constitui um ponto com interesse no estudo do comportamento de madeira estrutural que foi alvo de um processo evolutivo com o decorrer do tempo. O factor idade não produz depreciação das características da madeira, sendo relativamente fácil de encontrar estruturas de madeira em bom estado, apesar de contarem com alguns séculos de existência, estando expostas a ambientes pouco agressivos.

A degradação, causada tanto por agentes bióticos (infestação animal) como abióticos (factores ambientais), é uma das causas da evolução negativa das propriedades mecânicas ao longo do tempo, podendo-se afirmar que, na eventualidade de não ocorrerem fenómenos importantes de degradação, não há perda de resistência com a idade.

Ao nível da deformação, o módulo de elasticidade, grandeza que interfere na capacidade de recuperar a forma original depois de removida a carga, reduz-se com o tempo, devido à ocorrência de fenómenos de fluência (caso a estrutura tenha sido sujeita a esforços próximos da respectiva tensão de rotura). O mesmo se pode afirmar para a fadiga do material, provocada por cargas cíclicas continuadas ou então por tensões médias uniformes, sobretudo em ligações estruturais.

2.2.6. MADEIRA MACIÇA E DERIVADOS

O trabalho desta dissertação diz respeito a madeira maciça e à avaliação experimental das propriedades mecânicas das peças de madeira antiga. A madeira maciça é adequada para estruturas de suporte, sobretudo para utilizações com elevadas exigências em termos de concepção mas ostenta dificuldades: a obtenção de madeira maciça classificada com as secções e os aspectos necessários para

a sua utilização em sistemas estruturais e obtenção de madeira maciça cujo conhecimento seja exemplar ao nível das características físicas e mecânicas (cor, propriedades, origem).

Os derivados estruturais apareceram para dar resposta às dificuldades apresentadas: variabilidade das propriedades e quantidade disponível de material adequada para sistemas estruturais. Neste sentido, os produtos derivados foram concebidos com o objectivo de colmatar as limitações da madeira e facilitar a adaptação da madeira a usos mais específicos. A grande variabilidade das propriedades que as peças de madeira apresentam reduz-se bastante no caso de se utilizar os seus produtos derivados. Constituem alternativas à aplicação da madeira maciça, melhorando o comportamento resistente face à humidade, ao fogo e sobretudo permitindo à Arquitectura a adição de formas mais arroçadas e menos convencionais. Outro factor positivo na aplicação de derivados da madeira cifra-se na redução substancial da retracção sofrida nos processos de secagem e na respectiva interferência significativa nas propriedades tanto mecânicas como físicas. São exemplos destes derivados da madeira o lamelado colado e o LVL (laminated venner lumber) – madeira laminada.

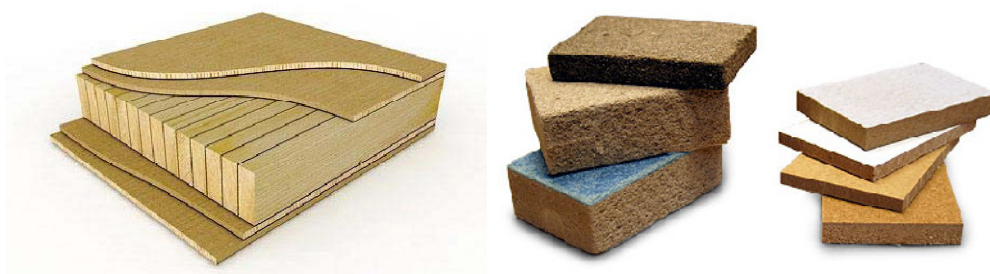


Fig.2.4 – Exemplos de derivados de madeira: à esquerda contraplacado lamelado e à direita aglomerados de fibras)

Tudo isto pode ser justificado a partir do processo que está na origem da sua composição porque se trata de uma produção industrial que garante maior fiabilidade a todos os níveis. Existe um controlo dos derivados que engloba a revisão da matéria-prima usada, a fiscalização do processo de fabrico e posteriores ensaios de validação, tal como acontece com outros materiais de construção (casos do betão e do aço). Na madeira maciça isto não é possível já que a variabilidade na fonte da matéria-prima é muito grande e controlar o processo de obtenção seria uma tarefa incomportável. A única solução possível para resolver este problema sem recorrer ao uso dos materiais derivados é a classificação visual da madeira maciça. Este procedimento representa, para o caso das madeiras novas, o desenvolvimento local de uma metodologia de controlo, dotando-as de um rótulo com as descrições de cada espécie mas, na circunstância de se tratar de madeira antiga, existente em obras, o problema é maior pois não faz sentido retirar peças estruturais da obra para submetê-las a ensaios, classificando-as, e no fim voltar a colocá-las na sua posição inicial.

2.3. PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS

2.3.1. FACTORES CONDICIONANTES DAS PROPRIEDADES

Procura-se agora neste ponto detalhar as propriedades, tanto físicas como mecânicas, definidoras das linhas primordiais do comportamento da madeira, já que o seu conhecimento adequado constitui uma exigência para a utilização crescente deste material enquanto elemento estrutural. Conhecer os

parâmetros influenciadores dos comportamentos e procurar controlá-los constitui a melhor opção com vista à melhor utilização e aplicabilidade deste material em serviço.

As características físicas e mecânicas da madeira são claramente afectadas pela índole natural que esta assume ao provir da árvore. Este facto é provocado pela variabilidade de soluções possíveis, dentro duma espécie e dentro de uma árvore, como foi previamente referido. Mas esta é apenas uma causa no meio de outras, tais como a humidade e a temperatura, que serão abordadas de imediato. Torna-se então necessário sintetizar os aspectos com maior influência nas propriedades da madeira com o objectivo de compreendê-la melhor enquanto material estrutural.

Sendo assim, os principais factores condicionantes das propriedades da madeira são:

a) Espécie botânica

A espécie botânica condiciona a constituição química e o arranjo morfológico dos elementos de madeira já que estas características são variáveis, o que foi anteriormente descrito como “variabilidade de espécie”; daí ser importante a perfeita identificação botânica da espécie em questão; a espécie botânica define o comportamento físico-mecânico da madeira;

b) Localização do tronco da árvore que esteve na origem do elemento de madeira

As características da peça da madeira são influenciadas pela zona de onde foi retirada, podendo ter como proveniência o cerne, borne ou então ter estado mais próxima das raízes ou da copa. Pode-se dizer que há alterações notáveis do tecido lenhoso em função da zona do lenho de onde foi extraída a madeira;

c) Existência de defeitos

Os defeitos na estrutura lenhosa englobam particularidades como nós, fendas, fibras torcidas ou inclinadas e são responsáveis por alterações na resistência da madeira, sendo estas alterações variáveis em função da sua localização, dimensão e distribuição;

Esta temática merecerá uma abordagem com maior detalhe numa parte mais avançada deste capítulo, porque demonstra uma importância particular no comportamento físico-mecânico da árvore e consequentemente da madeira.

d) Efeito da humidade

A humidade exerce influência em grande parte das propriedades de resistência da madeira, afectando o rendimento e qualidade da celulose e aumentando a susceptibilidade aos ataques de fungos; contudo, a madeira pode absorver seguramente uma grande quantidade de água antes de atingir um nível de humidade propícia ao ataque de fungos, sendo esta uma causa da sua degradação como se verá adiante; a influência da humidade é visível nas propriedades mecânicas abaixo do ponto de saturação das fibras (situação em que toda a água livre foi expulsa e as fibras nas paredes celulares estão saturadas), verificando-se que menos humidade se traduz em maior resistência

A variação da resistência mecânica da madeira com o teor de humidade é variável conforme o tipo de tensão e a propriedade mecânica em causa.

Os elevados valores de humidade na madeira são, em geral, o resultado da infiltração de águas das chuvas, formação de condensações, presença de água por capilaridade, perdas nas tubagens ou insuficiente ventilação das áreas de construção.

e) Temperatura

A temperatura assume um papel com menor influência nas propriedades da madeira e consequentemente no seu comportamento mas que não deve ser menosprezado; o fundamento desta

afirmação está no facto de que, só para valores extremos de temperatura, se verificam variações importantes dos valores das propriedades das peças.

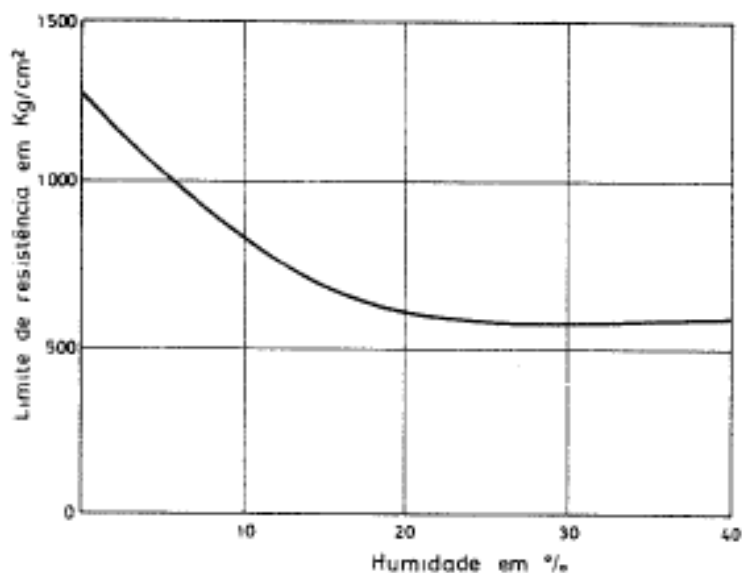


Fig.2.5 – Variação da resistência à compressão em função da humidade (UTAD, 1988)

2.3.2.PROPRIEDADES FÍSICAS

As principais propriedades físicas das peças de madeira serrada incluem:

a) Higroscopicidade: Teor de água

Designa-se por higroscopicidade a propriedade que os materiais porosos têm para reterem nos seus poros uma certa quantidade de humidade existente no ambiente, até se atingir uma situação de equilíbrio, quando colocados no estado seco e estimula alterações nas propriedades físicas e mecânicas da madeira, tanto maiores quanto menor for o seu conteúdo de água;

A humidade da madeira exerce uma influência muito grande no seu comportamento e por isso o teor de água é um parâmetro relevante nos ensaios que visam a determinação das características físico-mecânicas; Define-se teor de água como o quociente, expresso em percentagem, da massa da água que se evapora do material por secagem, pela massa do provete depois de completamente seco (Botelho, 2006); a madeira a aplicar com fins construtivos deverá ter um teor de água o mais próximo possível da humidade de equilíbrio higroscópico correspondente às condições higrotérmicas de serviço, de forma a evitar alterações volumétricas causadoras de anomalias de diversos tipos.

Existe um valor internacionalmente designado por teor de água normal; este toma o valor de 12%, permitindo assim realizar comparações entre resultados de ensaios de avaliação das propriedades físicas e mecânicas.

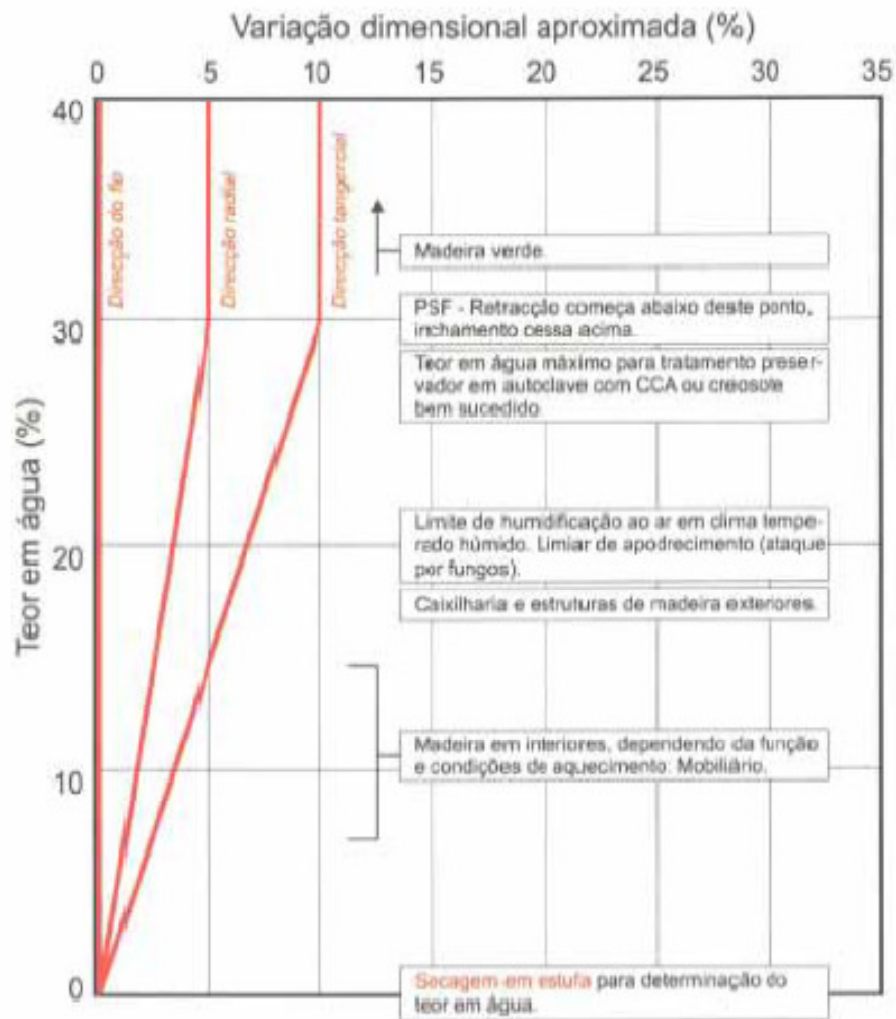


Fig.2.6 – Relação da variação dimensional com o teor em água (Negrão, 2004)

As madeiras podem ser classificadas e ordenadas em categorias, função do seu teor de água (UTAD, 1988):

1. Madeira verde – apresenta um grau de humidade acima do ponto de saturação ao ar, normalmente superior a 30%;
2. Madeira semi-seca – teor de água inferior ao ponto de saturação ao ar, mas superior a 23%;
3. Madeira seca – teor de água compreendida entre 18% e 23%;
4. Madeira seca ao ar – teor de água entre 13% e 18%;
5. Madeira dessecada – teor de água oscilando entre 0% e 13%;
6. Madeira completamente seca ou anidra – 0% de teor de água;

b) Retractilidade

A madeira, como material higroscópico que é, contrai quando o seu teor de água diminui do ponto de saturação das fibras até à condição absolutamente seca ou anidra; neste sentido, a retractsilidade pode ser definida como uma alteração nas dimensões da peça de madeira quando o teor de água também vê o seu valor modificado e abrange a contracção e o inchamento como características próprias da madeira; o sucessivo ciclo de libertação e absorção de humidade é a causa da retractsilidade exibida

pela madeira e a magnitude das variações dimensionais depende de factores como a pressão de vapor do ar envolvente, a direcção estrutural (radial, tangencial ou longitudinal), a posição dentro da árvore, a densidade da madeira e a temperatura;

Quando um dado elemento de madeira perde água, diminuindo a sua humidade, além da perda de massa, ela tem uma diminuição das suas dimensões, designada por retratilidade linear e consequentemente uma redução do seu volume, denominada de retratilidade volumétrica. Estes conceitos apresentam-se como um ponto marcante relacionado com a retratilidade, pois permitem a classificação das espécies lenhosas;

Alguns dos defeitos apresentados pelos elementos de madeira durante a fase de secagem, como empenos, rachas ou fendas, são motivados pelo carácter anisotrópico da retratilidade linear, já que esta induz tensões internas muito diferenciadas;

Segundo (UTAD, 1988), existem três acções capazes de reduzir os efeitos da retratilidade:

1. Utilização de peças de madeira com teores de humidade compatíveis com os do meio ambiente onde se irão inserir;
2. Recurso a processos de serração adequados;
3. Impregnação da madeira com óleos e resinas impermeabilizantes;

c) Densidade ou Massa volúmica

Constitui um parâmetro importante porque define a distribuição e a concentração do material lenhoso; a densidade está directamente relacionada com a massa volúmica aparente e com as propriedades físico-mecânicas da madeira;

A densidade da madeira varia entre espécies, entre indivíduos e mesmo dentro duma árvore, uma vez que as condições de crescimento das árvores exercem grandes influências nas características do material lenhoso, constituindo o melhor indicador da resistência mecânica da madeira sem defeitos; dela dependem a maior parte das qualidades físicas e tecnológicas, servindo na prática como parâmetro para classificação de madeiras; geralmente à medida que aumenta a densidade, aumenta a resistência mecânica (relação quase linear) e a durabilidade natural da madeira o que faz com que seja considerada como uma das propriedades mais importantes, encarando-a como um bom índice de qualidade do lenho.

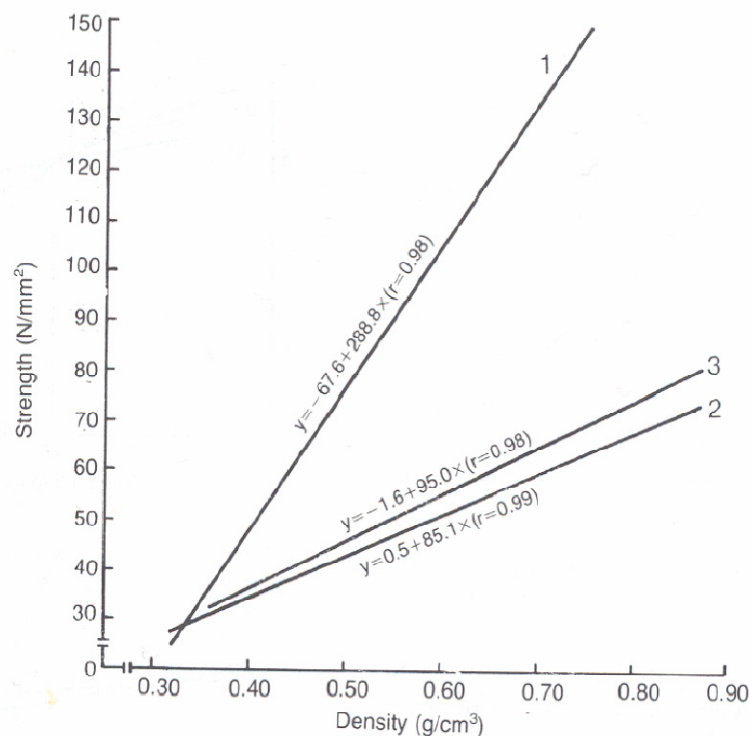


Fig.2.7 – Relação da resistência mecânica com a densidade: 1 – flexão estática; 2 – compressão axial; 3 – Dureza)

Pode-se afirmar que a densidade, nas madeiras, é sempre mencionada tendo em conta o teor de água com que foi determinada e por isso é necessário proceder a uma correcção para o teor de água normal (12%), com o objectivo de realizar comparações entre resultados obtidos;

Os factores que afectam a densidade são essencialmente os seguintes:

1. Espécie;
2. Teor de água
3. Lenho inicial e lenho tardio;
4. Posição no tronco;
5. Influências externas;

As designadas “influências externas” englobam factores como o clima, o tipo de solo, a altitude, a humidade do solo, o espaçamento e a associação de espécies numa população florestal;

d) Outras propriedades

A condutibilidade eléctrica refere-se à circulação da corrente nos materiais e exhibe a maior ou menor resistência à passagem das cargas eléctricas; no que diz respeito à madeira, esta apresenta boa resistividade quando se encontra seca, assumindo-se como um excelente isolante;

A madeira, devido à sua organização estrutural fixa pequenos volumes de ar e também porque a sua estrutura celular é maioritariamente constituída por celulose, trata-se de um mau condutor de calor, isto é, constitui um bom isolante térmico;

O isolamento acústico (constituição de um obstáculo à transmissão das ondas sonoras) oferecido pela madeira não é muito grande já que, sendo um material leve, desencadeia um pequeno enfraquecimento

do nível sonoro quando é utilizada em paredes exteriores ou divisórias; por outro lado, o emprego de madeira no revestimento de paredes melhora a distribuição das ondas sonoras pelo ambiente, tornando-se portanto num produto adequado à correcção acústica; como consequência disto, conclui-se que a madeira é um excelente material para absorção acústica;

Apesar de a madeira ser considerada um material inflamável, porque apresenta na constituição elementos como o carbono, verifica-se que para peças com espessuras razoáveis a combustão dá-se mais lentamente quando comparada com outros materiais; o fogo quando atinge a madeira destrói rapidamente a superfície, formando-se uma fina camada de carvão que tem um efeito retardador na propagação do oxigénio e das chamas que se vão direccionando para o interior das peças, reduzindo a velocidade do incêndio; a madeira mesmo a altas temperaturas conserva durante algum tempo uma secção residual que se mantém fria, mesmo a pequenas distâncias da zona em combustão, conservando as propriedades físicas; concluiu-se então que o fogo deteriora a madeira porque é capaz de diminuir a secção da peça estrutural e não porque afecta directamente as propriedades mecânicas;

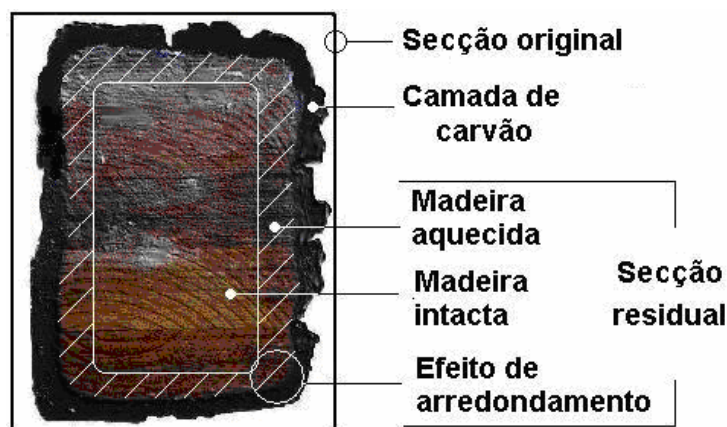


Fig.2.8 – Secção de uma viga de madeira exposta ao fogo durante 30 minutos

2.3.3.PROPRIEDADES MECÂNICAS

As propriedades mecânicas definem o comportamento da madeira quando submetida a esforços de natureza mecânica. Estas resultam directamente das propriedades anisotrópicas e da heterogeneidade do material lenhoso e o seu estudo revela interesse porque permite deduzir as condições de aplicabilidade de uma dada espécie de madeira para um determinado fim. A estrutura do lenho das árvores foi orientada durante o seu crescimento para responder a acções ambientais, como a acção do vento (semelhante a um esforço de flexão) e a acção gravítica (esforço de compressão).

Pretende-se caracterizar a madeira quanto às suas especificidades mecânicas em duas direcções, ou seja, uma vez que se trata de um material anisotrópico, é necessário conhecer as propriedades no sentido do fio e as propriedades no sentido perpendicular ao fio. No sentido do fio, isto é, segundo o eixo das fibras, a resistência da madeira é superior à capacidade resistente perpendicular ao fio.

2.3.3.1. Propriedades na direcção do fio

a) Resistência à compressão axial

A resistência à compressão axial refere-se à carga suportável por uma peça de madeira quando esta é aplicada na direcção paralela às fibras, como acontece nas colunas que sustentam um telhado.

Existem duas formas de avaliar a resistência à compressão axial de peças de madeira: pode ser calculada partindo de ensaios sobre peças curtas ou então submetendo-se peças longas a testes. No caso de peças curtas, estas devem estar isentas de defeitos (nós, fendas) e perfeitamente orientadas em relação às fibras fazendo com que uma dimensão esteja na direcção tangencial e outra na direcção radial. Nestes ensaios, os provetes são sujeitos a uma carga estática e contínua que conduzirá à sua rotura por separação das fibras longitudinais. Todo o processo encontra-se regulamentado pela norma EN 408 [12], no ponto 17. A tensão para a carga de colapso designa-se por tensão de rotura ou tensão limite de resistência.

Quando está esforçada por compressão simples, a madeira comporta-se como um material elástico, até valores de tensões que não excedam 75% do valor limite de rotura.

Um facto a assinalar consiste na menor resistência apresentada pelas peças de madeira quando são sujeitas a esforços de compressão, comparando com a situação em que se encontram submetidas a cargas que provocam tracções.

A massa volúmica é um dos factores que interfere na resistência à compressão axial da madeira, comprovando-se que existe uma relação sensivelmente linear entre as duas grandezas: quanto maior for o valor da massa volúmica, maior será também o valor da resistência à compressão (para peças isentas de defeitos).

Conforme já foi referido, a humidade exerce alguma influência nas características resistentes da madeira, nomeadamente no comportamento resistente face à compressão axial. Com isto, o valor máximo verificado para a resistência à compressão dá-se quando a madeira se encontra seca, isto é, no estado anidro, enquanto o valor mínimo é atingido quando a peça ultrapassa o ponto de saturação das fibras (normalmente superior a 30% do teor de água).

Os defeitos também condicionam, ainda que ligeiramente, os valores da resistência da madeira a esforços de compressão na direcção das fibras.

b) Resistência à tracção axial

A tracção simples normalmente não constitui uma ameaça séria para as peças estruturais de madeira uma vez que a sua estrutura está devidamente orientada para resistir a este tipo de esforços. Na tracção paralela às fibras, as contracções aproximam as fibras fortalecendo a sua coesão e aderência o que motiva a aplicação de maiores cargas, geralmente três vezes superiores às cargas presentes na compressão axial, para se dar a rotura do material. Por isto, a quebra das peças da madeira só ocorrerá quando a tracção axial estiver combinada com efeitos secundários que reduzam a secção resistente.

Os provetes a ensaiar para a avaliação da resistência à tracção não podem ser idênticos aos que se usam para determinar a capacidade resistente à compressão de peças de madeira. Os provetes utilizados têm de estar providos de cabeças para facilitar a fixação das garras da máquina.



Fig.2.9 – Provetes destinados aos ensaios de tracção axial (UTAD, 1988)

c) Resistência à flexão estática

A madeira apresenta uma resistência elevada a este tipo de esforço, alcançando valores próximos dos obtidos para a resistência à tracção axial. A apreciação desta característica passa pela realização de ensaios regulados pela norma EN 408 [12], particularmente no ponto 13, submetendo os provetes a uma carga central aumentada progressivamente, aplicada tangencialmente aos anéis de crescimento, até provocar a rotura.

Os esforços de flexão despertam nas peças de madeira dois tipos de comportamento: no intradorso surgem esforços de compressão e na zona de extradorso as fibras são traccionadas. Isto leva a que ocorra na zona comprimida uma pré-rotura localizada, caso o limite de resistência à compressão seja ultrapassado. No fim, as peças rompem por rotura e estilhaçamento das fibras de extradorso quando a tensão resistente máxima à tracção é ultrapassada.

Importa aqui salientar uma grandeza muito importante pela utilidade do seu conhecimento para o cálculo de estruturas e classificação de elementos estruturais: o módulo de elasticidade. É um parâmetro mecânico que proporciona uma medida de rigidez, ou seja, é uma medida de resistência à deformação elástica.

Embora o módulo de elasticidade não proporcione conclusões absolutas sobre o comportamento da madeira, pode-se dizer que quando se constatarem valores altos do módulo de elasticidade, a madeira apresenta alta resistência e baixa capacidade de deformação.

d) Resistência à flexão dinâmica

A flexão dinâmica pode ser utilizada para testar a capacidade resistente que uma dada peça acusa ao choque. A resistência ao choque é influenciada por alguns factores como a forma e dimensões das peças, a massa volúmica, o teor de água e as propriedades anatómicas da madeira.

Os ensaios que têm por finalidade a determinação da resistência da madeira a esforços dinâmicos em flexão são normalizados pelo documento NP 620 [16]. Consistem em ensaios rápidos nos quais os provetes são submetidos a um choque a meio vão, medindo-se o trabalho total realizado para provocar a rotura. A partir do valor desse trabalho e analisando também a superfície de rotura, pode-se concluir a respeito da aptidão da madeira para sustentar solicitações de choque.

A resiliência, medida da quantidade de energia absorvida quando a peça é flectida, constitui um parâmetro a ter em conta neste âmbito já que representa a fragilidade, característica importante para classificar as madeiras quanto à qualidade da sua resposta face a solicitações dinâmicas (Carvalho, 1996).

A partir dos ensaios de provetes, é possível retirar algumas ideias a respeito da resiliência da madeira aos esforços de flexão dinâmica (UTAD, 1988):

1. É independente da humidade;
2. É máxima quando a carga é aplicada na direcção radial;
3. É proporcional à secção das peças e praticamente independente da extensão do vão.

2.3.3.2. Propriedades na direcção perpendicular ao fio

a) Resistência à tracção perpendicular às fibras

O material lenhoso opõe-se a solicitações de tracção normal exibindo apenas a aderência entre fibras como parcela resistente. Além disto, como a aderência é muito fraca, os esforços produzidos na peça são limitados o que leva à ocorrência de deslocamentos das fibras para tracções de reduzida grandeza.

Nos ensaios de tracção normal, regidos pela EN 408 [12] no seu ponto 18, são determinadas duas grandezas: a tensão de rotura (quociente da força de rotura pelo área da secção de rotura do provete) e

a cota de aderência que se define como o quociente da tensão de rotura pela massa específica da madeira do provete.

Por último é de referir que, ao contrário do que se passa noutras propriedades mecânicas, a resistência à tracção perpendicular às fibras não varia com a massa volúmica, uma vez que esta não interfere na aderência entre fibras. É importante na definição das ligações entre elementos de madeira numa construção.

É aconselhado que, em situações práticas, se evite a criação de esforços deste tipo, pois podem originar o colapso das estruturas de madeira quando solicitadas por esforços de tracção de pequena importância.

b) Resistência ao fendimento

A forma de estimar a resistência ao fendimento de uma peça de madeira é solicitá-la à tracção normal numa dada secção, ou seja, aplicar esforços de tracção excêntricos provocando um deslocamento entre fibras, o que traduz a resistência ao rasgamento da madeira.

Experimentalmente, o efeito é avaliado através de ensaios em provetes, com procedimento sistematizado na norma NP 622 [17], onde a acção é aplicada num bordo. Determina-se a carga de rotura e, com base nos resultados obtidos, caracterizam-se as madeiras suportadas pelo grau de fissilidade, isto é, de acordo com a tendência para serem rasgadas.

À semelhança do que se passa com a tracção perpendicular às fibras, o fendimento em estruturas de madeira deve ser evitado. Nas situações em que tal se torne impossível é conveniente aplicar técnicas com capacidade de atenuação dos seus efeitos como são os casos da perfuração prévia, da colagem de peças ou o emprego correcto de ligações e outras singularidades das estruturas.

c) Resistência ao corte

Uma peça está sujeita ao corte quando sobre ela actuam duas forças em sentido contrário, que tendem a separar a peça em duas partes. As tensões desencadeadas pelas forças referidas podem surgir nas peças de madeira sobre três formas diferentes: tensões normais, tensões oblíquas e tensões paralelas às fibras.

A madeira resiste muito melhor a um esforço de corte perpendicular às fibras do que paralelo a estas. Apesar disto, o tipo de escorregamento mais frequente na prática (verifica-se em vigas compridas junto aos apoios) é o que ocorre segundo a direcção paralela às fibras e por isso os ensaios que avaliam a capacidade resistente da madeira ao corte devem ser executados nesta direcção. A norma EN 408 [12], no seu ponto 20, rege os ensaios referidos para determinação da resistência ao corte de provetes de madeira.

As outras formas de escorregamento não condicionam tanto as peças de madeira mas convém mencionar algumas considerações: as tensões oblíquas emergem, com inclinação diferente de 45° devido ao carácter heterogéneo da madeira, quando se comprimem peças curtas e o corte normal às fibras praticamente não ocorre devido à rotura por esmagamento das fibras que sustentam a carga.

d) Resistência à compressão normal às fibras

A compressão transversal é uma característica mecânica importante em estruturas de madeira. Os esforços de compressão normal podem provocar esmagamento na madeira, se esta estiver exposta a cargas sucessivamente crescentes ou então induzir fendas quando a acção é constante.

A madeira exhibe geralmente uma baixa capacidade resistente aos esforços de compressão transversal, dependente da extensão da área abrangida pela carga e da sua disposição ao longo da peça.

2.3.4. Dureza

A dureza é uma propriedade físico-mecânica e como tal não se enquadra em nenhuma das subdivisões anteriores, sendo por este motivo que se encontra num ponto distinto.

Trata-se de uma característica com importância especial porque representa a resistência do material à penetração e à riscagem e também constitui uma medida do seu comportamento ao desgaste. Expressa a resistência da madeira a deformações permanentes e está directamente relacionada com a força de ligação dos elementos da microestrutura do material lenhoso, dando uma ideia do grau de dificuldade em “trabalhar” a madeira, isto é, a quantidade de trabalho que é necessário realizar para adaptar as peças à forma que se pretende. A norma NP 617 [14] destina-se a fixar o processo de determinar a dureza de um provete de madeira. Para calcular os resultados do ensaio da norma referida é necessário também encontrar a massa volúmica de referência, de acordo com a NP 616 [13].

2.4. DEFEITOS DAS MADEIRAS

2.4.1. ASPECTOS GERAIS

Entende-se por defeitos na madeira qualquer irregularidade na sua constituição que comprometa a resposta físico-mecânica às diversas solicitações. A presença de defeitos afecta a qualidade dos elementos e conduz a uma redução da sua capacidade resistente. Estas anomalias têm origem natural ou podem resultar de procedimentos inadequados que se verificam nas fases de abate, de extracção e de transporte, provocando a conseqüente depreciação das peças de madeira.

A normalização dos defeitos e a minuciosa definição da sua terminologia constitui um ponto importante para a elaboração e fundamentação de métodos de classificação de madeiras, devido à relevância comprovada nas propriedades físicas e mecânicas como se procurou demonstrar no parágrafo anterior. Com efeito, a identificação dos defeitos e das suas particularidades constitui a base para a composição de especificações de qualidade das madeiras, para efeitos de utilização, controlo de qualidade e classificação (UTAD, 1988).

A diversidade dos defeitos é muito grande, mas aqueles que aparecem com mais frequência nas peças de madeira e que influem nas suas propriedades mecânicas são:

- Nós;
- Fendas;
- Empenos;
- Descaio;
- Taxa de crescimento;
- Ataques de insectos e fungos (apodrecimento; bolores)
- Bolsas de resina;
- Medula e casca inclusa;
- Inclinação do fio;
- Lenho de reacção e madeira juvenil.

Estes e outros defeitos podem ser associados em grupos que se distinguem uns dos outros na causa da sua ocorrência e designam-se por:

- Defeitos de crescimento;
- Defeitos de secagem;
- Defeitos de exploração;
- Defeitos de alteração.

Nos subcapítulos seguintes encontram-se expostas as principais características de cada tipo de defeito.

2.4.2. DEFEITOS DE CRESCIMENTO

Este grupo reúne os defeitos provocados por transformações na estrutura fibrosa da madeira (devidas a fenómenos biológicos de crescimento ou a agentes externos), isto é, produzidos durante a formação do lenho (durante a vida da árvore). Anomalias como nós, bolsas de resina, desvio de inclinação do fio, casca inclusa ou lenho de reacção enquadram-se nesta categoria de defeitos.

2.4.2.1. Nós

É o defeito com maior importância nas madeiras porque pode originar danos económico-estruturais cuja magnitude depende do tipo, dimensões e localização na peça acrescentando também o efeito da solicitação. Estão relacionados com o desenvolvimento da composição do lenho, são oriundos da parcela da base de um ramo inserido no tronco da árvore e afectam a resistência mecânica da madeira porque são constituídos por fibras com orientação aproximadamente ortogonal às fibras do lenho.

Os nós podem assumir a designação de vivos quando estão em continuidade com o material lenhoso da envoltória ou então designam-se “nós mortos” quando se encontram desligados do restante tecido. Por outro lado, podem ser alterados ou não alterados caso exibam ou não alterações e ainda são classificados em “podres” ou “sãos” no caso de demonstrarem respectivamente, sinais de apodrecimento ou não.



Fig.2.10 – Nós em vigas de madeira serrada de Carvalhal

Ao nível da interferência que este tipo de defeitos têm na capacidade resistente, eles exercem uma influência assinalável nos esforços de tracção marcadamente oblíquos (motivada também pela reduzida resistência que o material lenhoso apresenta a estas solicitações) enquanto na flexão estática deve-se procurar que os nós se situem na zona comprimida da peça para minimizar a sua importância. Por outro lado, a sua presença não influi negativamente na resistência ao corte, incrementando-a até nos casos em que motivam a descontinuidade das fendas.

2.4.2.2. Desvio da inclinação do fio

Este defeito traduz-se numa inclinação das fibras relativamente ao eixo longitudinal das peças que pode ter sido originada no momento da serração ou derivar da inclinação natural das árvores associadas aos ventos dominantes. O desvio da inclinação do fio assume uma importância particular já que salienta a anisotropia própria da madeira, o que é importante na selecção da madeira para sistemas estruturais e, além de modificar as características resistentes, também influencia o aparecimento de empenos e fendimentos.

O desvio da inclinação do fio interfere de uma forma variável na resistência que as peças de madeira evidenciam às diferentes solicitações: o seu efeito é praticamente desprezável no caso de elementos sujeitos à flexão ou à tracção e em solicitações que provocam compressões a influência pode ser mais significativa.

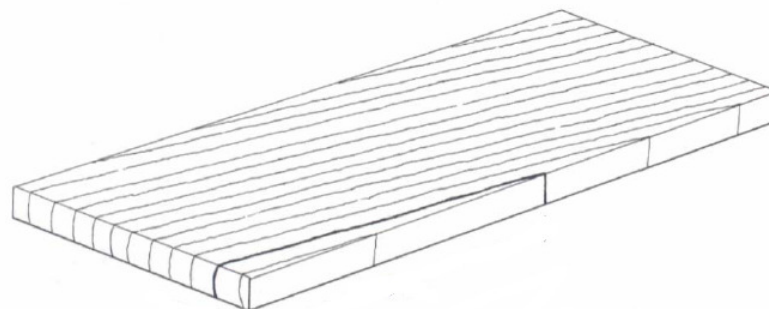


Fig.2.11 – Representação de uma peça de madeira onde é visível a inclinação do fio

2.4.2.3. Lenho de reacção

Dizem respeito a deslocamentos na direcção natural de crescimento do tronco de árvores e podem ser originados por acções ambientais, nomeadamente a acção dinâmica do vento ou a iluminação desigual (gerando copas assimétricas). O lenho de reacção abrange duas classes que se designam por lenho de compressão e lenho de tracção, caso ocorram em resinosas ou em folhosas.

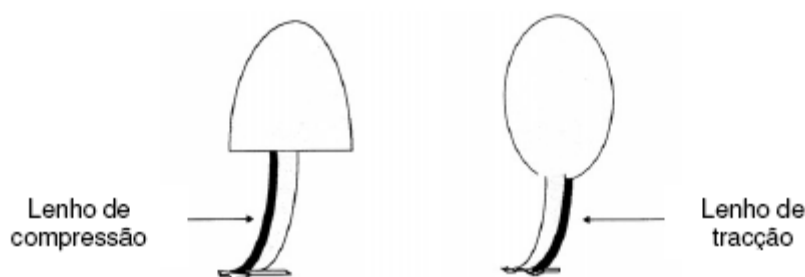


Fig.2.12 – Representação da posição dos lenhos de compressão e de tracção no tronco das árvores (Moreschi, 2005)

A presença deste tipo de defeitos em peças de madeira destinadas a estruturas conduz, em geral, à sua rejeição porque afectam as propriedades tecnológicas, provocando um comportamento desigual da madeira e aumentando a susceptibilidade à ocorrência de fissuras no caso do lenho de compressão ou dificultando a trabalhabilidade e causando a depreciação do material associada à diferente coloração quando se trata do lenho de tracção.

2.4.2.4. Outros defeitos de crescimento

Referem-se aqui outros dois tipos de defeitos de crescimento que também demonstram importância e ocorrem com alguma frequência: as Bolsas de Resina e a Casca inclusa.

As Bolsas de Resina podem ser definidas como cavidades que contêm resina, no estado líquido ou sólido, que prejudicam as propriedades mecânicas da madeira assim como também afectam o aspecto da sua superfície. Este defeito sucede apenas nas Resinosas apesar de ocorrerem anomalias semelhantes nas Folhosas, denominadas por Bolsas de Goma.

A origem da Casca inclusa está num crescimento irregular do fuste da árvore (devido a perda de zonas do câmbio), exteriorizando-se numa parte de casca interposta no material do lenho. Esta situação fomenta o apodrecimento da madeira.

2.4.3. DEFEITOS DE SECAGEM

São a consequência directa da retractilidade da madeira quando perde humidade, evidenciada durante a secagem do lenho. Têm um carácter incontrolável, mas podem ser evitados com procedimentos cuidados de controlo dos processos de secagem.

Este comportamento natural constitui uma causa de problemas quando a madeira entra num ciclo de secagem, já que resultam algumas fendas ou estalos provocados essencialmente pelo estabelecimento de um gradiente de humidade na peça: a parte mais externa, que se encontra seca, quer retrair e a parte interna procura expandir, forçando a parte externa, ou seja, o exterior seca mais rapidamente que o interior criando tensões devidas a secagem não uniforme. Outro problema associado à secagem é o empenamento. Trata-se de num desvio na forma esperada para a peça de madeira devido à retracção diferenciada de diferentes partes da sua estrutura nas diferentes direcções.

2.4.3.1 Fendas

São defeitos habituais em peças de madeira motivados por tensões que ocorrem devido à diferença entre a retracção do tecido lenhoso das zonas interiores face à retracção verificada nas zonas exteriores, suscitando esforços de tracção transversal capazes de abrir a madeira segundo planos radiais e assim reduzir a secção resistente (figura 2.13).

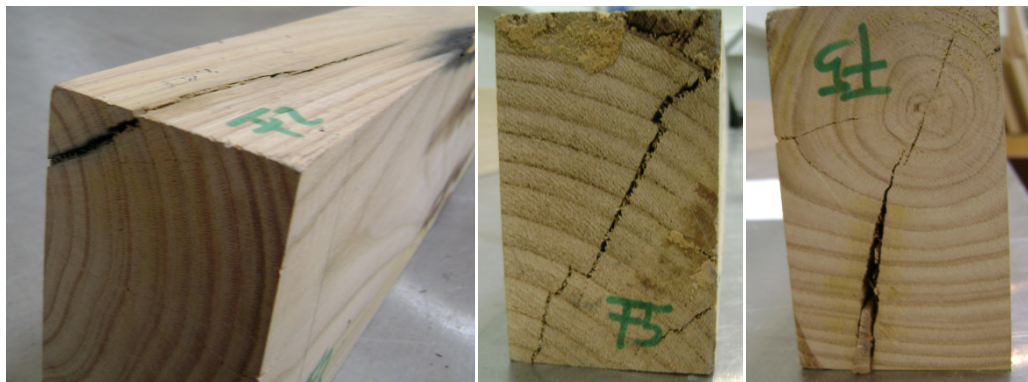


Fig.2.13 – Fendas visíveis em vigas de madeira serrada de Carvalho

Na tracção axial, em peças sem desvio ou torção de fibras, o efeito negativo que as fendas induzem na capacidade resistente é praticamente nulo porque se orientam na direcção do eixo. Por outro lado, quando as peças são submetidas a esforços de compressão axial, a presença de fendas é indesejável por conseguirem afastar as fibras assim como também se torna muito grave quando se encontram localizadas em zonas de ligação entre peças. Nos elementos sujeitos a flexão, o posicionamento das fendas face ao plano neutro é preponderante para determinar a sua influência sobre a capacidade resistente.

2.4.4. DEFEITOS DE EXPLORAÇÃO E ALTERAÇÃO

Basicamente, os defeitos de exploração são o resultado de maus procedimentos realizados nas fases de colheita e transporte, constituindo grandes limitações quanto à possível utilização nos diferentes sectores e para os mais variados fins. Os defeitos que se encontram reunidos nesta categoria, como por exemplo as fracturas, podem ser evitados se forem adoptados métodos de trabalho racionais (ferramentas e máquinas adequadas) em cada uma das fases da exploração. O efeito nefasto na capacidade resistente merece considerações idênticas às referidas para os defeitos de crescimento e também para os defeitos de secagem.

Quanto aos defeitos de alteração, pode-se afirmar que são a consequência de ataques de agentes bióticos como fungos ou insectos. O ataque biótico constitui uma das degradações mais comuns e é capaz de causar danos graves em estruturas de madeira, reduzindo a sua resistência ou ampliando o efeito de outros defeitos. No ponto seguinte apresentam-se com mais detalhe os diversos agentes bióticos e as principais patologias associadas à sua actividade nas madeiras.

2.5. DEGRADAÇÃO DAS PEÇAS ESTRUTURAIS DE MADEIRA

2.5.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo encontram-se expostos os principais problemas que afectam as peças de madeira e as suas consequências tanto no aspecto visual como na resistência natural da matéria-prima. A madeira não se apresenta viva pois resulta da morte de um ser vegetal. Ela está sujeita à próxima etapa da sequência natural de qualquer ser vivo: a deterioração e decomposição. Os agentes físicos, químicos e biológicos, actuando em conjunto ou separadamente na madeira, aceleram o envelhecimento dos elementos e por isto a sua apresentação é relevante pois, nesta dissertação, procura-se estudar o comportamento de madeira estrutural antiga.

2.5.2. AGENTES BIÓTICOS E PATOLOGIAS ASSOCIADAS

A madeira, sendo um material de origem orgânica, encontra-se exposta ao ataque de organismos vivos que dela precisam para se alimentarem e sobreviverem. Dentro destes organismos destacam-se, pela sua nocividade e porque aparecem muitas vezes associados às peças de madeira, os fungos, as bactérias, os insectos e ainda os moluscos e crustáceos. Os agentes bióticos referidos encontram-se alinhados por ordem de malignidade, isto é, os fungos são responsáveis (indirectamente) por piores degradações quando comparadas com as consequências dos ataques de moluscos ou crustáceos.

Os **fungos** produzem substâncias fibrosas que acedem ao interior da madeira, através de fissuras, degradando-a. Estes agentes actuam de uma forma faseada, começando a sua actuação com o aparecimento de manchas e terminando com decomposições e apodrecimentos.

De entre os fungos que atacam a madeira salientam-se os cromogéneos e os fungos de podridão. Quanto aos cromogéneos, apesar de não alterarem a constituição do lenho, são factores desvalorizadores dos elementos de madeira pois causam manchas superficiais, como é o caso das manchas azuladas evidenciadas a baixas temperaturas.

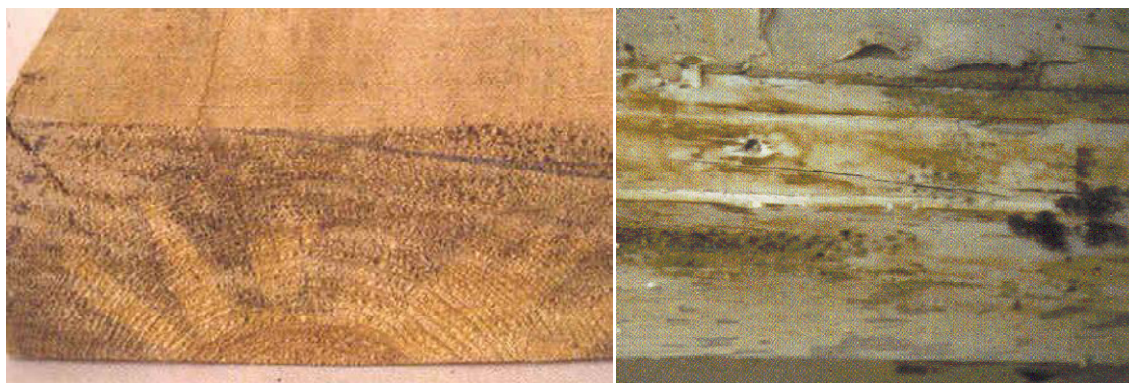


Fig.2.14 – À esquerda degradação por fungos cromogêneos. À direita degradação provocada por bolores (Arriaga, 2002)

O resultado do ataque dos fungos xilófagos pode ser dividido em três tipos de podridão: podridão castanha, podridão branca e podridão branda. A podridão castanha conduz à fractura dos elementos em formas cúbicas cujas diferentes dimensões variam com o tipo de madeira e as condições do ambiente onde se encontram. A podridão branca acarreta uma aparência fibrosa e uma coloração ligeiramente mais clara. Neste tipo de podridão não existe a fractura cúbica evidenciada nas podridões castanhas e é mais comum nas Folhosas porque possuem maior quantidade de lenhina. Por último a podridão branda decompõe a celulose das paredes das células secundárias, evidenciando uma coloração esbranquiçada e aspecto esponjoso.



Fig.2.15 – À esquerda é visível a podridão castanha; ao centro a podridão branca ou fibrosa; à direita podridão branda

Convém referir que é necessária a presença de água para se iniciar e alimentar todos os tipos de podridão e o seu desenvolvimento é fomentado com graus de humidade compreendidos entre 35 e 60% (em ambiente ácido). O controlo destes parâmetros constitui uma exigência básica para evitar o aparecimento e minimizar os efeitos da podridão.

Os **insectos xilófagos** são os agentes bióticos mais frequentes nas madeiras de edificação, invadindo-a com o duplo propósito de se alimentarem e de se abrigarem. Estes atacam a madeira na sua fase de larva, durante o seu desenvolvimento e crescimento, alimentando-se do material lenhoso. Quando chegam à idade adulta perfuram a madeira, através da construção de extensas galerias, reduzindo drasticamente a secção resistente dos elementos e beneficiando da instalação de humidade na peça (fulcral para o aparecimento de fungos). Destacam-se de seguida as principais espécies de xilófagos:

- Térmita comum: trata-se de uma térmita subterrânea que necessita de humidade superior a 85% e de temperaturas entre 25 e 35°. São capazes de atacar todo o tipo de madeiras, degradando-as no sentido das fibras e deixando pequenas lâminas entre as galerias criadas (as galerias são bem mais interiores do que as realizadas pelos carunchos). A base do seu sustento é a celulose e encontram condições favoráveis para a sua reprodução nas madeiras brancas.



Fig.2.16 – Térmitas associadas ao ataque provocado

- Carunchos, carcomas ou besouros: actuam preferencialmente sobre madeiras verdes ou madeiras sob secagem (condição importante para o depósito dos ovos). A degradação mecânica causada por carunchos é elevada, realizando galerias no interior do borne. Normalmente o seu ataque é descoberto muito tarde, pois só se revelam quando realizam pequenos orifícios ao abandonarem as peças de madeira, mas a produção de serrim constitui uma forma útil para a detecção da degradação a tempo de intervir.



Fig.2.17 – Caruncho associado ao ataque provocado

Os **moluscos** são animais predominantemente marinhos, embora existam espécies de água doce e terrestre. São capazes de afectar tanto o borne como o cerne da madeira de resinosas e folhosas presentes nos portos.

Por outro lado, os **crustáceos** são animais invertebrados que também habitam preferencialmente no mar. Com isto torna-se claro que estes agentes encontram boas condições para a sua actuação nas águas dos litorais marítimos, degradando o interior (moluscos) e o exterior da madeira (crustáceos). Os factores que têm maior influência no seu desenvolvimento são o teor em oxigénio, a temperatura e a salinidade da água. As patologias associadas a estes agentes podem-se sintetizar em galerias de dimensões quase insignificantes e pouco profundas em peças de madeiras imersas.

2.5.3. AGENTES ABIÓTICOS E PATOLOGIAS ASSOCIADAS

Os agentes abióticos englobam as condições atmosféricas, os produtos químicos e a acção do fogo como os principais mecanismos de degradação não biológica da madeira. Dentro das **condições atmosféricas** destaca-se a luz solar, o vento, a chuva e a respectiva alternância de ciclos de secagem e humedificação por possuírem um importante papel na degradação, seja esta de natureza física, química, mecânica ou biológica. A incidência da radiação solar provoca a degradação da superfície da madeira devido essencialmente aos raios ultravioleta, que modificam a coloração superficial, originalmente amarelada, para uma tonalidade acinzentada (a decomposição da lenhina afecta apenas uma camada com 0,5 mm de espessura).

A acção da luz junto com a água e a temperatura contribui para a modificação da cor e da textura da madeira mas não transformam as propriedades químicas do elemento. Normalmente, a madeira possui um comportamento razoável a estes agentes de degradação, mas deve ser tratada para suportar a acção do agente mais nocivo, a água, capaz de acelerar o processo de alteração da coloração superficial através do escurimento e consequente lavagem da superfície.

O efeito mais significativo dos **produtos químicos** sobre a madeira é a alteração de coloração nas peças hostilizadas, conferindo-lhes uma cor negra ou negra azulada. A consequência directa da acção dos produtos químicos está relacionada com a exposição a ambiente ácido ou alcalino: face a um ambiente ácido as ligações de carbono são destruídas, deixando a madeira com um aspecto fibroso (idêntico ao efeito da podridão branca) enquanto face a um ambiente alcalino, a lenhina e as hemiceluloses são decompostas, conduzindo a uma perda de consistência e resistência.



Fig.2.18 – Degradação provocada por agentes abióticos: à esquerda acção da chuva; à direita acção da radiação solar

A maioria das madeiras apresenta constituição química fundamental de matriz ácida, já que possuem na sua constituição ácidos livres, sendo o ácido acético exemplo disto mesmo. Com isto, a acidez não é um motivo de preocupação para as peças de madeira, excepto quanto se encontram húmidas ou estão sujeitas a ciclos de humedificação e secagem responsáveis pela produção de ácido por hidrólise.

Durante o século XX, os erros cometidos na concepção e utilização das estruturas de madeira constituíram as principais origens para as patologias observadas, favorecendo também o seu envelhecimento precoce.

As condições de carga a que a estrutura está sujeita também constitui um factor que interfere e no comportamento das madeiras em serviço e constitui o principal factor que influencia a degradação por fadiga e a fluência excessiva das peças.

3

PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA ESTRUTURAL

3.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Ao longo deste Capítulo três expõe-se metodologias e procedimentos que procuram contribuir para a utilização mais segura da madeira enquanto elemento estrutural. A exposição destes métodos de classificação e controlo encontra-se dividida segundo a área de intervenção de cada um deles, quer se apliquem a madeira nova (ainda antes de ser constituída como elemento estrutural) ou a nova antiga (presente em sistemas estruturais).

Os elementos de madeira, na sequência do referido no capítulo anterior, ostentam uma enorme variabilidade nas suas propriedades mecânicas estimulada por factores como os defeitos (desvio do fio da madeira em relação ao eixo da peça, empenos, fendas, número e localização de nós) e o carácter natural que está na sua origem. A aplicação destes elementos de madeira em sistemas estruturais, dotados de níveis mínimos de fiabilidade e segurança exigíveis, acompanhada da necessidade de se conhecer o seu comportamento às diferentes solicitações, exigem a definição de um processo de controlo de qualidade capaz de materializar uma divisão que auxilie os projectistas nas especificações de projecto (além de tornar a relação preço – qualidade mais transparente).

3.2. PROPRIEDADES DA MADEIRA NOVA

Para que a madeira possa ser usada como material estrutural é forçoso que se cumpra um procedimento usualmente designado por **classificação de madeiras**, que possibilita a definição das propriedades físicas e mecânicas das peças classificadas constituindo assim um meio para disciplinar o seu uso e comercialização.

3.2.1. CLASSES DE QUALIDADE

A classificação de madeiras em classes de qualidade é feita, na Europa, com base em quatro normas da série EN 14081 que se encontram enumeradas de seguida. Os dois métodos de classificação de madeira para utilização em estruturas, classificação visual e por máquina, encontram-se definidos em linhas gerais nestas normas:

- EN 14081.1 – Timber Structures – Strength graded structural timber with rectangular cross section – Part 1 - General requirements [7];
- EN 14081.2 – Timber Structures – Strength graded structural timber with rectangular cross section – Part 2 – Machine grading: additional requirements for initial type testing [8];

- EN 14081.3 – Timber Structures – Strength graded structural timber with rectangular cross section – Part 3 – Machine grading: additional requirements for factory production control [9];
- EN 14081.4 – Timber Structures – Strength graded structural timber with rectangular cross section – Part 4 – Machine grading: grading machine settings for machine controlled systems [10].

A atribuição de classes de qualidade permite a estimação das propriedades estruturais pela relação com indicadores de controlo sem necessitar de romper as peças e envolve dois métodos possíveis a **classificação visual** e a **classificação por máquina**.

3.2.1.1. Classificação visual

A classificação visual tem por base a identificação na madeira (por observação) de elementos que diminuam a sua resistência mecânica, como é o caso de defeitos associados à sua composição macroscópica e microscópica (nós, inclinação do fio, casca inclusa, bolsas de resina), de imperfeições geométricas (descaio) e de alterações motivadas por vários factores externos (empenos, fendas, ataque biológico), limitando-os de acordo com os valores fixados numa norma de classificação visual. Parte da normalização existente fundamenta-se em campanhas experimentais exaustivas, capazes de caracterizar a realidade das espécies estudadas, envolvendo informação relativa à essência da madeira e à sua origem geográfica.

O método baseia-se, em parte, na capacidade de avaliação do operador, sendo de extrema importância a sua competência na definição e caracterização de particularidades que afectam a resistência e a rigidez da madeira. Para além disto, a análise não é susceptível à presença de defeitos internos, o que pode influenciar muito a qualidade do processo.

Assim, este método de atribuição de classes de qualidade manifesta benefícios e alguns inconvenientes na sua utilização que importa particularizar:

- Trata-se de uma técnica simples, de fácil compreensão e pode ser muito rápida se for bem aplicada;
- Subestima a capacidade resistente da madeira, o que é uma garantia de segurança para o utilizador; por outro lado, pode ser encarada pelo produtor como uma perda de rentabilidade que se poderia evitar;
- Não exige a utilização de equipamentos caros e robustos;
- A confirmação dos resultados pode ser realizada em qualquer altura;
- A utilização deste método exige uma preparação antecipada do operador;
- Implica uma inspecção visual realizada individualmente, isto é, a operação tem de ser feita peça a peça e com relativa rapidez;
- Implica falta de objectividade e de algum rigor já que, como se disse, depende da capacidade de avaliação do operador.

Por toda a Europa existem várias normas referentes à classificação visual de madeiras sendo cada uma aplicável a um número restrito de espécies, descrevendo as classes de qualidade de acordo com limites para os defeitos anteriormente expostos. As normas citadas dizem respeito a madeira maciça retirada do tronco da árvore sem sofrer qualquer tipo de alteração (nomeadamente colagens), constituindo vigas ou pranchas.

Como a variabilidade na normalização é grande acrescida também pela grande variabilidade nas espécies, a definição de uma norma geral e completa para o uso corrente na Europa revela-se uma tarefa complexa. Por este motivo, a EN 14081.1 [7] expõe apenas bases comuns às normas nacionais,

ou seja, as normas referentes à classificação visual podem ser aplicadas nos respectivos países desde que atendam aos requisitos gerais, estipulados na EN 14081. De seguida expõe-se alguns exemplos de normas de classificação visual aplicadas em países europeus:

- DIN 4074.1, norma alemã, aplicável a madeiras de pinho, espruce, abeto e cipreste [19];
- INSTA 142, norma nórdica, aplicável às mesmas espécies referidas para a norma alemã [20];
- UNE 56544, norma espanhola, aplicável às espécies de pinho espanhol [21];
- NF52-001, norma francesa, aplicável à madeira de carvalho [23];
- NP4305, norma portuguesa, aplicável à madeira de pinho bravo português [18];

Todas as normas apresentadas anteriormente contam com algumas particularidades em função das populações de madeiras a que se referem, contemplando aspectos como a origem geográfica, qualidade geral do material disponível no mercado, influência histórica (ou tradição dos mercados) e a espécie tratada na norma. Outra consequência da multiplicidade de normas relativas à classificação visual reside no facto de se constatar que cada uma delas apresenta um número variável de classes de qualidade. O quadro 3.1 regista alguns exemplos do que se acaba de referir.

Quadro 3.1 – Normas de classificação visual e classes de qualidade (Arriaga, 2003)

Normas de Classificação visual	Classes de Qualidade
Alemanha: DIN 4074 Parte I (2001)	S13, S10, S7
Espanha: UNE 56544 (2003)	ME-1, ME-2
França: NF B52-001 (1998)	ST-I, ST-II, ST-III
Países Nórdicos: INSTA (1997)	T3, T2, T1, T0
Portugal: NP 4305 (1995)	EE, E

Na parte da EN 14081.1 [7] alusiva à classificação visual encontram-se estabelecidos os critérios de desempenho e as limitações para diferentes características, como características que reduzem a resistência (nós, desvio do fio, fendas, casca inclusa, danos mecânicos, danos não aparentes no cerne, etc.), características geométricas (empenos, descaio) e características biológicas (limitações para danos causados por insectos ou fungos). Cada país, com a sua normalização específica para a classificação visual, pode engrossar o número e tipo de critérios, estabelecendo valores mínimos a exigir às madeiras com vista a atribuir-lhes classes de qualidade.

As normas nacionais mencionadas estão complementadas por normas europeias destinadas à classificação de madeira serrada, como são os casos da EN 975-1 [2] de 1995 e da EN 975-2 [3], ambas para folhosas (Carvalho, Faia e Choupo) ou ainda da norma EN 1611-1 [5] para resinosas (Espruce, Abeto, Pinho e Pseudotsuga).

Em jeito de conclusão, a classificação visual da madeira em classes de qualidade permite a organização das diferentes peças de acordo com as suas especificidades. A metodologia seguida garante uma classificação rápida, já que não é necessário o manuseamento de dispositivos complexos, mas incorpora um certo grau de subjectividade na avaliação porque depende da experiência e dos antecedentes do operador humano. Além disso, não permite avaliar os defeitos e problemas eventualmente existentes no interior das peças o que pode constituir um risco importante.

3.2.1.2. Classificação por máquina

A classificação por máquina implica a utilização de instrumentação que, baseada num processo não destrutivo (foi desenvolvida com o propósito de não incapacitar as peças submetidas aos ensaios), determina uma ou mais propriedades (habitualmente o módulo de elasticidade) dos elementos de madeira. Neste sentido, a máquina equipada com o respectivo sensor, classifica a madeira em grupos (classes) envolvendo valores de densidade, de rigidez e de resistência. Apesar de ser um método capaz de fornecer informações concretas a respeito da capacidade resistente de peças de madeira exige o acompanhamento de uma verificação visual (sem grande minúcia) para comprovar a existência de defeitos indetectáveis pela máquina.

O uso deste tipo de classificação tornou-se comum em países onde o emprego da madeira como material estrutural é frequente, como é o caso dos EUA, Norte e Centro da Europa, Japão, Canadá e Austrália.

Esta forma de classificação subdivide-se em dois tipos que se distinguem no modo como se controla o processo: classificação controlada pelo produto (*output controlled*) ou controlada pela máquina (*machine controlled*).

O sistema de classificação que baseia as suas definições no controle pela máquina, foi desenvolvido na Europa quase há 40 anos atrás, e desde então vários métodos têm sido utilizados. Fundamentalmente este sistema apoia-se na avaliação permanente de uma propriedade mecânica condicionante, sem a necessidade de proceder diariamente a procedimentos complementares de controlo por meios destrutivos. O módulo de elasticidade na direcção do fio é a propriedade mecânica que se determina usualmente, impondo assim deformações máximas, para cada classe, às peças, com o objectivo de serem classificadas.

O sistema exige um esforço contínuo de investigação que permita a calibração das máquinas para uma perfeita classificação das peças. Todas as máquinas do mesmo tipo são programadas para serem idênticas e qualquer combinação nas definições de classificação é aplicável a todas desse tipo e com o mesmo campo de aplicação. As definições têm de ser obtidas através de ensaios iniciais exigentes, uma vez que implicam uma avaliação baseada num estudo experimental intenso para cada tipo de máquina. Este depende de operadores e do seu nível de conhecimento no âmbito da classificação visual porque, como já se disse, é necessário assegurar que as peças estejam isentas de defeitos excessivos ou críticos. Com isto, durante todo o processo, as fases que requerem mais esforço são as iniciais, ou seja, as fases de amostragem e aprovação (ver Figura 3.1).

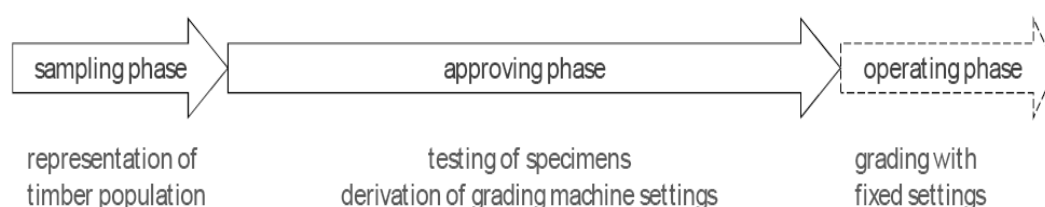


Figura 3.1 – Diferentes fases do procedimento de classificação controlado pela máquina (Sandomeer e Jochen, 2007)

O **sistema controlado pelo produto** difere do anterior na medida em que o controlo é realizado diariamente, através de ensaios regulados pelo EN 408, sobre peças escolhidas aleatoriamente. Neste

sentido, um número limitado de exemplares de cada espécie, com diferentes classes e dimensões, é sujeito a avaliações em determinados intervalos de tempo de trabalho por turno. Isto, aliado a procedimentos estatísticos, permite calibrar as especificidades da máquina obtendo assim classificações mais correctas das peças ensaiadas. Os valores da característica resistente em questão são comparados com um valor de referência e os desvios registados em gráficos. A acumulação destes valores determina se a espécie analisada está dentro ou fora do controlo, caso não exceda ou por outro lado ultrapasse um intervalo pré-estabelecido.

Devido à necessidade de um esforço contínuo de controlo, este processo é ajustado para ser usado em serrações com número reduzido de espécies, dimensões e classes de qualidade (Botelho, 2006).

3.2.2. CLASSES DE RESISTÊNCIA

As classes de resistência foram introduzidas com o objectivo de incentivar a utilização de madeiras com propriedades padronizadas, orientando a escolha das espécies a indicar para a elaboração dos projectos estruturais. Neste sentido, com as classes de resistência pretende-se dotar a madeira de um nível de confiança adicional uma vez que se aplicam coeficientes de segurança no cálculo dos sistemas estruturais. A madeira passa assim a ser tratada da mesma forma que o betão armado ou o aço, conferindo-lhe menos risco e simplificando o papel do projectista já que este tem apenas de especificar a classe de resistência usada no dimensionamento da estrutura e a norma aplicável respectiva. Por outro lado, tanto o empreiteiro como a fiscalização vêm a sua responsabilidade acrescidas pois torna-se importante comprovar na prática (em obra) se a madeira corresponde à classe de resistência imposta no projecto, validando ou não a sua utilização.

Este processo de classificação das madeiras permite maior facilidade na sua aplicação em trabalhos reais, pois atribui propriedades físicas e mecânicas a populações de madeira de uma forma mais simples e disciplina o seu controlo de qualidade ajudando o projectista na selecção do material.

A norma EN 338 [1] propõe um conjunto de classes de resistência aplicáveis a todas as madeiras, tanto Folhosas como Resinosas, com aptidão para serem usadas em sistemas estruturais. Esta norma inclui valores numéricos das principais propriedades físicas e mecânicas dos elementos de madeira com interesse no campo do dimensionamento estrutural.

Cada classe de resistência é explicitada por uma sigla que traduz as principais propriedades mecânicas, dividindo-se em dois conjuntos de classes, um aplicável a Resinosas e outro a Folhosas, como demonstra o quadro 3.2.

Como comentário ao quadro, refere-se que a letra C provém da palavra inglesa “Coniferous” que significa “Resinosas” e a letra D deriva da palavra “Deciduous” que encontra o seu significado na língua portuguesa na palavra “Folhosas”. Por outro lado o número presente na sigla é o valor da resistência característica à flexão na direcção do fio, em N/mm^2 . Uma forma de exemplificar isto é afirmar que a classe C20 corresponde a uma resinosa de qualidade média com resistência característica à flexão na direcção do fio de 20 N/mm^2 . Logo, num projecto onde esteja prevista a utilização de madeira maciça o projectista não necessitará de explicitar com rigor a espécie, sendo suficiente a apresentação da classe de resistência requerida.

Os valores das principais propriedades físicas e mecânicas (resistência à flexão na direcção das fibras, massa volúmica e módulo de elasticidade) são obtidos através de ensaios exaustivos de classificação enquanto as demais propriedades mecânicas são conseguidas através de extrapolações de resultados desses ensaios (a partir de relações numéricas com as três propriedades acima citadas obtidas por via estatística).

	Resinas e cho up o												Folhas					
	C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50	D30	D35	D40	D50	D60	D70
Propriedades de resistência, em N/mm ²																		
Flexão	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50	30	35	40	50	60	70
Tração paralela ao fio	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30	18	21	24	30	36	42
Tração perpendicular ao fio	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Compressão paralela ao fio	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	29	23	25	26	29	32	34
Compressão perpendicular ao fio	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2	8,0	8,4	8,8	9,7	10,5	13,5
Corte	1,7	1,8	2,0	2,2	2,4	2,5	2,8	3,0	3,4	3,8	3,8	3,8	3,0	3,4	3,8	4,6	5,3	6,0
Propriedades de rigidez, em kN/mm ²																		
Módulo de elasticidade paralelo ao fio (valor médio)	7	8	9	9,5	10	11	11,5	12	13	14	15	16	10	10	11	14	17	20
Módulo de elasticidade paralelo ao fio (valor característico)	4,7	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	7,7	8,0	8,7	9,4	10,0	10,7	8,0	8,7	9,4	11,8	14,3	16,8
Módulo de elasticidade perpendicular ao fio (valor médio)	0,23	0,27	0,30	0,32	0,33	0,37	0,38	0,40	0,43	0,47	0,50	0,53	0,64	0,69	0,75	0,93	1,13	1,33
Módulo de distorção (valor médio)	0,44	0,50	0,56	0,59	0,63	0,69	0,72	0,75	0,81	0,88	0,94	1,00	0,60	0,65	0,70	0,88	1,06	1,25
Massa volumétrica, em kg/m ³																		
valor característico	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460	530	560	590	650	700	900
valor médio	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550	640	670	700	780	840	1080
Nota: a Os valores indicados para a resistência à tração, resistência à compressão, resistência ao corte, valor característico do módulo de elasticidade, valor médio do módulo de elasticidade perpendicular ao fio e valor médio do módulo de distorção foram calculados usando as equações apresentadas no anexo A																		
b Os valores tabelados correspondem a madeira com um teor em água em equilíbrio com uma temperatura de 20°C e humidade relativa do ar de 65%																		
c Madeira das classes C45 e C50 pode não estar disponível de imediato																		

Quadro 3.2 – Classes de Resistência. Valores característicos. (EN 338 [1])

3.2.3. RELAÇÃO ENTRE CLASSES DE QUALIDADE E CLASSES DE RESISTÊNCIA

Como foi demonstrado atrás, o controlo de qualidade de madeira para estruturas apoia-se nas normas de classificação visual ou mecânica. Por isso, é necessário estabelecer uma relação entre as normas que definem as classes de resistência (EN338) e o controlo de qualidade, já que o projecto não revela rigorosamente a espécie de madeira a utilizar mas sim as características mínimas resistentes a garantir (especificidade das classes de resistência). Neste sentido, o projectista deve ter a preocupação de escolher classes de resistência a que correspondam madeiras disponíveis no mercado.

A função de correspondência entre classes de resistência e classes de qualidade é cumprida pela norma EN1912 [6], uma vez que enumera de uma forma extensiva as classes de resistência e as respectivas classes de qualidade e espécies definidas nos sistemas nacionais dos países onde a madeira é utilizada frequentemente como material estrutural (EUA, Canadá ou Japão por exemplo). Estas classes de qualidade, retiradas de diferentes normas de classificação visual, são apresentadas em anexo na norma permitindo atribuir a cada caso uma classe de resistência (Quadro 3.3).

Quadro 3.3 – Relação entre classes de qualidade e classes de resistência (EN 1912 [6])

Espécie de Madeira	Classe de Qualidade (Norma)	Classe de Resistência
Pinho Bravo (Pinus Pinaster Ait.)	E (NP 4305)	C18
Casquinha (Pinus Silvestris L.)	SS (BS 4978) GS (BS 4978)	C24 C16
Espruce (Picea Abies Kars)	S13 (DIN 4074) S10 (DIN 4074) S7 (DIN 4074)	C30 C24 C16
Câmbala (Milícia Excelsea A. Chev. ou M. Regia A. Chev.)	HS (BS 5756)	D40

Em Portugal, existe apenas uma espécie de madeira onde a qualidade se encontra normalizada em classes: o Pinho bravo (Pinus pinaster Ait.). A NP 4305 [18] é a norma que vigora neste domínio e atribui duas classes de qualidade à madeira de pinho bravo: classe “E” e classe “EE”, tal como apresentado anteriormente no quadro 3.1. As classes de qualidade citadas encontram a sua correspondência, aproximadamente, nas classes de resistência C18 e C35 da EN338. Contudo, a classe EE (Especial Estruturas) não é reconhecida na EN1912 [6] como viável, o que invalida o seu reconhecimento como C35 em termos de certificação de produto.

3.3. AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MADEIRA ESTRUTURAL ANTIGA

As normas de classificação de madeira estrutural anteriormente citadas (ainda que de uma forma breve) são aplicáveis algumas a madeira nova, isto é, a utilização dos procedimentos de classificação, explicados no ponto antecedente, deve acontecer antes da sua colocação em obra, sobre madeira proveniente de serração. Pelo facto das normas apresentadas cingirem o seu campo de aplicação à madeira nova, surge a necessidade de abordar a mesma temática mas para o caso das madeiras antigas,

ou seja, apresentar as metodologias de inspecção e de classificação existentes para madeira que já foi aplicada em obras concretas.

O facto das peças de madeira a ensaiar estarem colocadas em obra e eventualmente estarem inseridas em construções com elevado valor patrimonial reveste este processo de algumas particularidades que impedem, por um lado, a avaliação de alguns defeitos usados na caracterização da madeira nova e, por outro lado, impossibilitam a aplicação de métodos destrutivos de avaliação mecânica. Um exemplo do que se referiu é a determinação da taxa de crescimento, que exige o acesso às faces de topo dos elementos de madeira o que não é normalmente viável pois a sua colocação em obra normalmente esconde os topos no interior da alvenaria impossibilitando a sua realização.

É fundamental que, na avaliação da segurança de estruturas de madeira antiga, haja a capacidade de relacionar a existência de defeitos e lesões com os esforços aplicados às suas peças singulares, para se ter uma ideia do carácter crítico que esses defeitos podem assumir face aos esforços. Na mesma linha de pensamento, é importante observar as fendas presentes nas peças e concluir se foram provocados por esforços que tiveram a sua origem em falhas nas ligações, por exemplo de concepção, em diferenças de carregamento entre o dimensionamento e o serviço ou em falhas nos pontos de ligação.

Apresentam-se, de seguida, diferentes métodos e metodologias aplicáveis ao caso particular das madeiras antigas, capazes de respeitar a sua localização numa construção e o seu valor histórico, mantendo a integridade e as características iniciais.

Os métodos que seguidamente se descrevem auxiliam os projectistas e promotores na tentativa de contrariar a linha de actuação que habitualmente se tem assistido: opção por dotar as estruturas de reforços desajustados menosprezando as potencialidades do sistema estrutural por desconhecimento das suas reais capacidades resistentes.

3.3.1. MÉTODO SIMPLIFICADO BASEADO NA EN338

O método simplificado que se apresenta neste subcapítulo assenta no ponto 6.2.2 na norma EN338 [1] e justifica-se devido à extensa dificuldade que envolve o processo de avaliação de segurança de madeira presente em sistemas estruturais, ou seja, de madeira antiga e da sua correspondência com classes de resistência. Os obstáculos prendem-se com a forma como estes elementos estão montados, impossibilitando em muitas ocasiões a avaliação do seu estado sanitário por exame visual, quer por dificuldade de acesso quer por dificuldades em visualizar a peça, por estar suja ou degradada superficialmente

Neste sentido, a norma EN338 [1] propõe caminhos simplificados para a classificação em classes de resistência de madeira estrutural antiga que contornam as dificuldades apresentadas. Estas vias apoiam-se no pressuposto de que é admissível atribuir uma classe de resistência a uma dada população de madeiras desde que a resistência à flexão na direcção paralela às fibras ($f_{m,k}$), a massa volúmica (ρ_m) e o módulo de elasticidade médio na direcção paralela às fibras ($E_{0,m}$) sejam todas superiores aos valores indicados para essa classe.

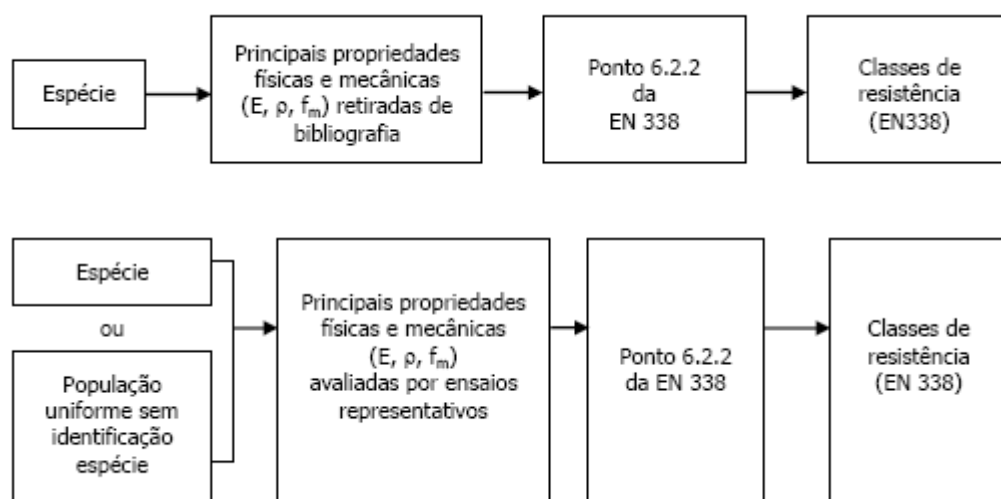


Figura 3.2 – Atribuição de classes de resistência a madeira em serviço (Franco, 2008)

A caracterização da espécie reveste-se pois de importância particular nestes processos, o que realça a necessidade de se ter conhecimentos apurados na identificação de particularidades visuais das madeiras, como a cor, largura dos veios (tanto de Verão como de Inverno), dureza superficial e diferenças entre o borne e o cerne. Por outro lado, a determinação da massa volúmica pode ser útil para validar a atribuição realizada o que leva à indispensabilidade de retirar uma amostra por carotagem.

Concluindo, o sistema começa com a atribuição de uma classe de resistência a uma dada população de madeiras caracterizada por singularidades como a espécie ou grupo de espécies, qualidade e origem, permitindo então o agrupamento de espécies com propriedades mecânicas idênticas. Para que esta atribuição se concretize é necessário que os valores característicos da resistência à flexão e da massa volúmica sejam iguais ou superiores aos valores da classe correspondente e também que o valor característico médio do módulo de elasticidade à flexão seja igual ou superior a 95% do valor para essa dada classe de resistência (EN 338 [1]).

Seguidamente mostra-se o resultado final da aplicação deste método de avaliação da resistência, composto por duas vias simplificadas, às madeiras correntemente usadas nas estruturas nacionais (Quadro 3.4). A bibliografia usada para definir os valores das principais propriedades mecânicas foi a publicação “Madeiras Portuguesas” (Carvalho, 1996), exceptuando-se os valores deduzidos para o módulo de elasticidade.

Quadro 3.4 – Classes de Resistência a usar no cálculo de estruturas de madeira portuguesa existentes

Espécie	$f_{m,k}$ (MPa)	$E_{0,m}$ (GPa)	ρ_k (Kg/m ³)	Classe EN 338
Castanho (<i>Castanea sativa</i> , Mill)	97	10	540	D30
Carvalho (<i>Quercus faginea</i> , Lam.)	122	11	800	D40
Eucalipto (<i>Eucalyptus globulus</i> , Labill)	137	12	765	D40
Choupo branco (<i>Populus Alba</i> , L.)	80	11	450	C24

O Pinho bravo português foi excluído deste quadro por ter normalização específica classificando as suas peças na classe C18 (Botelho, 2006).

3.3.2. UTILIZAÇÃO DE EQUIPAMENTOS DE AVALIAÇÃO POR ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

Os equipamentos de avaliação por ensaios não destrutivos, baseiam-se genericamente na realização de um conjunto de testes para identificar possíveis danos estruturais que comprometam a actividade e desempenho nas suas operações.

Em oposição às técnicas tradicionais de apreciação de peças estruturais de madeira, como a classificação visual explicitada anteriormente, têm-se desenvolvido métodos de inspecção que permitem a avaliação e a recolha de informação mais detalhada sobre esses elementos recorrendo a técnicas não destrutivas. Estes métodos são particularmente úteis quando se realiza a inspecção de estruturas com considerável valor patrimonial e histórico, já que estão aptos a fornecer dados sobre as características mecânicas dos elementos sem proceder à sua demolição ou extracção de peças das suas posições originais. Assim, realizam-se ensaios *in situ* de índole não destrutiva, capazes de respeitar o valor do edifício e de reduzir a distância entre os seus resultados e os valores da capacidade resistente das peças estruturais, revestida de algum conservadorismo, proporcionada pelas técnicas tradicionais.

Estas metodologias de avaliação não destrutiva podem ser divididas em dois grandes grupos: métodos globais de ensaio e métodos locais de ensaio. O método dos Ultra-sons constitui um dos métodos englobados no primeiro grupo enquanto o Pylodin e o Resistograph (descritos numa fase posterior deste capítulo) são exemplos dos métodos contidos no segundo grupo.

Os métodos locais de ensaios são os que mais directamente auxiliam a inspecção visual e estão ligados à avaliação da secção residual resistente através da análise de variações da densidade, relacionáveis com a degradação biológica.

Como são métodos modernos, em pleno desenvolvimento, encontram-se ainda associados a algumas variáveis como questões de segurança, custos envolvidos e questões técnicas que têm condicionado a sua utilização na avaliação de estruturas de madeira.

Neste subcapítulo pretende-se expor alguns equipamentos e técnicas não destrutivas de avaliação da capacidade resistente, explicando a sua utilidade e evidenciando as vantagens e desvantagens particulares de cada um. É de salientar que a eficácia deste tipo de ensaios pode ser aumentada com a utilização simultânea de ensaios destrutivos para compor o estudo das características mecânicas das peças de madeira.

3.3.2.1. Ultra-sons

Trata-se de um dos métodos de avaliação não destrutiva mais utilizados na caracterização de estruturas de madeira e normalmente tem associado um exame visual prévio. Baseia-se na estimação do módulo de elasticidade dinâmico por meio de uma relação entre a velocidade de propagação de ondas sonoras (que depende da rigidez e densidade) e as propriedades elásticas da madeira. Uma vez determinado o módulo de elasticidade dinâmico é possível relacioná-lo com o módulo de elasticidade estático e com a resistência mecânica do elemento, estando o rigor da avaliação sempre dependente da correcta identificação da espécie de madeira do elemento analisado.

A propagação das ondas pode ser analisada segundo alguns métodos como o método dos ecos (estuda a reflexão das ondas em descontinuidades ou superfícies da peça), o método de ressonância (em função da frequência de ressonância, densidade e dimensões do elemento é possível estimar o módulo de elasticidade), o método de transmissão (propagação de ondas de frequência mais baixa do que no método dos ecos mas de metodologia semelhante; são mais ajustados para elementos heterogéneos) e o método de imersão (idêntico a um método de ecos ou de transmissão diferindo na natureza do contacto entre a sonda e a peça).



Figura 3.3 – Aparelhos de avaliação não destrutiva por avaliação da velocidade de propagação de ultra-sons: à esquerda aparelhos Sylvatest e à direita exibe-se o PUNDIT (Botelho, 2006).

Esta técnica pode ser uma mais-valia no processo de diagnóstico pois fornece informações sobre as condições internas dos elementos de madeira e sobre a sua capacidade resistente residual (Sandoz, 1989). A relação entre o método e a resistência residual não é efectiva já que o comprimento de onda é geralmente superior às dimensões dos defeitos (como os nós e a inclinação do fio). Contudo, a metodologia dos ultra-sons apresenta uma precisão excepcional na determinação destes defeitos locais e pode permitir uma boa interpretação das propriedades locais dos elementos *in situ*.

Uma das vantagens mais importantes deste método é o facto de a propagação da onda ser afectada exclusivamente pelo material entre as duas sondas (aparelhos que permitem uma avaliação relativamente directa). Outro factor a salientar é o fácil manuseamento (simplicidade de utilização e transporte) destes aparelhos, fazendo com que o processo se torne num dos mais adequados para a

inspecção de estruturas de madeira. Por outro lado, o recurso a um operador experiente é um requisito fundamental assim como a necessidade de se realizar um acoplamento eficaz entre os transdutores e a superfície dos provetes.

Os aparelhos para inspecção de estruturas de madeira por avaliação da velocidade de propagação de ultra-sons actualmente disponíveis são o PUNDIT (*Portable Ultrasonic Non destructive Digital Indicating Tester*) e o Sylvatest, por exemplo.

3.3.2.2. Resistograph

Basicamente, consiste num aparelho semelhante a um berbequim, munido de uma agulha, que perfura as peças com o objectivo de determinar a resistência oferecida pela madeira à rotação e à progressiva penetração da agulha. Convém referir que a utilização deste aparelho é considerada não destrutiva porque provoca apenas furos de pequeno diâmetro, facilmente escondidos por aplicação de uma cola epoxídica e incapazes de reduzir a resistência dos elementos de madeira.



Figura 3.4 – À esquerda ilustra-se o corpo central do *Resistograph*. À direita é visível a bateria e impressora portátil (Botelho, 2006)

Constitui um método de inspecção muito útil na análise de estruturas em serviço, pois fornece informação sobre a conservação dos elementos estruturais e, ainda que indirectamente, sobre a sua capacidade estrutural, tal como a secção transversal (quando é impossível medir directamente as suas dimensões), a secção transversal residual (madeira deteriorada está relacionada com quebra de resistência), a presença de defeitos naturais e a madeira deteriorada não visível externamente.

Os valores fornecidos pelo método podem ser relacionados com as propriedades mecânicas dos elementos, tais como o módulo de elasticidade na direcção do fio, o módulo de rotura na direcção do fio e a densidade ou massa volúmica. Para se obter informações quantitativas da inspecção utilizando este método, é necessário criar correlações numéricas entre os valores do *Resistograph* com os valores das propriedades mecânicas determinadas por meio de ensaios destrutivos (como o módulo de rotura na direcção do fio e o módulo de elasticidade na direcção do fio). Outro ponto a realçar é a influência do teor de humidade nos valores da densidade, observando-se que a resistência à penetração diminui com o aumento do teor de água (Machado e Cruz, 1997).

A aplicação deste método apresenta algumas vantagens face a outros métodos de avaliação não destrutiva, já que são testes fáceis de executar, os seus resultados gráficos são de fácil interpretação, os dados ostentam simplicidade no seu armazenamento e o transporte do equipamento é acessível. Contudo, estudos realizados revelam que o método exhibe certas limitações relacionadas com a

difficuldade em posicionar o dispositivo na perpendicular ao elemento, com o procedimento de teste (é necessário usar as duas mãos), com a natureza invasiva da técnica e com o carácter local das medições.

O método resistográfico pode ver a sua aplicação melhorada caso seja usado conjuntamente com métodos e ensaios não destrutivos que forneçam uma avaliação qualitativa.

3.3.2.3. Georradar

O *Georradar* fundamenta-se na emissão de ondas electromagnéticas provocadas por impulsos de curta duração (com frequências compreendidas entre 100 MHz e 1,5 GHz) e posteriormente captadas por receptores, analisando a forma de propagação no elemento de madeira em estudo. A propagação das ondas está inteiramente relacionada com o meio físico (caracterizado pela captação de diferenças de energia por parte do receptor) que atravessam, uma vez que ao longo do seu percurso as especificidades do material provocam fenómenos de reflexão, refacção e de difracção. Importa dizer que a propagação de ondas electromagnéticas é um fenómeno relativamente complexo e, face ao objectivo deste capítulo, não se pretende oferecer uma exposição muito detalhada sobre esta temática.

O aparelho eléctrico, cujas fontes de alimentação são pilhas ou baterias, designado por “Georradar” é composto por três conjuntos de elementos: a Unidade central, as Antenas e os restantes acessórios. A Unidade central é o grupo que coordena os restantes constituintes e permite visualizar os resultados dos ensaios enquanto as antenas possibilitam a transformação dos impulsos gerados em ondas electromagnéticas. Existem outros acessórios, como o odómetro electrónico (capaz de obter distâncias com elevada precisão) ou a impressora, que fazem parte do equipamento mas assumem um papel secundário no processo de ensaio.

A informação proporcionada pelo método, apesar de não permitir uma correlação directa com outros métodos, tem a vantagem de ser de leitura fácil e de evidenciar claramente a presença de eventuais pontos de humidade, fendas ou diferentes materiais.

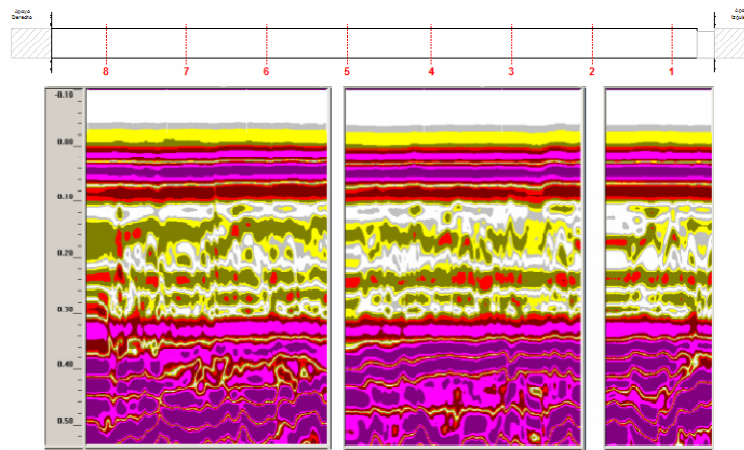


Figura 3.5 – informação proporcionada pelo método: radargrama (Botelho, 2006)

3.3.2.4. Pylodin

Este método foi idealizado com o objectivo de medir a densidade superficial e a resistência de elementos de madeira degradados e sãos. Através desta metodologia vários defeitos podem ser detectados e localizados, associando a redução de resistência à penetração da ponteira. Porém, é de

referir que o método não é capaz de descobrir defeitos ou vazios no interior do elemento de madeira, ficando-se pela caracterização do seu estado de conservação superficial.

O *Pylodin* é constituído por um cilindro metálico, possuidor de uma barra circular no seu interior que, ao despende uma determinada quantidade de energia, é introduzida na madeira. A profundidade de penetração alcançada é relacionável com a dureza da peça na direcção transversal e também com a sua densidade (Botelho, 2006). Existem muitas versões deste dispositivo comercializadas e que podem ser usadas em inspecções, sendo exemplos deste comentário o *Pylodin 6J* (o mais comum), o *Pylodin 12J*, o *Pylodin 18J* e o *Pylodin 4JR* (com tiro repetido).



Figura 3.6 – À esquerda mostra-se o *Pylodin 6J*; à direita ilustra-se o esquema de funcionamento do *Pylodin* (Dias, 2008)

Pode ser um ensaio com alguma importância em casos concretos como a análise da resistência residual de postes de electricidade em madeira. A sua aplicação também se reveste de interesse na previsão do aparecimento de doenças através de uma medição periódica ou na correspondência de classes de resistência entre diversos tipos de madeira. Todavia, o método encontra-se limitado por apenas concluir a respeito da dureza ou resistência superficial. Este facto é agravado porque as correlações geradas com a resistência da madeira não são expressivas e também porque a caracterização superficial da peça pode ser substituída na perfeição por técnicas convencionais, como é o caso do uso do martelo ou de lâminas metálicas.

3.3.2.5. Outras técnicas não destrutivas

Neste ponto pretende-se expor, de uma forma resumida, os restantes métodos de avaliação não destrutiva.

A técnica designada por “**Detecção acústica de insectos xilófagos**” pode ser sinteticamente apresentada como uma metodologia que capta e amplifica ondas sonoras produzidas durante a movimentação dos insectos xilófagos. As ondas sonoras encontram nas fibras da madeira o seu meio de propagação e em função da natureza do sinal sonoro produzido é possível prever a intensidade do ataque.

Por outro lado, a **dendrocronologia** é um método que permite estimar, com grande precisão, a idade de um dado elemento estrutural de madeira. Isto é conseguido a partir da análise dos anéis de crescimento da madeira e tendo em atenção também as especificidades do desenvolvimento de cada espécie (a espessura dos anéis difere de espécie para espécie por exemplo). Pode ser útil na qualificação e distinção do património histórico edificado com estruturas de madeira.

Outro método a destacar neste ponto é o “**método das vibrações induzidas**”. Estabelece a sua base na medição da velocidade de propagação de ondas de choque ao longo das fibras da madeira, tendo sempre presente que estas se propagam mais depressa em madeira sã do que em madeira degradada. Sendo assim, perante os resultados desta técnica (velocidades de propagação) é possível localizar e identificar defeitos ou vazios interiores.

As aplicações deste método estendem-se, para além da detecção de degradações e vazios, à caracterização mecânica de estruturas de madeira, à sua classificação e ao seu controlo de qualidade. Existe uma certa variedade de aparelhos comercializados, de entre os quais se destaca o *METRIGUARD* (Figura 3.7).



Figura 3.7 – Exemplos de *Metriguard*: à esquerda *Metriguard 2800 DME*; à direita *Metriguard 330 Finger Joint Tester*

O **raios-X** foi dos primeiros métodos a ser aplicado na inspecção de estruturas de madeira e funda-se na exposição do material inspeccionado a energia radiográfica (Raios-X), da qual se retira um esquema bidimensional da variação da densidade do elemento atravessado, concedendo uma imagem da sua constituição. As suas vantagens estão directamente relacionadas com o que se referiu, já que permite evidenciar degradações e possíveis vazios dos elementos inspeccionados.

Trata-se de um método com elevados encargos financeiros, o que em muitos casos condicionou a sua aplicação e conduziu ao seu progressivo abandono. Em contrapartida, a utilização dos raios gama tem ganho cada vez mais peso na inspecção de estruturas de madeira, substituindo a metodologia baseada na radiografia por raio-X, por apresentar uma perigosidade menor e por proporcionar uma imagem em tempo real da análise do elemento de madeira.

3.3.3. DEFINIÇÃO DAS PROPRIEDADES POR LIMITAÇÃO DE DEFEITOS – MÉTODO AMORIM FARIA

Este método foi proposto e desenvolvido na dissertação de Mestrado intitulada “Proposta de Atribuição de Propriedades Mecânicas a Elementos Estruturais de Madeira por Inspecção Visual In Situ” realizada por Sónia Isabel Saragoça Franco sob a orientação do Professor José Amorim Faria. A metodologia desenvolvida pretende ser validada nesta tese com a realização de uma campanha experimental, pela qual a explicação dos seus pormenores será feita com algum detalhe.

O estudo de uma proposta de classificação visual por observação in situ que se adequasse à construção em Portugal começou com a análise das principais normas de classificação visual de madeira nova para estruturas existentes na Europa, como são os casos da norma portuguesa NP4305 [18], da norma

francesa NF B52-001 [23] e da norma espanhola UNE 56544 [21], a que se seguiu uma apreciação comparativa destas com a pré-norma italiana, U84000420 [22], que se trata de uma norma de classificação visual de madeira *in situ*. Neste sentido a investigação englobou e analisou as quatro normas seguintes, servindo-se delas para a sua base:

- NP 4305:1995 – *Madeira serrada de pinheiro bravo para estruturas. Classificação Visual* [18];
- NF B52-001:1998 – *Règles d'utilisation du bois dans les constructions. Classement Visual pour l'emploi en structure des principales essences résineuses et feuillues* [23];
- UNE 56544:2003 – *Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructura: madera de coníferas* [21];
- U84000420:2003 – *Beni culturalli. Manifatti lignei. Strutture portanti degli edifici. Ispezione in situ per valutazione dello stato di conservazione e la stima delle prestazioni degli elementi in opera* [22];

Como se pretendia elaborar um método que classificasse visualmente madeira presente em sistemas estruturais, foi necessário definir que critérios de seriação e divisão estariam na base da classificação. Sendo assim, este método foi construído através de limitações de defeitos que usualmente são possíveis de identificar em peças de madeira envolvidas em estruturas, tais como os nós, o descaio, as fendas de secagem, a inclinação do fio e, em determinadas situações, os ataques biológicos. Considerou-se então que a análise e medição destes cinco defeitos (excluindo os ataques biológicos para o caso das Resinosas por serem menos susceptíveis ao seu ataque), impondo as respectivas limitações, seria o critério de selecção da madeira em estudo.

Efectuada a escolha dos defeitos relevantes para o estudo, foi necessário definir os critérios de medição e os métodos que seriam usados com esse fim. Os métodos de medição de defeitos usados nesta proposta de classificação foram os que se encontram descritos e que são empregues na norma NP 4305 [18], mas que em geral são aplicáveis a outras espécies de madeiras e em outras normas de classificação visual. No caso particular dos nós, optou-se por seguir um método alternativo descrito na norma EN 1310 [4], por ser de fácil aplicação e por ser usado na maioria dos países europeus. Remete-se para a bibliografia, nomeadamente para a dissertação de Sónia Franco, mais informações a respeito dos métodos de medição a utilizar neste método. No documento referido encontram-se explicitados os detalhes dos processos de medição e todas as considerações realizadas para o efeito.

Face às normas que se escolheram como base desta metodologia, efectuou-se uma análise comparativa entre elas, separando-as de acordo com a espécie de madeira a que se referiam, isto é, procedeu-se a duas análises comparativas: uma referente às normas que regem as Resinosas e outra relativa às normas de Folhosas. Destas duas análises resultaram quatro quadros que incluem a comparação das limitações estabelecidas em cada norma para os diferentes defeitos de diferentes espécies (apresentados na dissertação de Sónia Franco [37]).

Convém dizer que de entre as quatro normas referidas, a única que contém uma classificação para Folhosas é a NF B52-001 [23] e mesmo assim, trata-se de um anexo informativo não estando dotado de tanto desenvolvimento como as restantes partes dessa norma. Por isto, os valores presentes no quadro-comparativo das Folhosas são em tudo idênticos aos valores do quadro correspondente às Resinosas, tendo este sido elaborado com mais cuidado porque a normalização incide fundamentalmente sobre este conjunto de espécies.

Depois de se proceder a uma análise dos quatro quadros referidos, obtiveram-se dois quadros finais para aplicação em madeira estrutural *in situ*, nomeadamente para avaliação de estruturas de Pinho

nacional, de Carvalho e Castanho. O facto que condicionou esta escolha é óbvio, já que constituem as espécies mais usadas na construção em Portugal, tanto em construções antigas como na actualidade.

Os quadros referidos cumprem as regras estipuladas tanto na EN 14081-1 [7] como na EN1310 [4], apesar de estas normas se referirem a madeira nova e não a madeira antiga, como se pretende classificar segundo este processo. Uma vez que se tratam de avaliações realizadas sobre madeira *in situ* é necessário assegurar condições que possibilitem boas conclusões e a qualidade das informações obtidas. Para isso torna-se importante garantir que o local a inspeccionar esteja dotado de acessibilidade, limpeza e luminosidade. Quando uma destas três exigências não é garantida, não se pode assumir que os resultados obtidos são fidedignos, já que podem ter sido influenciados negativamente pela sua ausência, alterando uma possível classificação final.

Quadro 3.5 – Método Amorim Faria: proposta de classificação visual *in situ* – Pinho (Franco, 2008)

Defeitos		- Categoria em obra - APROVADA
Nós	Isolados	$\varnothing > 10 \text{ mm}$ e $\varnothing \leq 1/2 (b \text{ e/ou } h)$
	Agrupados	$\varnothing \leq 3/4 (b \text{ e/ou } h)$
Descaio		$d \leq 1/3$
Inclinação do Fio		$i \leq 1/3$
Fendas profundas de secagem	$L_f \geq \min (L/4 ; 1 \text{ m})$	
	Não Repassadas	$f \leq 3/5$
	Repasadas	$a \geq \max (f_1, f_2)$ e /ou $(f_1 + f_2) \leq 2/3 b$

Quadro 3.6 – Método Amorim Faria: proposta de classificação visual *in situ* - Carvalho e Castanho (Franco, 2008)

Defeitos		- Categoria em obra - APROVADA
Diâmetro dos Nós		$10 < \varnothing \leq 40 \text{ (mm)}$
Descaio		$L_d < 33\% \text{ de } L$ e $L_d < 100 \text{ cm}$
Inclinação do Fio		$i \leq 20\%$
Fendas profundas de secagem	$L_f \geq \min (L/4 ; 1 \text{ m})$	
	Não repassadas	$f \leq 3/5 (b \text{ ou } h)$
	Repasadas	$a \geq \max (f_1, f_2)$ e /ou $(f_1 + f_2) \leq 2/3 b$
Alterações biológicas		Caruncho - Admissível (se inactivo) Fungos podridão - Admissíveis (se inactivos)
Massa volúmica a 12% (Kg/m ³)	Carvalho	Castanho
	≥ 640	≥ 540

b	Espessura da peça	i	Inclinação do fio
h	altura da peça	d	Descaio
L	Comprimento da peça	f	Profundidade das fendas
$\varnothing$	Diâmetro dos nós	L_f	Comprimento das fendas

Os resultados da classificação são expressos por duas designações, definindo assim apenas uma classe de qualidade com o nome “Aprovada” quando o elemento ensaiado cumpre os valores limite mínimos contidos nos quadros finais da proposta. Os outros elementos que não são capazes de satisfazer tais requisitos recebem a designação de “Rejeitado”.

O método segue o exemplo italiano e não atribui nenhuma classe de resistência segundo os critérios da NP EN338, definindo apenas valores resistentes mínimos. Estes valores supõem-se sempre do lado da segurança, pois têm como base as tensões características referidas na NP EN 338 para a classe de resistência mais baixa tanto para as Resinosas como as Folhosas, respectivamente C18 e D30. As propriedades mecânicas consideradas foram:

- Módulo de Elasticidade na direcção do fio, E_m ;
- Resistência Característica à flexão na direcção do fio, $f_{m,k}$;
- Resistência Característica à compressão na direcção do fio, $f_{c0,k}$;
- Resistência Característica à tracção na direcção do fio, $f_{t0,k}$;

Assim, se uma determinada peça de madeira receber a classificação de “Aprovada” segundo este método, isto é, se cumprir os valores definidos tanto no Quadro 3.5 (para peças de Pinho) ou Quadro 3.6 (para peças de Carvalho e Castanho) ficará associada a valores mínimos para as propriedades apresentadas.

De seguida apresentam-se os valores de cálculo a considerar para vigas aprovadas por classificação visual *in situ* para Pinho (Quadro 3.7), Carvalho e Castanho (Quadro 3.8).

Quadro 3.7 – Método Amorim Faria: Valores de cálculo para a classificação *in situ* de Pinho (Franco, 2008)

Valores de Cálculo Pinho <i>in situ</i> - Vigas Aprovadas		
E_{mean}	Módulo de elasticidade médio	7,2 KN/mm ²
$f_{m,k}$	Resistência característica à flexão	14,4 N/mm ²
$f_{c0,k}$	Resistência característica à compressão paralela ao fio	16,2 N/mm ²
$f_{t0,k}$	Resistência característica à tracção paralela ao fio	8,8 N/mm ²

Quadro 3.8 – Método Amorim Faria: Valores de cálculo para a classificação *in situ* de Carvalho e Castanho (Franco, 2008)

Valores de Cálculo Carvalho e Castanho <i>in situ</i> - Vigas Aprovadas		
E_{mean}	Módulo de elasticidade médio	8,0 KN/mm ²
$f_{m,k}$	Resistência característica à flexão	21,0 N/mm ²
$f_{c0,k}$	Resistência característica à compressão paralela ao fio	20,7 N/mm ²
$f_{t0,k}$	Resistência característica à tracção paralela ao fio	14,4 N/mm ²

4

CAMPANHA EXPERIMENTAL

4.1 OBJECTIVO/OBJECTO

Neste capítulo procura-se descrever o trabalho experimental realizado, detalhando todas as particularidades e expondo os conceitos que estiveram na base da sua realização. Fundamentalmente a campanha experimental consistiu na realização de ensaios destrutivos de provetes de madeira, testando-os tanto à compressão (paralela ao fio) como à flexão.

Os ensaios mecânicos constituem o ponto mais importante deste capítulo pois fornecem os dados necessários para responder aos principais desafios que foram colocados na realização desta dissertação: validação da proposta de classificação (abordada no capítulo anterior) e melhor compreensão do comportamento da madeira como elemento estrutural.

Os ensaios foram realizados considerando todos os factores que eram susceptíveis de influenciar a variação das características da madeira e consequentemente o seu comportamento, sendo que estes factores podem ser de índole natural, decorrentes da própria natureza do material, ou então de índole tecnológica, envolvendo a técnica de execução dos ensaios. De entre os factores naturais destacam-se a espécie botânica em questão, a massa volúmica e a presença de defeitos enquanto os factores tecnológicos mais relevantes são aqueles que resultam de procedimentos de ensaios como a forma e dimensão dos provetes e a velocidade de aplicação das cargas.

Para ter em conta o exposto no parágrafo anterior, tornou-se importante consultar normas relacionadas com a determinação de propriedades físicas e mecânicas de madeira de modo a melhor regular a campanha experimental e estipular os procedimentos, esquemas de ensaios e os condicionalismos a que os provetes devem obedecer. A norma europeia EN408 [12] (Estruturas de madeira. Madeira para estruturas e madeira lamelada-colada) aconselha a utilização de provetes de tamanho real, contendo defeitos, estando a sua realização sujeita a uma duração e condições de temperatura e humidade relativa do ar normalizados. Esta norma especifica métodos de ensaio para a determinação de certas propriedades mecânicas com relevância para a temática abordada, como é o caso do módulo de elasticidade em flexão e em compressão paralela ao fio, da resistência à flexão e da resistência à compressão paralela ao fio. Especifica ainda o modo de determinação das dimensões e da massa volúmica das peças a ensaiar, aspectos importantes na preparação da campanha experimental.

A campanha experimental foi dividida em duas partes, executadas em laboratórios distintos mas ambos situados nas instalações da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP): no Laboratório de Engenharia Sísmica e Estrutural (LESE) realizaram-se os ensaios à flexão das vigas de

madeira disponibilizadas enquanto no Laboratório de Sistemas e Componentes (LSC) se realizaram os ensaios à compressão paralela ao fio dos provetes de madeira.

Por um lado, com a realização dos ensaios à compressão procurou-se essencialmente caracterizar o mecanismo de rotura habitual, definindo as linhas de rotura e o que condiciona o seu traçado. Além disto, também se extraiu dos ensaios informações importantes para a validação da proposta de classificação de elementos estruturais de madeira antiga defendida na tese realizada por Sónia Franco, sendo disto exemplo a resistência característica à compressão paralela ao fio ($f_{c,o,k}$). Por outro lado, os ensaios à flexão implicaram a aplicação dos critérios de inspeção visual, definidos na proposta de classificação referida, a um número considerável de amostras o que serviu para validar ou criticar os critérios estipulados e os valores limite fixados. Também facultaram informação a respeito de grandezas essenciais para legitimar os valores de cálculo convencionados nessa mesma proposta de classificação, como são os casos do módulo de elasticidade (E_{mean}) e a resistência característica à flexão ($f_{m,k}$). Os dois conjuntos de ensaios permitiram ainda chegar a uma melhor percepção e compreensão do comportamento da madeira quando sujeita a diferentes tipos de esforços, evidenciando algumas situações particulares onde se demonstra o papel importante que assume os coeficientes de segurança utilizados no cálculo de estruturas. Nos pontos seguintes, expõe-se todas as características e particularidades dos ensaios realizados e dos provetes testados.

4.2. CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

As amostras de madeira antiga analisadas e utilizadas nos ensaios tiveram diferentes origens e por isso surge a necessidade de apresentar e identificar as suas proveniências e consequentemente as suas particularidades. Esta exposição encontra-se separada em duas partes, uma referente às amostras dirigidas para os ensaios à compressão paralela ao fio e uma outra apresentando as vigas talhadas para os ensaios à flexão. Trata-se de provetes de Castanho e Carvalho, com defeitos, de corte regular e provenientes de diferentes locais, como será demonstrado de seguida e com idades distintas, conforme descrição específica que em seguida se apresenta.

4.2.1. AMOSTRAS PARA OS ENSAIOS À COMPRESSÃO PARALELA AO FIO

Relativamente aos ensaios de compressão, as amostras têm a forma de paralelepípedos de faces quadradas e foram designadas por “Ac” e “Dc” uma vez que apresentam origens distintas: o conjunto de amostras designado por “Dc” (“D” provém da palavra “Definitivas” e “c” por serem os provetes destinados aos ensaios de compressão) resultou de um aproveitamento das pontas de viga ensaiadas para a tese da Sónia Franco oriundas de um edifício em reabilitação na zona da ribeira do Porto, situado junto à Rua Infante D. Henrique e inserido no quarteirão do Infante. A palavra “Definitivas” surge no seguimento de alguns testes realizados antes de se começar a contabilizar os ensaios, dos quais os provetes ensaiados tomaram a designação de “provetes-teste”. Os provetes foram retirados das partes não danificadas das vigas referidas e cortados com as dimensões $0,12 \times 0,12 \times 0,30 \text{ m}^3$, resultando deste processo um total de vinte e oito (28) provetes com as condições necessárias para serem testados.

Convém referir que os provetes do lote “Dc” possuem uma dupla numeração, sendo que uma delas se refere à ordem com que foram ensaiados e a outra indica a viga de onde a amostra em questão foi retirada. Neste sentido, a numeração que apresenta a sigla “Dc” revela a ordem de ensaio enquanto a numeração gravada na madeira, num canto da peça, faz referência à viga original.



Fig.4.1 – Amostras do lote “Dc”

No que diz respeito ao lote designado por “Ac” (a sigla justifica-se apenas para a diferenciar do lote anterior) a origem da madeira provem de um lote de madeira ardida retirada de um palacete em Braga do início do século XX (ver figura 4.2) e foram cortadas com as mesmas dimensões dos provetes do lote “Dc” referido anteriormente, isto é, $0,12 \times 0,12 \times 0,30 \text{ m}^3$. Este lote era constituído por cinquenta e um (51) provetes.



Fig.4.2 – Origem da madeira ardida. Esquerda: vista exterior sobre o palacete; Direita: Pormenor de um travamento realizado em madeira.

Todos os provetes de ambos os lotes, tanto do “Ac” como do “Dc”, apresentam as faces bem cortadas, com as arestas bem definidas e com as dimensões rigorosas. O que se acaba de dizer foi comprovado pela medição exaustiva de todas as amostras antes de as submeter ao respectivo ensaio, já que constituía um procedimento para a determinação da massa volúmica.



Fig.4.3 – Preparação das amostras “Ac”. Esquerda: viga de madeira de Carvalho ardida; Centro: corte realizado sobre as vigas; Direita: aspecto final dos provetes “Ac”

Apesar do cálculo da massa volúmica não ser necessário neste somatório de ensaios à compressão, achou-se por bem ter um conjunto de informações completas a respeito das amostras, incluindo assim a estimativa da massa volúmica.

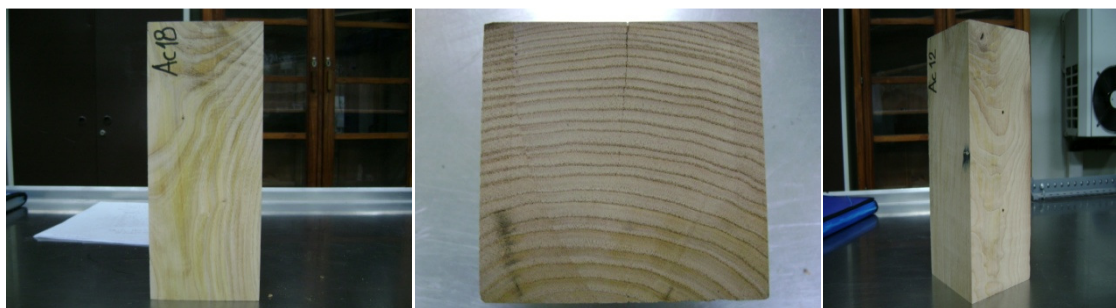


Fig.4.4 – Amostras do lote “Ac”

4.2.2. AMOSTRAS PARA OS ENSAIOS À FLEXÃO

As amostras destinadas aos ensaios à flexão podem ser separadas em dois grupos que se distinguem tanto pela sua origem como pelas suas dimensões. Nos dois casos é de referir que todas as faces foram identificadas e numeradas de um a seis (1 a 6) com a letra “F” colocada antes do respectivo número. Isto foi necessário porque tornou-se importante registar a presença de defeitos e implicitamente as faces onde estes se manifestavam, detalhando assim a inspeção visual realizada para validar a classificação proposta.

O primeiro grupo de vigas ensaiadas recebeu a sigla “D” por apresentar a mesma origem dos provetes do lote “Dc” utilizado nos ensaios à compressão paralela ao fio, isto é, foram retiradas de zonas não afectadas de vigas previamente testadas para uma outra prova de mestrado. Estas vigas foram devidamente cortadas com as dimensões $0,05 \times 0,05 \times 1,0 \text{ m}^3$, sendo as bases de topo quadradas com cinco (5) centímetros de aresta, e apresentam a dupla numeração que também caracteriza os provetes “Dc” dos ensaios à compressão, cada uma com o mesmo significado anteriormente descrito para estes provetes.

No que diz respeito às vigas do lote “D” verificou-se que o corte longitudinal não apresenta em nenhum caso o comprimento desejado de um metro (1,0 m), possivelmente devido ao mecanismo de corte associado. Os diferentes comprimentos destes provetes encontram-se expostos de uma forma mais detalhada no quadro correspondente à determinação da massa volúmica do capítulo cinco (quadro 5.1), sendo que a diferença entre o comprimento real e comprimento desejado não é de todo relevante. De resto pode-se afirmar que as vigas ostentavam, antes de serem submetidas aos ensaios,

arestas bem definidas e faces ortogonais entre si mas evidenciando defeitos com diferentes níveis de importância face à dimensão da peça. O lote era constituído por vinte e sete (27) provetes, cada um deles apresentando as características descritas.



Fig.4.5 – Amostras do lote “D”

A integridade das peças era apreciável demonstrando uma grande qualidade visual, salvo algumas excepções onde se verificaram algumas fissuras e mesmo alguns descaios, causados porventura pelos ensaios realizados sob as vigas originais de onde foram extraídas. Nestas excepções a falta pontual de pedaços de madeira motivada por possíveis degradações foi colmatada por material de muita fraca resistência o que constitui um facto a ter em conta na análise dos resultados obtidos.

O segundo lote de provetes que foi submetido aos ensaios de flexão apresentava na sua constituição vigas com tamanho superior relativamente ao primeiro grupo apresentado, evidenciando um corte rigoroso com dimensões de $0,06 \times 0,10 \times 1,90 \text{ m}^3$. Este conjunto de vigas tomou a designação de “Grandes” por esse motivo o que implicou uma representação da letra “G” seguida do respectivo número de ensaio numa das faces da amostra. Na totalidade, o lote era composto por cinquenta e duas (52) vigas de Carvalho, com as dimensões referidas e a respeito das quais se sabia que eram oriundas do referido palacete.

Os factos observados para o lote “D”, enumerados em parágrafos anteriores, servem para caracterizar na mesma medida as vigas pertencentes a este lote “G”, ou seja, a boa definição das arestas, a falta pontual de pedaços de madeira em algumas vigas, a integridade geral das vigas e o paralelismo ou ortogonalidade das faces (conforme o caso) são marcas das amostras adquiridas para a realização destes ensaios.



Fig.4.6 – Preparação das amostras “G”. Esquerda: vigas de madeira ardida retiradas do palacete; Direita: aspecto final dos provetes “G”



Fig.4.7 – Amostras do lote “G”

4.2.3. GENERALIDADES RELACIONADAS COM AS AMOSTRAS

Resumidamente, contabilizaram-se assim cento e cinquenta e oito (158) amostras preparadas e marcadas para a realização dos ensaios, sendo que setenta e nove (79) estavam orientadas para os ensaios de compressão paralela ao fio enquanto as outras setenta e nove (79) foram cortadas para serem ensaiadas à flexão.

Como foi referido anteriormente, parte destas amostras tiveram a sua origem em vigas de maiores dimensões provenientes de um edifício antigo e posteriormente submetidas a ensaios de compressão e flexão com a finalidade de se extrair conclusões para a elaboração de uma tese.

A determinação da massa volúmica contou, como se poderá constatar mais à frente neste capítulo, com a medição e pesagem de todos os provetes de todas os lotes exceptuando do lote “G”. Isto ficou-se a dever às grandes dimensões das peças, capazes de impossibilitar o seu fácil manuseamento e transporte desde o local de ensaio até à pesagem, fazendo com que esta tarefa envolvesse apenas metade do número total de amostras do lote.

Quadro 4.1 – Número total de amostras

Lotes	Nº Amostras
Dc	28
Ac	51
D	27
G	52
TOTAL	158

Algumas amostras, apesar de terem sido testadas, não contribuíram com os seus resultados para o registo final de valores porque os ensaios associados a estas amostras não foram considerados válidos. Os motivos que estiveram na origem deste sucedido vão desde a não colocação do LVDT (instrumento que mede os deslocamentos sofridos pelas amostras por aplicação crescente da carga) no local apropriado até à curta duração do ensaio relativamente ao tempo mínimo estipulado pela norma que regula os ensaios em questão (EN 408 [12]). A exposição dos motivos associados a cada caso em particular apresenta-se mais à frente neste texto, incluindo a justificação pela qual um determinado ensaio não foi considerado válido.

Com o objectivo de se compreender melhor o comportamento da madeira de Castanho utilizada nestes ensaios, procura-se expor as características da espécie dividindo a informação nos pontos seguintes:

- Identificação geral – contém a informação relacionada com a procedência, a durabilidade natural e a impregnabilidade, isto é, facilidade de absorção de produtos líquidos por parte da madeira;
- Identificação dos valores médios das propriedades físicas e mecânicas mais importantes;
- Breve descrição da espécie, apresentando algumas particularidades do lenho;

A apresentação das características da madeira de Castanho e de Carvalho é feita de forma esquemática e surge apenas como uma medida complementar de apoio à compreensão do comportamento destas espécies de madeira quando sujeitas a esforços de compressão e flexão (ver Quadro 4.2 e Quadro 4.3 respectivamente).

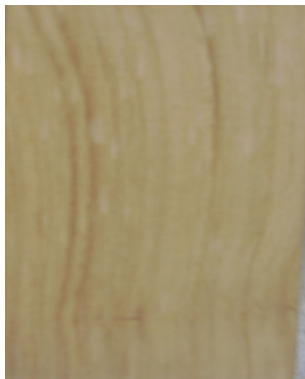
Quadro 4.2 – Características gerais da madeira de Castanho

CASTANHO

	Identificação Designação botânica: <i>Castanea sativa</i> Mill Designação comercial: Castanho (PT), Castagno (ITA), Castaño (ESP), Châtaigner (FRA), Edelkastanie (ALE), Procedência: Bacia mediterrânea e Ásia Durabilidade Natural: durável a fungos, sensível a carunchos e medianamente durável a térmitas.
	Impregnabilidade: cerne pouco impregnável e borne medianamente impregnável.
	Propriedades físicas: Densidade: 540 – 590 – 650 kg/m ³ Retracção: pouco nervosa Dureza: média (2, 1-2, 5)
	Propriedades mecânicas (peças limpas): Resistência à Compressão paralela ao fio: 45 MPa Resistência à Flexão: 100 MPa
	Descrição: Madeira de folhosa, pálida ou castanha, de cerne distinto, poro em anel, textura grosseira e não uniforme, com veios marcados e por vezes ondulado, dura, leve, fácil de trabalhar e durável. Conserva-se melhor dentro de água do que exposto ao ar. É atacada pelo caruncho. Devido à presença de taninos podem aparecer colorações azuis escuras quando a madeira entre em contacto com metais férricos (Botelho, 2006).

Quadro 4.3 – Características gerais de madeira de Carvalho

CARVALHO



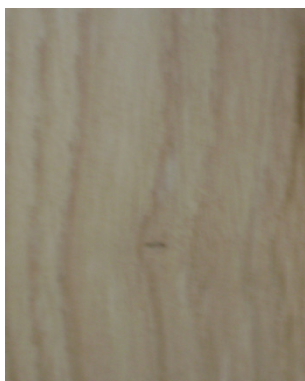
Identificação

Designação botânica: *Quercus robur* L.

Designação comercial: Carvalho (PT), Oak (IN), Chêne (FRA), Rovere (ITA), Stieleiche (ALE), Roble europeu (ESP)

Procedência: Europa, Ásia menor, Norte de África

Durabilidade Natural: durável a fungos, sensível a carunchos medianamente durável a térmitas



Impregnabilidade: cerne durável, borne sensível (caruncho pequeno).

Propriedades físicas:

Densidade:

610 – 710 - 760 kg/m³

Retracção:

Medianamente nervosa

Dureza:

Moderadamente dura (3,5-4,4)



Propriedades mecânicas (peças limpas):

Resistência à Compressão paralela ao fio:

50 MPa

Resistência à Flexão:

120 MPa



Descrição:

Madeira de folhosa, com cerne de cor castanho-amarelo claro a castanho e borne um pouco mais claro. A madeira de borne está completamente diferenciada, com anéis de crescimento bem visíveis e muito demarcados. Apresenta fibra recta e grão grosso e um odor bastante forte. A madeira descreve-se como ácida e pode corroer metais como ferro ou o aço em contacto com ela. Os vapores provenientes da madeira verde podem também ser muito corrosivos (Peraza, 2004).

4.3 CLASSIFICAÇÃO VISUAL DAS AMOSTRAS À FLEXÃO

4.3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A tentativa de classificação visual de peças estruturais de madeira antiga é uma das bases que sustentam a realização desta dissertação. Trata-se de uma metodologia que exige rigor no detalhe e conhecimento a respeito da madeira (características intrínsecas, factores que afectam a resistência mecânica e outras particularidades importantes para o estudo estrutural da madeira) à entidade individual ou colectiva responsável pela inspecção visual.

Ao longo do processo de execução dos ensaios de flexão, procurou-se identificar, registar e descrever as características visuais mais marcantes dos provetes (pertencentes aos lotes “D” e “G”). Com base nestes elementos, e tendo presente os critérios de limitação de defeitos definidos no “método Amorim Faria” classificaram-se todas as amostras, que foram submetidas aos ensaios de flexão, numa das duas classes qualitativas propostas: *Aprovada* (caso a peça cumprisse os limites definidos) ou *Rejeitada* (caso excedesse os valores definidos no quadro 3.6).

4.3.2. APLICAÇÃO DO MÉTODO “AMORIM FARIA” ÀS AMOSTRAS À FLEXÃO

4.3.2.1. Procedimento seguido na aplicação do método

O primeiro passo dado no sentido de se classificar os provetes de madeira antiga disponíveis para os ensaios à flexão consistiu na aprendizagem do método, nomeadamente absorvendo a informação referente às suas considerações iniciais e às formas de medição dos defeitos. Para isto recorreu-se à bibliografia relacionada com os procedimentos de medição de defeitos em peças de madeira (o capítulo três da dissertação de Sónia Franco (Franco, 2008) foi a principal base consultada e estudada).

Depois de se ter percebido de que forma se consegue medir os defeitos mais importantes das peças de madeira, procurou-se aplicar os conhecimentos adquiridos aos lotes “D” e “G” que no total perfazem setenta e nove (79) amostras. Em cada uma delas, o trabalho começou com uma análise visual geral, tentando identificar a localização dos defeitos para de seguida, com o auxílio de uma fita métrica (comprimentos na ordem das dezenas de centímetro) ou com uma régua de maior precisão (para dimensões que não alcançavam os dez centímetros), se concluir a sua medição. As medições realizadas para cada amostra incidiram sobre as dimensões relacionadas com os defeitos considerados, nomeadamente: diâmetro dos nós; comprimento do descaio; inclinação do fio; comprimento das fendas de secagem (repassadas ou não repassadas).

O procedimento descrito no parágrafo anterior, realizado sobre as setenta e nove (79) vigas de madeira antiga disponíveis, foi acompanhado por um registo fotográfico do aspecto geral e dos defeitos medidos para posterior classificação.



Fig.4.8 – Tipo de registo fotográfico realizado. Esquerda: pormenor de um defeito; Direita: vista geral de uma viga

Além do registo fotográfico realizado no desenvolvimento do processo de análise das peças, também se registou toda a restante informação julgada relevante e que resultou do processo de medição das dimensões dos defeitos considerados. Assim foi possível comparar a grandeza dos defeitos com os valores limitadores presentes no quadro 3.6 alusivos às peças de madeira de Castanho e de Carvalho. Com base nesta informação consegue-se rotular as peças com uma das duas classes definidas pelo “método Amorim Faria” através de uma comparação, estendida a todos os defeitos analisados, entre o valor obtido por medição no local e o valor definido no quadro 3.6. O registo adquiriu uma forma uniformizada para todas as amostras como se pode verificar no ponto 4.3.2.2.

O processo de classificação descrito ao longo dos parágrafos anteriores foi realizado imediatamente antes do ensaio de flexão da viga analisada. Neste sentido, as etapas abrangidas por este processo foram condicionadas pelo pouco tempo disponível antes da realização dos ensaios mecânicos, conduzindo a um esforço complementar para se conseguir extrair o máximo de informação possível.

Resumidamente, a metodologia de classificação visual de peças estruturais de madeira antiga englobou as seguintes etapas (até ao ensaio mecânico à flexão):

- Análise visual da peça de madeira, observando o seu aspecto geral e identificando os defeitos presentes em todas as faces;
- Registo fotográfico, evidenciando o aspecto da amostra e os defeitos contidos nas faces; registo do aspecto de todas as faces mesmo não tendo defeitos;
- Medição das dimensões dos defeitos considerados segundo as metodologias de medição sugeridas;
- Registo da informação obtida na medição dos defeitos preenchendo um quadro-tipo, utilizado para todas as amostras;
- Comparação dos valores medidos com os valores definidos pelo “método Amorim Faria” e atribuição de uma classe qualitativa de acordo com as conclusões provenientes dessa comparação.

Após a execução do ensaio mecânico de cada uma das setenta e nove (79) vigas testadas à flexão, comparou-se a classe qualitativa atribuída com o comportamento evidenciado durante o ensaio com o objectivo de validar a capacidade do observador e os critérios definidos pelo método de classificação visual. Esta comparação foi auxiliada pela visualização de filmes dos ensaios realizados.

4.3.2.2. Tipologia dos registos realizados

Neste ponto apresenta-se a forma dos registos efectuados ao longo do processo de classificação, expondo os elementos que compõem o registo fotográfico e o quadro-tipo de registo das medições realizadas. Os registos ilustrados referem-se à amostra G5 (ver figura 4.9 e quadro 4.4).



Fig.4.9 – Registo fotográfico realizado para a amostra G5

Quadro 4.4 – Ficha de classificação visual (amostra G5)

FICHA DE CLASSIFICAÇÃO VISUAL	
LOTE	G
AMOSTRA	5
ESPÉCIE	Carvalho
MASSA VOLÚMICA (AMOSTRA)	593,9 Kg/m ³

ANÁLISE DE DEFEITOS
NÓS
Face F2: nó alongado com $d = 3,5$ cm (próximo do meio vão) nó com $d = 2,0$ cm (próximo mas não agrupado com o anterior) Face F3: nó com $d = 2,5$ cm (próximo do meio vão) Face F4: nó muito alongado com $d = 1,5$ cm (meio vão)
DESCAIO
Não apresenta descaio (tem um pequeno destacamento na zona de aplicação da carga mas não tem a forma de descaio).
INCLINAÇÃO FIO
A inclinação do fio é facilmente observável pela inclinação das fendas. Neste caso pode-se considerar desprezável (fio quase alinhado com o eixo da peça).
FENDAS
Face F4: conjunto de fendas agrupadas tapadas com serradura junto ao apoio; Face F6: $L_{f,6} = 57\text{cm} > L/4 = 47,5$ cm; aparenta ser apenas superficial, $f_6 = 4,5$ cm (em 10 cm de altura da secção); Fenda não repassada com $f = 45\% h < 60\%h \rightarrow \text{OK}$
COMENTÁRIOS
• Não apresenta sinais visíveis de alterações provocadas por ataque biológico; • Apresenta alguns buracos negros na face F1 (associados aos pregos utilizados na soalha à peça); coloração devida à propagação do fogo nos buracos; • Bom estado geral da viga.

QUALIDADE (PROPOSTA DE CLASSIFICAÇÃO <i>IN SITU</i>)	APROVADA
---	-----------------

4.3.2.3. Classificação final do conjunto de amostras ensaiadas

Depois de se ter ilustrado o tipo de registo realizado para cada viga, mostra-se agora o conjunto de classificações atribuídas às amostras ensaiadas. Esta informação encontra-se sintetizada nos quadros 4.5 e 4.6 aplicáveis para os lotes “D” e “G”, respectivamente. Nas vigas aprovadas os eventuais defeitos existentes satisfazem os limites máximos estabelecidos no método.

Quadro 4.5 – Classificação visual atribuída às amostras do lote “D”

Amostra	Classificação	Observações
D1	Aprovada	
D2	Aprovada	
D3	Aprovada	
D4	Rejeitada	zona degradada (ataque biológico) conjugada com nós foi condicionante
D5	Aprovada	
D6	Rejeitada	Fenda não repassada condicionante
D7	Rejeitada	nó junto ao apoio direito ocupa a totalidade da secção (grandes dimensões)
D8	Rejeitada	Fenda repassada condicionante
D9	Rejeitada	Fenda profunda que reduz a secção resistente ao longo de grande extensão da viga
D10	Aprovada	
D11	Aprovada	
D12	Rejeitada	Forma de descaio condicionante (grande "buraco")
D13	Aprovada	
D14	Rejeitada	Nó junto ao apoio direito formando um buraco na peça de grandes dimensões
D15	Rejeitada	Fenda repassada condicionante (percorre grande parte da secção)
D16	Rejeitada	Nós agrupados de grandes dimensões e com ataque biológico associado
D17	Rejeitada	Fenda repassada com grande extensão
D18	Aprovada	
D19	Rejeitada	Fenda com grande extensão e profunda
D20	Aprovada	
D21	Aprovada	
D22	Aprovada	
D23	Aprovada	
D24	Rejeitada	Forma de descaio condicionante
D25	Aprovada	
D26	Rejeitada	Nó de grandes dimensões com perda de material associada
D27	Rejeitada	Fendas que fragilizam a peça a meio vão

Quadro 4.6 – Classificação visual atribuída às amostras do lote “G”

Amostra	Classificação	Observações
G1	Rejeitada	Nó de grandes dimensões no local de aplicação da carga
G2	Rejeitada	Nó com d = 5 cm junto ao apoio do lado direito
G3	Aprovada	
G4	Aprovada	
G5	Aprovada	
G6	Aprovada	
G7	Rejeitada	Fendas na face F1 e F4 condicionantes
G8	Aprovada	
G9	Aprovada	
G10	Aprovada	
G11	Rejeitada	Fenda repassada (percorre a largura da F6 e tem extensão de 77 cm)
G12	Rejeitada	Zona do apoio direito muito afectada por nós e ataque biológico
G13	Aprovada	
G14	Rejeitada	Conjunto de fendas não repassadas com extensão elevada
G15	Aprovada	
G16	Aprovada	
G17	Rejeitada	Nó grande a meio vão condicionante (d = 5 cm)
G18	Aprovada	
G19	Aprovada	
G20	Rejeitada	Muitos nós ao longo das faces; meio vão afectado por nós grandes
G21	Rejeitada	Fendas não repassadas ao longo de toda a face F1
G22	Rejeitada	nó grande junto ao apoio direito na F3
G23	Rejeitada	nós e fendas a afectar muito o apoio esquerdo
G24	Aprovada	
G25	Rejeitada	apoio direito com mau aspecto e afectado por nó de aresta grande (entre F1 e F2)
G26	Aprovada	

Amostra	Classificação	Observações
G27	Aprovada	
G28	Aprovada	
G29	Aprovada	
G30	Rejeitada	conjunto de fendas na F4 e visíveis na F5 muito profundas
G31	Aprovada	
G32	Aprovada	
G33	Aprovada	
G34	Rejeitada	fenda na aresta de F4 e F1 com grande extensão e profunda
G35	Aprovada	
G36	Aprovada	
G37	Aprovada	
G38	Aprovada	
G39	Aprovada	
G40	Aprovada	
G41	Aprovada	
G42	Aprovada	
G43	Aprovada	
G44	Aprovada	
G45	Aprovada	
G46	Aprovada	
G47	Aprovada	
G48	Rejeitada	nó no apoio esquerdo condicionante
G49	Rejeitada	concentração de nós grandes e fendas importantes
G50	Aprovada	
G51	Aprovada	
G52	Aprovada	

Verifica-se assim um número elevado de rejeições que resulta do facto da madeira ser proveniente de madeira serrada obtida a partir de toros (vigas) de Castanho bastante antigas, oriundas de um edifício do Porto e de um lote de madeira de Carvalho que tinha sofrido um incêndio. Assim, no lote “D” foram rejeitadas catorze (14) amostras em vinte e sete (27), cerca de 52%, e no lote “G” quinze (15) amostras em cinquenta e duas (52) o que perfaz 29% do total.

4.4. DETERMINAÇÃO DA MASSA VOLÚMICA

4.4.1. GENERALIDADES

A massa volúmica constitui uma das propriedades físicas mais importantes da madeira, pois dela dependem a maior parte das suas propriedades físicas, servindo na prática como referência para a classificação da madeira. Como seria de esperar face à grande variabilidade existente na estrutura interior do lenho, cada espécie exhibe uma massa volúmica característica. Contudo dentro de uma espécie podem surgir variações mais ou menos significativas à volta do valor desta massa volúmica característica.

Esta grandeza é calculada pelo quociente entre a massa da amostra e o respectivo volume, expresso em Kg/m^3 . Por um lado, obteve-se a massa do provete de madeira por pesagem, usando uma balança digital (fornecendo valores em quilogramas com quatro casas decimais), enquanto o volume foi determinado por medição das suas arestas recorrendo a uma régua metálica, no caso dos provetes que foram ensaiados à compressão, ou a uma fita métrica no caso dos provetes submetidos a ensaios de flexão. Estas tarefas representaram um procedimento simples, rápido e estenderam-se a todas as amostras dos quatro lotes ensaiados.



Fig.4.10 – Pesagem de vigas

4.4.2. AMOSTRAS ENSAIADAS À COMPRESSÃO AXIAL

De acordo com as especificações da NP 616 [13], norma que regula o processo de determinação da massa volúmica, o provete deve ser de madeira sã e isenta de nós, fendas ou outros defeitos e ter, de preferência a forma cúbica de vinte milímetros de aresta (20 mm). Contudo, a norma refere que podem ser utilizados outros provetes desde que tenham uma forma prismática e que as suas dimensões, em qualquer das direcções, estejam compreendidas entre vinte e sessenta milímetros (20 e 60 mm). Com isto, apesar de os provetes ensaiados terem a forma prismática, as suas dimensões não estão abrangidas pelo intervalo apresentado na norma uma vez que a secção transversal tem doze centímetros de aresta e as faces laterais apresentam trinta centímetros de aresta. Além disto, as peças ensaiadas não se encontravam limpas, isto é, evidenciavam a presença de defeitos.

Apesar do que se acaba de dizer, optou-se por seguir a metodologia apresentada na norma para obtenção da massa volúmica, tomando os seus resultados como uma boa aproximação do real valor.

A massa volúmica está intimamente relacionada com o teor de água e os seus valores vêm sempre associados a ele, sendo por isso importante que tanto o peso das amostragens como o seu volume sejam determinados com o mesmo teor de água.

Como a pesagem das amostras e a medição das arestas foram realizadas no mesmo local e em instantes consecutivos, considerou-se que o teor de água, apesar de não ter sido determinado, era exactamente igual nas duas operações para cada provete. Por outro lado, o local onde se realizaram estas tarefas foi o mesmo para todas as amostras e o espaço temporal entre ensaios não foi muito amplo (aproximadamente uma semana), significando isto que as variações de temperatura não foram expressivas e consequentemente o teor de água pode ser considerado o mesmo para toda a campanha experimental.

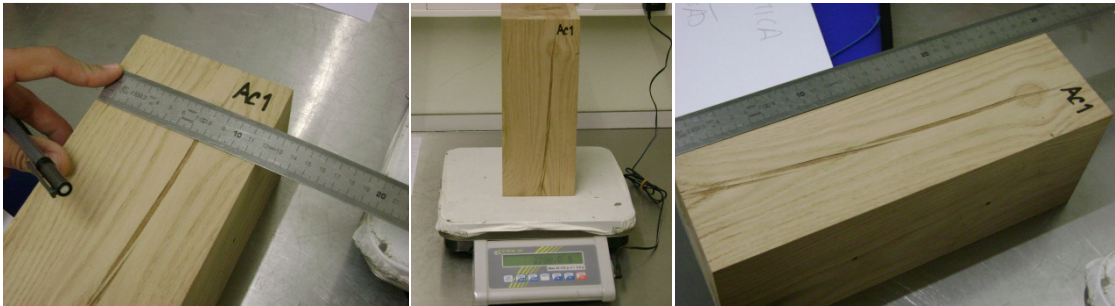


Fig.4.11 – Medição e pesagem das amostras dos lotes “Ac” e “Dc”

A norma NP 618 [15] indica que a temperatura e o teor em água do provete no momento de ensaio devem estar compreendidos, respectivamente, entre 17°C e 23°C e entre 9% e 15%. Considerou-se que a temperatura atingida durante o ensaio manteve-se sempre dentro do intervalo aconselhado na norma assim como também para o caso do valor de teor de água do local onde se executaram os testes.

4.4.3. AMOSTRAS ENSAIADAS À FLEXÃO

O procedimento para a determinação da massa volúmica dos provetes dos lotes “D” e “G” orientou-se pelas mesmas linhas gerais apresentadas anteriormente para o caso das amostras que foram ensaiadas à compressão. Neste sentido, o cálculo da massa volúmica partiu de uma pesagem da maior parte das vigas dos dois lotes concluindo-se com a medição das suas arestas da secção transversal e do seu comprimento.

Na pesagem das vigas de maior comprimento, isto é, na pesagem das vigas do lote “G”, teve-se o cuidado de centrar o provete no prato da balança para evitar o surgimento de resultados adulterados devido ao mau posicionamento. O que se acaba de referir também se aplicou para as vigas do lote “D” mas numa escala inferior, uma vez que eram de menores dimensões e o efeito do mau posicionamento não era tão notório.

Os objectivos da determinação da massa volúmica encontram-se explicados na parte inicial do capítulo cinco.

4.5 ENSAIOS À COMPRESSÃO

4.5.1. INTRODUÇÃO AO TRABALHO DESENVOLVIDO

Foram realizados, no Laboratório de Sistemas e Componentes da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), ensaios mecânicos sobre provetes de madeira com dimensões pré-definidas e com defeitos, retirados de peças maiores, conforme já foi mencionado.

A realização dos ensaios de compressão teve como principal objectivo estimar o valor máximo da tensão de rotura das amostras em relação a este esforço e com isto determinar a resistência característica à compressão paralela ao fio ($f_{c,0,k}$), contribuindo para a validação da proposta de classificação visual em análise. Nesta proposta de classificação visual foi indicado um valor para a grandeza referida (resistência característica à compressão paralela ao fio) e a realização de um número considerável de ensaios permitiu criticar o valor exposto, aprovando-o caso estivesse pelo lado da segurança ou então rejeitando-o caso fosse inferior ao valor estimado com o conjunto de amostras.

Existem dois tipos de ensaio à compressão: ensaios em que a carga é aplicada paralelamente às fibras da madeira (paralelos ao fio) e outros onde a carga incide sobre a peça de uma forma perpendicular às fibras (perpendiculares ao fio). Nesta campanha experimental, os setenta e nove (79) ensaios de compressão foram executados segundo o esquema apresentado mais à esquerda na figura seguinte (Figura 4.5), ou seja, as peças de madeira foram testadas por ensaios de compressão paralela ao fio. Neste sentido, a resistência ao esforço de compressão paralelo às fibras ou compressão axial é estimada através da aplicação de uma carga no sentido das fibras da madeira, até à rotura.



Fig.4.12 – Tipos de ensaios à compressão

Como foi referido anteriormente, a norma EN 408 rege este tipo de ensaios, tanto no que diz respeito ao esquema de ensaio e ao seu procedimento como em relação aos provetes a testar. No ponto 4.2.1 deste capítulo, descreveu-se sucintamente os provetes que foram ensaiados à compressão axial, referindo que eram peças com trinta centímetros (30 cm) de comprimento e de secção transversal quadrada com doze centímetros (12 cm) de aresta. A norma estipula que a peça deve corresponder à totalidade da secção transversal e ter um comprimento de seis vezes a menor dimensão da secção transversal, o que não acontece neste caso porque se procurou minimizar alguns efeitos que se verificam habitualmente para peças esguias. Apesar disto achou-se conveniente executar os ensaios segundo a EN 408 [12].

A norma indica que as superfícies dos topos devem ser cuidadosamente preparadas para assegurar que são planas, paralelas uma à outra e perpendiculares ao eixo da peça. Esta parte foi cumprida com rigor pelas amostras já que vão ao encontro do disposto na EN 408 [12], analogamente ao referido no ponto 4.2.1.

A definição das dimensões dos provetes utilizados nos ensaios de compressão é uma medida com alguma relevância já que o comprimento e a dimensão da secção transversal são factores com influência na resistência à compressão axial da madeira:

- Se o comprimento da peça for excessivamente grande, esta terá mais tendência a quebrar, rachar e empenar o que se traduz numa diminuição considerável na resistência à compressão axial;
- Quanto maior for a dimensão da secção transversal, menor será a expansão transversal da madeira (dilatação), significando um aumento de resistência à compressão paralela às fibras.

4.5.2. ESQUEMA DE ENSAIO

O ensaio de compressão axial, realizado segundo a norma EN 408 [12], é de execução relativamente simples, já que não provocou dificuldades acrescidas neste processo experimental, e consiste na transmissão de uma carga ao provete através de um dispositivo que permita esta aplicação da força sem induzir flexão. No caso da prensa disponível no Laboratório de Sistemas e Componentes, a força é induzida à amostra pela subida gradual (através do sistema hidráulico) do prato inferior enquanto o prato superior permanece fixo.



Fig.4.13 – Vistas do ensaio de compressão axial

A carga é transmitida à amostra e aplicada de forma crescente até à rotura procurando-se, como indicado na norma, que a força máxima seja atingida num intervalo de trezentos mais ou menos cento e vinte segundos (300 ± 120 s). Convém referir que para se atingir a carga máxima no intervalo pretendido, a velocidade foi determinada com base nos resultados de ensaios preliminares, não numerados e designados por “ensaios de teste”. É de salientar ainda que a força de rotura é igual à força máxima aplicada.

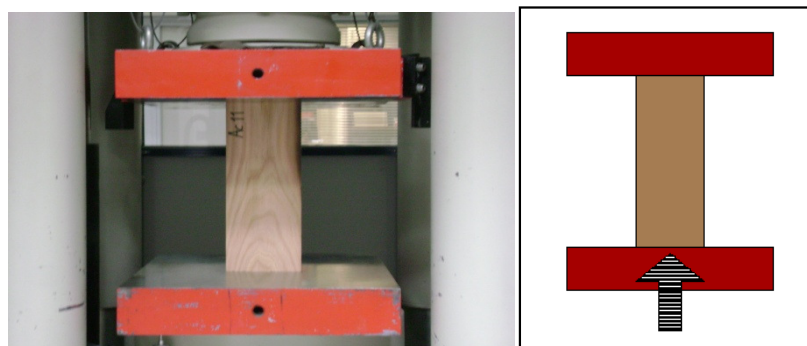


Fig.4.14 – Transmissão da carga pela subida do prato inferior

Relativamente à prensa onde se executaram os ensaios, salienta-se o fácil manuseamento que permite e a possibilidade, ainda que relativa, de executar ensaios de uma forma sistemática. O equipamento de carga respeita o que a norma EN 408 [12] exige já que apresenta uma precisão de 1% da força aplicada à peça. A máquina encontra a sua limitação no sistema hidráulico que a movimenta uma vez que não possui um mecanismo próprio capaz de fazer descer o prato inferior quando este atinge o seu

deslocamento máximo. Isto impossibilitou a realização de muitos ensaios consecutivos, principalmente nos casos em que os provetes se deformavam mais porque era necessário esperar que o prato inferior descesse por acção da força gravítica.

O procedimento de ensaio encontra-se descrito e detalhado no ponto seguinte e por este motivo não se procedeu a uma exposição de todos os pormenores relativos ao ensaio neste momento.

4.5.3. PROCEDIMENTO DE ENSAIO À COMPRESSÃO AXIAL

Os ensaios realizados têm um único procedimento em comum, já que se procurou que fossem executados sempre da mesma forma e tendo em atenção os mesmos cuidados. Neste sentido, as amostras envolveram um trabalho sistemático de medição, pesagem, registo escrito e visual das principais características, ensaio e registo tanto visual como escrito do comportamento observado. Os próximos parágrafos procuram descrever este processo mais detalhadamente, tentando evidenciar os pormenores e as tarefas associadas a cada um dos ensaios, tanto numa fase precedente à sua execução como numa fase posterior à sua conclusão.

O processo de ensaio começa com a preparação da amostra, onde acontece a sua identificação com a sigla correspondente ao lote a que pertence combinada com o número do teste. A amostra é posteriormente pesada e medida para determinar a massa volúmica, matéria abordada mais à frente com maior detalhe.

Antes de se proceder à aplicação da carga no provete de madeira, registou-se toda a informação relevante, nomeadamente aspectos visuais marcantes nas faces da amostra como defeitos (nós, fendas, empenos, inclinação do fio, descaios e ataque biológico) e a sua localização particular na respectiva face, o seu aspecto geral e ainda comentários sobre o possível comportamento do provete. Este registo englobou tanto uma componente visual como uma componente escrita e foi importante na tentativa de justificar o comportamento característico de cada peça.



Fig.4.15 – Defeitos registados antes do ensaio

Como é facilmente perceptível pela análise da figura 4.8, o registo de informações relevantes associadas a cada provete assumiu-se como um elemento importante para perceber cada mecanismo de rotura em particular e o que condicionou a peça durante o aumento gradual da carga.

Depois de se terem registado os detalhes referidos, deu-se início à preparação do ensaio. Esta etapa englobou primeiramente o ajuste do provete na prensa, recorrendo mesmo à medição para garantir que este estava realmente centrado no prato inferior. A norma EN 408 [12] menciona que “O elemento de

ensaio dever ser carregado concentricamente, usando cabeças de carga esféricas ou outros dispositivos que permitam a aplicação de uma força de compressão sem induzir flexão”.

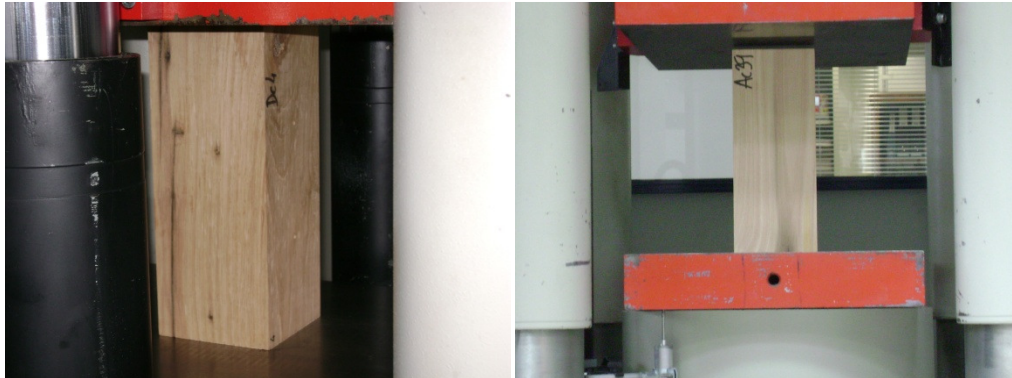


Fig.4.16 – Ajuste do prato superior à amostra

O procedimento seguinte consistiu em ajustar os pratos ao provete de madeira, através de uma aproximação gradual do prato superior, operação que é controlada manualmente pelo operador. Com os pratos devidamente ajustados o processo de ensaio inicia-se com a aplicação de uma pré-carga à peça de madeira, sendo transmitida gradualmente até atingir um valor próximo dos 30 kN.

O sistema de aquisição e recolha de dados era accionado após a colocação da pré-carga sobre o provete e depois disto procedia-se ao incremento de carga. Convém salientar a necessidade de se verificar o posicionamento do extensómetro em cada ensaio realizado para ter a certeza de que este não atingiu a sua amplitude máxima, devido às deformações sofridas pelo provete anterior. Caso isto acontecesse, implicaria a anulação do ensaio por falta de leitura dos deslocamentos.

A velocidade de aplicação da carga foi estipulada em 2,5 kN/s, tanto para as amostras do lote “Ac” como para o lote “Dc”, para tentar respeitar o disposto na norma EN 408 [12] no que refere à duração do ensaio, ou seja, para fazer com que se atinja o valor da carga máxima que a peça de madeira consegue suportar dentro do intervalo de trezentos segundos mais ou menos cento e vinte segundos (300 ± 120 s).



Fig.4.17 – Mecanismo de leitura e controlo do ensaio

Quando a peça atinge a carga máxima que é capaz de suportar começam a ser visíveis deformações e destacamentos de parte da sua secção, variando de amostra para amostra em expressão e grandeza.

Após atingir o pico de carga, verificou-se o decréscimo da carga (a diferentes velocidades conforme o provete fosse mais ou menos deformável) e deu-se por finalizado o ensaio quando a carga atingia valores da ordem dos trinta por cento (30%) do valor da carga máxima conseguindo obter assim uma resposta mais completa para além do pico de carga. Este facto não era muito importante para o estudo proposto, já que era fundamental apenas ter informações a respeito dos valores de cargas máximas obtidas para estimar a resistência à compressão paralela ao fio dos provetes ensaiados.

A conclusão de cada ensaio coincidia com a recolha dos dados do sistema de aquisição, gravando os ficheiros com a sigla própria e com a elaboração do registo visual e escrito do comportamento observado e dos fenómenos evidenciados pela amostra submetida a teste. Este registo engloba fotografias das diferentes faces da amostra focando aspectos marcantes, a caracterização escrita de factos relacionados com o comportamento da peça (carga máxima atingida, grau de deformação evidenciado, condicionalismos do mecanismo de rotura) e ainda uma comparação entre o que seria expectável, com base na observação do provete antes do ensaio, e aquilo que realmente se verificou.



Fig.4.18 – Rotura de uma amostra submetida ao ensaio de compressão axial

Resumidamente, o procedimento de ensaio pode ser descrito da seguinte forma:

- Coloca-se o provete centrado sobre o prato inferior da máquina e com o eixo vertical.
- Faz-se descer o prato superior até contactar com a face do provete, mas procurando não lhe transmitir forças;
- Aplicam-se forças progressivamente crescentes a um ritmo constante até se atingir a rotura do provete ao fim de cerca de cinco minutos (trezentos segundos);
- A força de rotura é a força máxima aplicada durante o ensaio;
- O término do ensaio depende da vontade do operador em prolongar mais ou menos o processo após ser atingida a força máxima.

Inicialmente o procedimento de ensaio não era exactamente igual ao exposto no decorrer deste ponto. Com o objectivo de ter uma maior exactidão nos valores das deformações obtidas, estava definida a colocação de dois extensómetros nas faces laterais do provete, capazes de medir a deformação do terço central da amostra, isto é, em vez de se ter apenas um extensómetro (LVDT) a medir o deslocamento entre placas, colocar-se-iam três extensómetros em cada provete de ensaio, dois deles nas faces laterais. Todas as amostras foram preparadas, na fase em que foram cortadas das peças de madeira originais, com dois pequenos furos em duas das suas faces que possibilitavam a cravação dos dispositivos de suporte dos extensómetros.

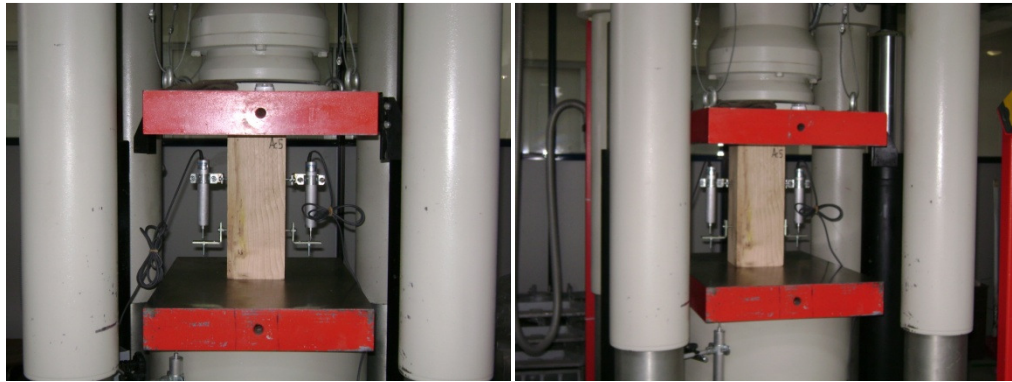


Fig.4.19 – Amostra exibindo a colocação dos três extensómetros

O procedimento de cravação e colocação dos extensómetros acarretava um aumento substancial do tempo de preparação da peça a ser ensaiada uma vez que a sua fixação exigia um alinhamento perfeito com as faces e boas condições de verticalidade para assegurar que a leitura obtida conduziria a resultados fidedignos. Por este motivo optou-se pela realização de alguns ensaios com os três extensómetros colocados e a medirem os respectivos deslocamentos, para se obter uma correlação entre os valores registados para as deformações no terço central e entre as placas da prensa. Assim, com base apenas nos valores dos deslocamentos entre placas era possível determinar a grandeza das deformações no terço central do provete sem se proceder à morosa colocação dos extensómetros laterais. Para este efeito, ou seja, para determinar a correlação entre deformações em pontos distintos, testaram-se, com três extensómetros, três amostras do lote “Dc” e cinco amostras do lote “Ac”. A diferença do número de amostras testadas entre lotes explica-se pela resposta obtida para as peças do lote “Dc” ser mais uniforme do que a verificada para as primeiras três amostras do lote “Ac”, o que justificou a realização de mais dois ensaios de provetes do lote “Ac” com os três extensómetros.

A correlação e a sua explicação desenvolvem-se no capítulo seguinte onde se comentam os tratamentos de dados e se analisam os resultados obtidos.

4.6 ENSAIOS À FLEXÃO

4.6.1. ASPECTOS GERAIS

Os ensaios de flexão realizados no âmbito desta campanha experimental fundamentam-se na norma EN 408 [12], nomeadamente nos pontos dez (10) e treze (13), que recomenda a utilização de provetes de tamanho real contendo defeitos, testando-os sobre condições normalizadas de temperatura e humidade relativa do ar.

Estes ensaios de flexão estática foram executados no Laboratório de Engenharia Sísmica e Estrutural (LESE) da FEUP e contaram com a colaboração de dois técnicos do laboratório na fase de preparação dos ensaios, na sua execução e na montagem dos dois esquemas de ensaio produzidos.

Os objectivos primordiais destes ensaios foram a obtenção de uma estimativa da resistência à flexão e do módulo de elasticidade à flexão para validar a proposta de classificação referida mais atrás nesta dissertação. Para isto, utilizaram-se os dois tipos de vigas anteriormente descritas: vigas pertencentes ao lote D (vigas com um metro de comprimento e secção transversal quadra de cinco centímetros de aresta) e as vigas do lote G (vigas com um metro e noventa centímetros de comprimento e secção transversal rectangular com dez centímetros de altura e seis centímetros de largura).

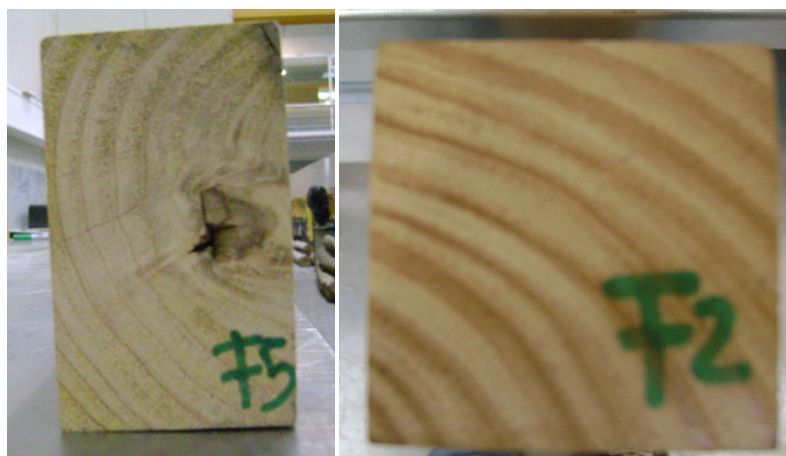


Fig.4.20 – Secção transversal dos dois tipos de amostras. Esquerda: lote “G”. Direita: lote “D”

Tal como se referiu no parágrafo anterior, os dois objectivos a atingir incluíam a determinação de duas propriedades físico-mecânicas da madeira: a tensão de rotura à flexão na direcção do fio e o módulo de elasticidade global. Através da análise da curva força-deslocamento obtida experimentalmente foi possível determinar a rigidez e a capacidade resistente dos elementos, assim como conhecer o seu modo de rotura.

Os ensaios mecânicos destrutivos, aplicados às setenta e nove vigas de madeira que compoñham os lotes, foram acompanhados por uma análise visual de defeitos e respectiva classificação utilizando a proposta de classificação definida no capítulo três, particularmente no ponto 3.3.3. Tratou-se de um procedimento estendido a todos os provetes, executado imediatamente antes da realização do respectivo ensaio, anotando todas as particularidades visíveis da viga e o possível posicionamento crítico dos defeitos intrínsecos à peça.

4.6.2. ESQUEMA DE ENSAIO

Como referido, a norma europeia EN 408 [12] especifica métodos de ensaio para a determinação do módulo de elasticidade em flexão e para a determinação da resistência à flexão de peças prismáticas de madeira. Estas duas propriedades são calculadas através de grandezas obtidas experimentalmente, recorrendo ao mesmo esquema de ensaio, ilustrado na norma na figura três (página onze do documento da EN 408 [12]). A figura seguinte é uma cópia do esquema apresentado na norma para a determinação das duas propriedades referidas e serviu de base à elaboração dos esquemas de ensaio tanto para as vigas do lote “D”, mais pequenas, como para as vigas do lote “G”, relativamente maiores.

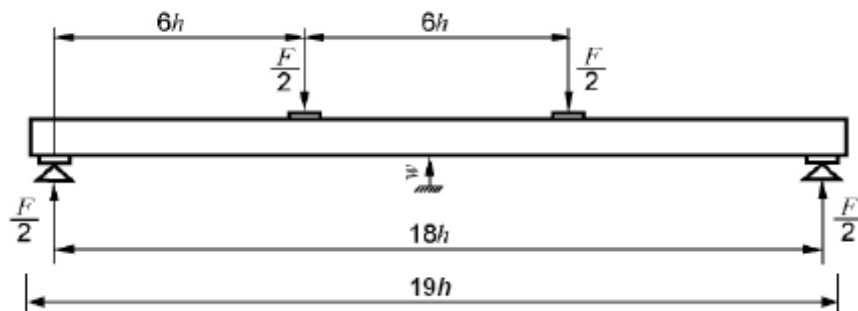


Fig.4.21 – Esquema de ensaio da norma EN 408

A norma europeia EN 408 [12] estabelece que a peça a ensaiar, simplesmente apoiada, deve ter normalmente um comprimento mínimo de dezanove vezes a altura da sua secção. Quando isto não for possível, quer por dificuldade em conseguir amostras com estas dimensões quer por incompatibilidade com o equipamento de ensaio, deve-se registar o vão da viga. Esta mesma norma estipula que a peça deve ser carregada simetricamente em flexão em dois pontos de um vão igual a dezoito vezes a altura da secção.

Refere ainda que, caso a peça e o equipamento não permitam que tais condições sejam perfeitamente atingidas, a distância entre os pontos de aplicação das forças e os apoios pode ser alterada de um valor não superior a 1,5 vezes a altura da secção da peça de madeira e que, por outro lado, o vão e o comprimento da peça podem ser alterados de um valor não superior a três vezes aquela altura, sem prejudicar o ensaio, prevendo assim uma relação vão/altura de: $L/h = 18 \pm 3$.



Fig.4.22 – Esquemas reais de ensaio. Esquerda: viga do lote “D”. Direita: viga do lote “G”

Como foi referido, os ensaios à flexão envolveram dois lotes de amostras com comprimentos e secções transversais distintas. Para ambos, o disposto na norma é cumprido já que as vigas possuem o comprimento mínimo estabelecido o que se traduz, mais concretamente, em noventa e nove centímetros de comprimento para as amostras do lote “D” (sendo que $L_{\min} = 19 \times 0,05 = 0,950$ m) e um metro e noventa centímetros para o conjunto “G” (com $L_{\min} = 19 \times 0,10 = 1,90$ m). Por outro lado, as peças foram carregadas de acordo com o esquema exibido na Figura 4.14, existindo um vão igual a dezoito vezes a altura da secção: para as vigas do lote “D” isto traduziu-se num vão igual a noventa

centímetros enquanto para as vigas do lote “G” o vão correspondente tinha um comprimento de um metro e oitenta centímetros.

Resumidamente, o ensaio consistiu na aplicação de duas cargas pontuais simétricas, aos terços de um provete de madeira simplesmente apoiado e com comprimento igual a dezanove vezes a sua altura (19h). Na figura 4.15 é possível observar o esquema de ensaio à flexão dos provetes de tamanho real realizado no LESE, mostrando o caso das vigas pequenas do lote “D” e o caso das vigas grandes do lote “G”.

Para conseguir que as vigas ensaiadas fossem ensaiadas segundo o esquema fixado na norma, ou seja, exibindo uma configuração de viga simplesmente apoiada, materializaram-se os apoios simples através de perfis metálicos com a forma de meio cilindro (identificam-se pela coloração amarela na Figura 4.16) e que permitem a livre rotação no plano do ensaio.



Fig.4.23 – Pormenor da zona de apoio

A transmissão de cargas à viga a ensaiar foi realizada por um único actuador hidráulico com uma célula de carga de 100 kN ligado a uma estrutura metálica de reacção. O actuador é controlado através de um sistema electrónico, que também é usado para a aquisição de dados relativos ao ensaio e manuseado pelo operador. A carga total é distribuída por dois pontos de aplicação com o auxílio de um perfil metálico tubular (tubo com secção quadrada e oca) colocado sobre o provete, apoiando-se neste por dois perfis pequenos idênticos aos que serviram para materializar os apoios simples.

A amostra a ensaiar assenta sobre uma estrutura metálica com peças amovíveis capazes de proporcionar diferentes vãos à configuração, conforme as dimensões da peça de madeira. Este facto foi importante na realização dos ensaios devido à necessidade de se testarem vigas de diferentes comprimentos o que implica a composição de dois vãos distintos.

A medição do deslocamento foi realizada por um extensómetro (LVDT) colocado a meio vão da amostra em ensaio com o referencial alojado na parte metálica do equipamento de teste pois era pousado na base deste. O extensómetro encontrava-se agarrado à peça de madeira através de um perfil que era colocado à volta da amostra e fixado a esta com o auxílio de um parafuso, tal como mostra a Figura 4.17 - esquerda. As medições lidas pelo extensómetro são recolhidas pelo sistema electrónico de aquisição de dados referido anteriormente.

Entre o actuador hidráulico, que proporciona a transmissão de cargas à amostra, e o perfil metálico, que ajuda à divisão da carga em duas forças equivalente, foi colocada uma folha de alumínio com o objectivo de permitir uma melhor transmissão de carga devido ao ajustamento mais perfeito que proporcionou entre a peça metálica rígida (tubo) e o provete.

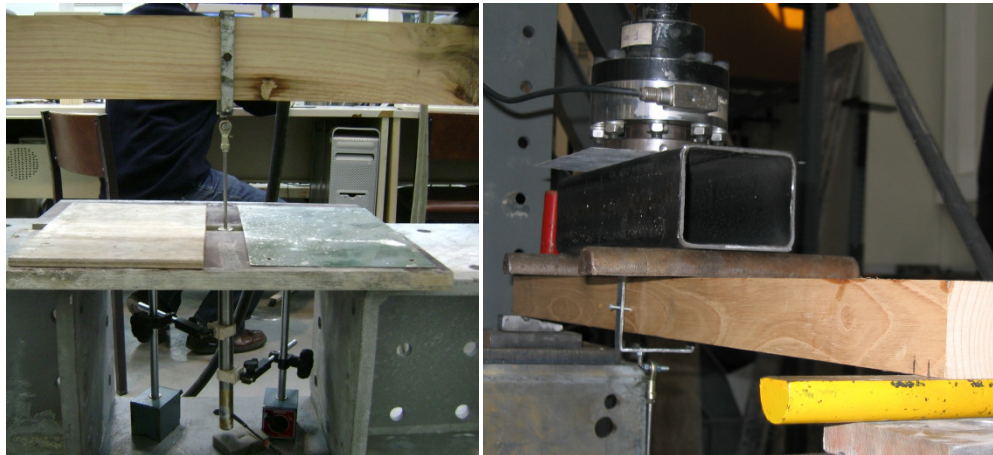


Fig.4.24 – Pormenores do esquema de ensaio. Esquerda: ligação do extensómetro à peça. Direita: zona de carregamento

Os ensaios de teste realizados ajudaram a perceber que seria necessário dotar o esquema de ensaio de dispositivos de protecção contra eventuais roturas frágeis das peças de madeira. Isto ficou claro quando um provetes rompeu bruscamente o que poderia ter provocado a destruição do extensómetro pelo perfil que se encontrava apoiado sobre a amostra. Neste sentido, optou-se por dotar o “Setup” com uma placa de madeira, colocada sobre a estrutura metálica e capaz de proteger o LVDT de possíveis roturas frágeis dos provetes.

4.6.3. PROCEDIMENTO DE ENSAIO À FLEXÃO

A realização dos ensaios de flexão iniciou-se com a preparação das vigas, identicamente ao que se passou nos ensaios de compressão, compreendendo as tarefas de identificação e determinação da massa e do volume das mesmas.

As vigas foram submetidas a uma inspecção visual detalhada, com recurso a fotografias e ao registo escrito das principais particularidades evidenciadas. Além disto, procurou-se medir os defeitos visíveis ao longo das superfícies da amostra para classificá-la de acordo com os critérios do método Amorim Faria exposto no capítulo três, conduzindo assim a duas classes possíveis: Aprovada (caso as dimensões dos defeitos e o valor da massa volúmica estejam dentro dos limites) ou Rejeitada.

A parte de execução dos ensaios mecânicos exigiu a colocação dos provetes sobre os apoios, orientados de modo a que a força fosse aplicada segundo a direcção tangencial da madeira, procurando-se também que o seu eixo ficasse perpendicular aos eixos dos apoios e que a sua secção média ficasse igualmente distanciada destes. Com o provete devidamente colocado procedeu-se à aplicação do extensómetro no dispositivo de amarração ao provete, executando-se de seguida o ajuste do actuador hidráulico ao perfil metálico até contactar com a sua face e consequentemente imobilizar a folha de alumínio utilizada no ajuste.

O processo de aplicação gradual de forças à viga inicia-se quando o ajuste se dá como concluído, a um ritmo constante até se atingir a sua rotura dentro do tempo estipulado pela norma EN 408 [12]: (300 ± 120) segundos. Para isto foi necessário definir uma velocidade constante de aplicação de carga que permitisse atingir a força máxima que a viga consegue sustentar dentro do limite temporal definido: a velocidade de ensaio foi, para os dois lotes, igual 0,1mm/s. A força de rotura obtida corresponde à

força máxima aplicada durante o ensaio e a flecha de rotura corresponde ao deslocamento verificado nesse instante.

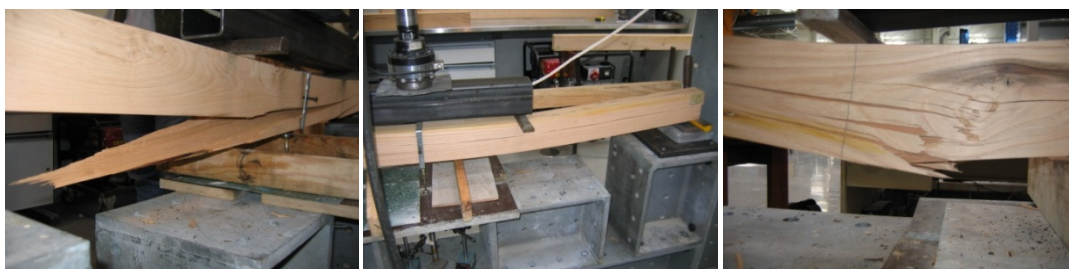


Fig.4.25 – Amostras submetidas ao ensaio de flexão

Os ensaios foram prolongados para além da carga máxima, exceptuando aqueles em que a rotura foi muito frágil, não existindo porém um critério rigoroso para serem considerados como concluídos. Normalmente fazia-se uma rápida análise do gráfico fornecido instantaneamente pelo equipamento de leitura de dados e tentava-se perceber se o comportamento da amostra tinha estagnado, não evidenciando uma recuperação da carga sustida e limitando-se a sofrer deslocamentos sucessivamente maiores.

No final de cada ensaio, à semelhança do efectuado para os ensaios de compressão, registaram-se todos os detalhes do comportamento da vida ensaiada que se acharam relevantes e merecedores de serem assinalados. Procurou-se além disto confrontar a classe atribuída, baseada nos critérios da inspecção visual, com o comportamento evidenciado no decorrer do ensaio e com os resultados alcançados no que refere à força máxima sustentada e o tipo de rotura observado. Isto permitiu no fundo validar ou porventura criticar os limites impostos e o tipo de preceitos escolhidos com vista à classificação de madeiras antigas com base na inspecção visual.

5

TRATAMENTO E ANÁLISE DE RESULTADOS

5.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, apresenta-se o tratamento e análise dos resultados obtidos nas diferentes partes que compuseram a campanha experimental, ou seja, analisam-se os resultados obtidos nos ensaios à flexão, nos ensaios à compressão e na determinação da massa volúmica dos diferentes lotes. A análise efectuada inclui uma avaliação qualitativa de todos os resultados, uma análise estatística dos valores obtidos e um primeiro conjunto de comentários e pequenas constatações que resultam de forma mais ou menos óbvia dos estudos efectuados. No capítulo seguinte apresentam-se as reflexões e conclusões menos directas mas também, ao mesmo tempo, mais interessantes por se revestirem de alguma inovação e incluírem no fundo muitas conclusões que terão de vir a ser posteriormente validadas por novas campanhas experimentais.

O objectivo do tratamento estatístico prende-se com a maior facilidade em colher conclusões a respeito dos resultados obtidos e consequentemente também permitir, ao mesmo tempo, alcançar valores característicos de grandezas como o módulo de elasticidade em flexão, a resistência à compressão paralela ao fio e a resistência à flexão, importantes para validação da proposta de classificação de peças de madeira antiga por inspecção visual, apresentada nos capítulos anteriores (método proposto e aplicação aos lotes ensaiados em laboratório). A validação da proposta de classificação visual é atingida por comparação entre os valores característicos obtidos com os valores de referência considerados na classificação visual para as espécies botânicas de Castanho e Carvalho, presentes em todos os provetes ensaiados na campanha experimental realizada como suporte desta tese. O facto de se conseguir criticar os valores limite definidos ajuda ao melhoramento da classificação, contribuindo simultaneamente para alcançar os objectivos que se propôs atingir com este documento.

Inicialmente, pretendia-se realizar um tratamento estatístico mais alargado envolvendo numa primeira fase as amostras aprovadas e rejeitadas pelo “método Amorim Faria” e posteriormente, numa segunda fase, apenas as amostras que cumpriram os limites máximos definidos pela metodologia (amostras aprovadas). Contudo, a campanha experimental revelou-se muito extensa levando à realização apenas da primeira fase do tratamento estatístico, incidindo sobre o conjunto total de amostras. A conclusão do tratamento estatístico é fundamental para validar algumas das conclusões apresentadas mais à frente nos capítulos seis e sete.

5.2 CONCEITOS ESTATÍSTICOS

Neste ponto, apresentam-se alguns conceitos teóricos fundamentais sobre Tratamento Estatístico de dados e que foram seguidos no tratamento realizado sobre os dados recolhidos. Estes conceitos aplicam-se a todos os pontos alusivos ao tratamento estatístico presentes neste capítulo.

O valor característico de uma propriedade define-se como sendo o percentil de 5% de uma distribuição. Este valor indica que a probabilidade de encontrar peças com resistência inferior ao valor característico é de 5% e obtém-se do valor médio, admitindo que segue a lei Normal de Gauss, através da expressão:

$$f_k = \bar{f} - 1,64\sigma \quad (5.1)$$

Sendo: f_k – valor característico; $\bar{f}$ – valor médio e σ – desvio padrão.

Com base no que se acaba de dizer e com o objectivo de determinar o valor característico da massa volúmica, foi necessário definir, para cada lote ensaiado, o valor médio e o desvio padrão.

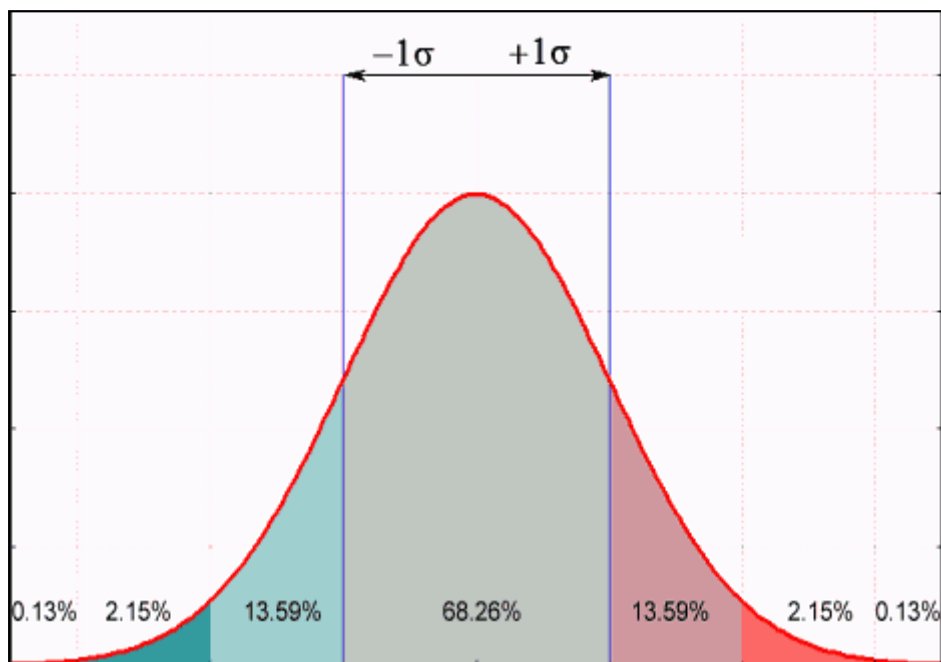


Fig.5.1 – Distribuição Normal ou Gaussiana

Uma característica importante da distribuição normal é que, quanto maior for a dimensão da amostra, mais uniformemente as ocorrências se irão distribuir à medida que se afastam da média central. A medida desta uniformidade é o “desvio padrão”, uma medida algébrica que quantifica a dispersão dos eventos sob distribuição normal, ou seja, a média das diferenças entre o valor de cada evento e a média central. O desvio padrão pode ser considerado grande ou pequeno dependendo da ordem de grandeza da variável.

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5.2)$$

Sendo: n – número total de amostras; x_i – o valor para cada amostra da grandeza em estudo; $\bar{x}$ – média do conjunto.

Para se saber a importância que assume o desvio padrão, isto é, para saber se um determinado valor obtido para o desvio padrão é grande ou pequeno, calcula-se o coeficiente de variação que expressa a variabilidade dos dados tirando a influência da ordem de grandeza da variável e é definido por:

$$CV = \frac{s}{\bar{x}} \quad (5.3)$$

Sendo: s – desvio padrão do conjunto de amostras; $\bar{x}$ – média do conjunto.

O coeficiente de variação pode ser interpretado como a variabilidade dos dados em relação à média. Quanto menor for o coeficiente de variação, valor adimensional e normalmente expresso em percentagem, mais homogêneo é o conjunto de dados. Um coeficiente de variação é considerado baixo quando for menor ou igual a vinte e cinco por cento (25%), podendo variar de acordo com a aplicação. Pode ser difícil classificar um coeficiente de variação como baixo, médio ou alto, mas este pode ser bastante útil na comparação de dois grupos que a princípio não são comparáveis.

Os conceitos estatísticos definidos neste ponto, nomeadamente a média, o desvio padrão, o coeficiente de variação e o valor característico, foram utilizados no tratamento estatístico dos valores de todas as propriedades mecânicas determinados nos ensaios, e constituem a base fundamental sobre a qual se procedeu à avaliação dos resultados.

Seguidamente apresenta-se de uma forma detalhada o trabalho realizado e os valores alcançados com a respectiva análise.

5.3. MASSA VOLÚMICA

5.3.1. RESULTADOS OBTIDOS

No capítulo anterior expôs-se o procedimento, os passos dados e algumas notas relevantes na determinação da massa volúmica das amostras submetidas aos ensaios de compressão e flexão. Nesta primeira parte apresentam-se os valores determinados para a massa e o volume das amostras consideradas, com o consequente cálculo da massa volúmica.

5.3.1.1. Lotes ensaiados à flexão

Nos casos das amostras submetidas aos ensaios de flexão, o valor da massa volúmica constituía um dos parâmetros de classificação da proposta de inspeção visual apresentada, com valores limite especificados para as espécies botânicas em questão: Castanho e Carvalho. Neste sentido, os resultados obtidos na determinação da massa volúmica para estas amostras permitiriam aprová-las ou rejeitá-las caso o valor calculado fosse respectivamente superior ou inferior ao valor limite fixado, e igual a 500 kg/m³, caso se tratasse de Castanho (lote “D”) ou igual a 600 kg/m³ caso fosse Carvalho (lote “G”).

Deve referir-se desde já que, a aplicação deste critério à classificação por inspeção visual de madeiras antigas não faz muito sentido já que, além de ser de difícil determinação *in situ*, não permite retirar conclusões do tipo causa-efeito sobre a maior ou menor qualidade de um dado elemento estrutural. É de salientar também que os critérios que impõem limitações a defeitos, como nós, fendas ou descaios, são mais importantes e como tal são capazes de implicar a rejeição de uma peça de madeira quando apenas um deles não cumpre o valor mínimo ou máximo definido. Contudo, não se pretende

retirar importância ao critério que determina um valor mínimo para a massa volúmica dos provetes mas sim realçar que se trata de um critério que necessita de apresentar um parceiro de rejeição para colocar na amostra o rótulo de “*Rejeitada*”, segundo esta proposta de classificação.

Na continuação do apresentado no capítulo anterior, as vigas de madeira destinadas aos ensaios de flexão foram pesadas e medidas, não na sua totalidade mas sim a maioria dos exemplares. De seguida apresentam-se dois quadros (quadros 5.1 e 5.2) que ilustram os resultados das pesagens e das medições, com o respectivo cálculo da massa volúmica, para as vigas dos lotes “D” e “G”, ou seja, dos dois lotes ensaiados à flexão.

Quadro 5.1 – Massa volúmica das amostras do lote “D”

Amostra	b (m)	l (m)	m (kg)	ρ (kg/m ³)
D1	0,05	0,995	1,48	596,0
D2	0,05	0,995	1,24	497,0
D3	0,05	0,996	1,31	526,7
D4	0,05	0,995	1,34	539,3
D5	0,05	0,996	1,47	590,7
D6	0,05	0,996	1,26	504,8
D7	0,05	0,996	1,37	551,0
D8	0,05	0,996	1,48	593,9
D9	0,05	0,996	1,64	659,8
D10	0,05	0,996	1,32	529,0
D11	0,05	0,996	1,25	502,7
D12	0,05	0,996	1,28	514,2
D13	0,05	0,996	1,52	608,8
D14	0,05	0,996	1,46	586,6
D15	0,05	0,996	1,50	601,2
D16	0,05	0,996	1,47	590,3
D17	0,05	0,996	1,44	579,2
D18	0,05	0,996	1,64	657,1
D19	0,05	0,996	1,68	674,6
D20	0,05	0,996	1,67	669,4
D21	0,05	0,996	1,53	616,2
D22	0,05	0,996	1,26	506,0
D23	0,05	0,996	1,52	611,5
D24	0,05	0,996	1,22	488,6
D25	0,05	0,996	1,21	485,5
D26	0,05	0,996	1,25	501,7
D27	0,05	0,996	1,60	641,7

Constata-se, pela visualização do quadro apresentado, no caso do lote “D”, a existência de uma variação das massas determinadas, ainda que pequena, que pode ser explicada principalmente pela variabilidade existente no lenho dentro de elementos da mesma espécie.

Por outro lado, as medições efectuadas evidenciaram uma regularidade apreciável, o que se ficou a dever à boa preparação dos provetes, conforme já foi referido no capítulo anterior. Contudo, convém não esquecer que o comprimento idealizado era um metro ($L=1\text{m}$) mas que por um motivo de causa

desconhecida não conseguiu ser satisfeito, conduzindo assim aos comprimentos expostos no quadro 5.1.

Neste lote, conforme está patente no quadro 5.1, calculou-se a massa volúmica de todas as amostras, isto é, das vinte e sete vigas, já que eram de fácil movimentação e transporte, permitindo assim levá-las para o local de pesagem. Apesar de ter pesado na decisão, não se quer com isto dizer que o principal motivo para não se ter determinado a massa volúmica das vigas grandes foi a sua dimensão e a dificuldade em movimentá-las, mas o que influenciou este facto foi achar-se que calcular esta grandeza para um número de vigas que representam metade da população total seria apreciável face aos condicionalismos em questão.

O quadro 5.2 contém os valores determinados pela pesagem e medição de alguns exemplares das vigas “G” e o conseqüente cálculo da massa volúmica.

Quadro 5.2 – Massa volúmica de amostras do lote “G”

Amostra	b (m)	h (m)	L (m)	m (kg)	ρ (kg/m ³)
G2	0,06	0,10	1,89	6,3606	560,9
G3	0,06	0,10	1,89	7,0138	618,5
G4	0,06	0,10	1,89	6,2502	551,2
G5	0,06	0,10	1,89	6,7345	593,9
G6	0,06	0,10	1,89	7,1501	630,5
G7	0,06	0,10	1,89	7,2439	638,8
G8	0,06	0,10	1,89	6,4978	573,0
G9	0,06	0,10	1,89	6,3490	559,9
G10	0,06	0,10	1,89	6,1164	539,4
G11	0,06	0,10	1,89	6,0216	531,0
G12	0,06	0,10	1,89	6,4905	572,4
G13	0,06	0,10	1,89	6,6592	587,2
G14	0,06	0,10	1,89	7,5023	661,6
G15	0,06	0,10	1,89	6,7971	599,4
G16	0,06	0,10	1,89	7,1625	631,6
G17	0,06	0,10	1,89	7,1668	632,0
G18	0,06	0,10	1,89	5,9726	526,7
G19	0,06	0,10	1,89	6,9664	614,3
G20	0,06	0,10	1,89	6,1891	545,8
G21	0,06	0,10	1,89	7,0125	618,4
G22	0,06	0,10	1,89	6,8319	602,5
G23	0,06	0,10	1,89	7,0295	619,9
G24	0,06	0,10	1,89	7,6380	673,5
G25	0,06	0,10	1,89	6,9336	611,4
G26	0,06	0,10	1,89	7,4395	656,0

Mais uma vez, as vigas apresentam secções transversais com dimensões regulares entre elas, motivadas pelo bom corte. Por outro lado o comprimento difere do desejado em um centímetro (o comprimento idealizado para as vigas seria de um metro e noventa centímetros), não causando contudo problemas na materialização do esquema de ensaio. Na realidade, as amostras evidenciavam diferenças de poucos milímetros no comprimento registado mas optou-se por considerá-lo idêntico em todas elas, já que isto não representa uma variação significativa entre o valor determinado e o valor real da massa volúmica.

Pode-se afirmar que, olhando para os valores apresentados no quadro 5.2, a variação das massas registadas é considerável, evidenciando diferenças de quase dois quilogramas entre algumas amostras. Tal como no caso das vigas do lote “D”, também neste caso se apresenta mais à frente o tratamento estatístico realizado.

5.3.1.2. Lotes ensaiados à compressão

Para os dois lotes ensaiados à compressão, tanto para o lote “Ac” como para o lote “Dc”, a massa volúmica foi determinada com o único objectivo de fornecer informação adicional sobre as amostras em questão, contribuindo para o seu melhor conhecimento e possível compreensão de eventuais alterações nos comportamentos manifestados nos ensaios, pois os provetes com massa volúmica superior normalmente apresentam-se como sendo os mais resistentes.

Procedeu-se à pesagem de grande parte do número total de amostras ensaiadas: dos setenta e nove (79) provetes testados foram pesados e medidos setenta e oito provetes (78). A única peça de madeira não submetida à pesagem foi a “Dc17”. Os quadros 5.3 e 5.4 resumem os resultados obtidos.

Quadro 5.3 – Massa volúmica das amostras do lote “Dc”

Amostra	b (m)	h (m)	L (m)	m (kg)	ρ (kg/m ³)
Dc1	0,12	0,12	0,30	2,7810	643,8
Dc2	0,12	0,12	0,30	2,7470	635,9
Dc3	0,12	0,12	0,30	2,8530	660,4
Dc4	0,12	0,12	0,30	2,6500	613,4
Dc5	0,12	0,12	0,30	2,6515	613,8
Dc6	0,12	0,12	0,30	2,5075	580,4
Dc7	0,12	0,12	0,30	2,5015	579,1
Dc8	0,12	0,12	0,30	2,6875	622,1
Dc9	0,12	0,12	0,30	2,6250	607,6
Dc10	0,12	0,12	0,30	2,7385	633,9
Dc11	0,12	0,12	0,30	2,3875	552,7
Dc12	0,12	0,12	0,30	2,4495	567,0
Dc13	0,12	0,12	0,30	2,5640	593,5
Dc14	0,12	0,12	0,30	2,5200	583,3
Dc15	0,12	0,12	0,30	2,3360	540,7
Dc16	0,12	0,12	0,30	2,4935	577,2
Dc18	0,12	0,12	0,30	2,8545	660,8
Dc19	0,12	0,12	0,30	2,7945	646,9
Dc20	0,12	0,12	0,30	2,6930	623,4
Dc21	0,12	0,12	0,30	2,5625	593,2
Dc22	0,12	0,12	0,30	2,6125	604,7
Dc23	0,12	0,12	0,30	2,4740	572,7
Dc24	0,12	0,12	0,30	2,4065	557,1
Dc25	0,12	0,12	0,30	2,5060	580,1
Dc26	0,12	0,12	0,30	2,6560	614,8
Dc27	0,12	0,12	0,30	2,9225	676,5
Dc28	0,12	0,12	0,30	2,7855	644,8

Quadro 5.4 – Massa volúmica das amostras do lote “Ac”

Amostra	b (m)	h (m)	L (m)	m (kg)	$\rho(\text{kg/m}^3)$
Ac1	0,12	0,12	0,30	2,7800	643,5
Ac2	0,12	0,12	0,30	2,6845	621,4
Ac3	0,12	0,12	0,30	2,6505	613,5
Ac4	0,12	0,12	0,30	2,6195	606,4
Ac5	0,12	0,12	0,30	2,5015	579,1
Ac6	0,12	0,12	0,30	2,9200	675,9
Ac7	0,12	0,12	0,30	2,7315	632,3
Ac8	0,12	0,12	0,30	2,5075	580,4
Ac9	0,12	0,12	0,30	2,5190	583,1
Ac10	0,12	0,12	0,30	2,4300	562,5
Ac11	0,12	0,12	0,30	2,2215	514,2
Ac12	0,12	0,12	0,30	2,6685	617,7
Ac13	0,12	0,12	0,30	2,4820	574,5
Ac14	0,12	0,12	0,30	2,5115	581,4
Ac15	0,12	0,12	0,30	2,9245	677,0
Ac16	0,12	0,12	0,30	2,2745	526,5
Ac17	0,12	0,12	0,30	2,8255	654,1
Ac18	0,12	0,12	0,30	2,5240	584,3
Ac19	0,12	0,12	0,30	2,6130	604,9
Ac20	0,12	0,12	0,30	2,7250	630,8
Ac21	0,12	0,12	0,30	2,5615	592,9
Ac22	0,12	0,12	0,30	2,9435	681,4
Ac23	0,12	0,12	0,30	2,4980	578,2
Ac24	0,12	0,12	0,30	2,2705	525,6
Ac25	0,12	0,12	0,30	2,9585	684,8
Ac26	0,12	0,12	0,30	2,5970	601,2
Ac27	0,12	0,12	0,30	2,6285	608,4
Ac28	0,12	0,12	0,30	2,5290	585,4
Ac29	0,12	0,12	0,30	2,7890	645,6
Ac30	0,12	0,12	0,30	2,6880	622,2
Ac31	0,12	0,12	0,30	2,7315	632,3
Ac32	0,12	0,12	0,30	2,7315	632,3
Ac33	0,12	0,12	0,30	2,8850	667,8
Ac34	0,12	0,12	0,30	2,5640	593,5
Ac35	0,12	0,12	0,30	2,4625	570,0
Ac36	0,12	0,12	0,30	2,9885	691,8
Ac37	0,12	0,12	0,30	2,3610	546,5
Ac38	0,12	0,12	0,30	2,6635	616,6
Ac39	0,12	0,12	0,30	2,6090	603,9
Ac40	0,12	0,12	0,30	2,4420	565,3
Ac41	0,12	0,12	0,30	2,4365	564,0
Ac42	0,12	0,12	0,30	2,5615	592,9
Ac43	0,12	0,12	0,30	2,7440	635,2
Ac44	0,12	0,12	0,30	2,3295	539,2
Ac45	0,12	0,12	0,30	2,5050	579,9
Ac46	0,12	0,12	0,30	2,6105	604,3
Ac47	0,12	0,12	0,30	3,0070	696,1
Ac48	0,12	0,12	0,30	2,2315	516,6
Ac49	0,12	0,12	0,30	2,2055	510,5
Ac50	0,12	0,12	0,30	2,4665	570,9
Ac51	0,12	0,12	0,30	2,8775	666,1

Constata-se que, pela análise dos quadros 5.3 e 5.4, as dimensões foram consideradas exactamente iguais para todos os provetes medidos mas na realidade evidenciavam diferenças de escassos milímetros pelo que, optou-se por uniformizar o comprimento e as dimensões da secção transversal com os valores pretendidos, tal como já tinha acontecido nas amostras ensaiadas à flexão. Por outro lado, as massas apresentam novamente uma ligeira variação, provocada maioritariamente pela variabilidade exibida pelo lenho da madeira, mesmo no que se refere a elementos da mesma espécie.

5.3.2. TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS OBTIDOS NA DETERMINAÇÃO DA MASSA VOLUMICA

5.3.2.1. Lotes ensaiados à flexão

Neste ponto apresentam-se e desenvolvem-se os passos realizados para o tratamento de dados relativo à determinação da massa volúmica. No que diz respeito aos lotes ensaiados à flexão, isto é aos lotes “G” e “D”, procurou-se determinar a média da massa volúmica de cada conjunto fundamentalmente com o objectivo de se efectuar uma ligeira comparação com os valores sugeridos na proposta de classificação visual e também se procurou avaliar a variabilidade apresentada pelos conjuntos determinando o desvio padrão. Convém não esquecer que a massa volúmica, no contexto dos ensaios à flexão, foi calculada com o objectivo classificar as vigas numa das duas classes sugeridas pela proposta (*Aprovada* ou *Rejeitada*), servindo-se para esse efeito dos valores obtidos para cada uma das vigas elementares.

Quanto ao lote “D”, constituído por elementos de Castanho, face aos valores calculados e apresentados no ponto 5.2.1, o valor médio da massa volúmica do conjunto de vinte e sete provetes correspondente é igual a 571,2 kg/m³. A amostra evidencia ainda uma variabilidade de dados em relação à média na ordem dos dez por cento (10%) deste valor, traduzida pelo coeficiente de variação apresentado o que, segundo o referido anteriormente, representa um valor baixo, e assim evidencia uma certa homogeneidade do lote, em termos de massa volúmica. O desvio padrão da amostragem atingiu o valor de 60,4 kg/m³ (ver quadro 5.5).

Quadro 5.5 – Valores estatísticos do lote “D”

Média	Desvio padrão	Coeficiente de Variação	Valor Característico	Máximo	Mínimo
ρ_m	σ	CV	ρ_k	$\rho_{m\acute{a}x}$	$\rho_{m\acute{i}n}$
(Kg/m ³)	(Kg/m ³)	(%)	(Kg/m ³)	(Kg/m ³)	(Kg/m ³)
571,2	60,4	10,6	472,1	674,6	485,5

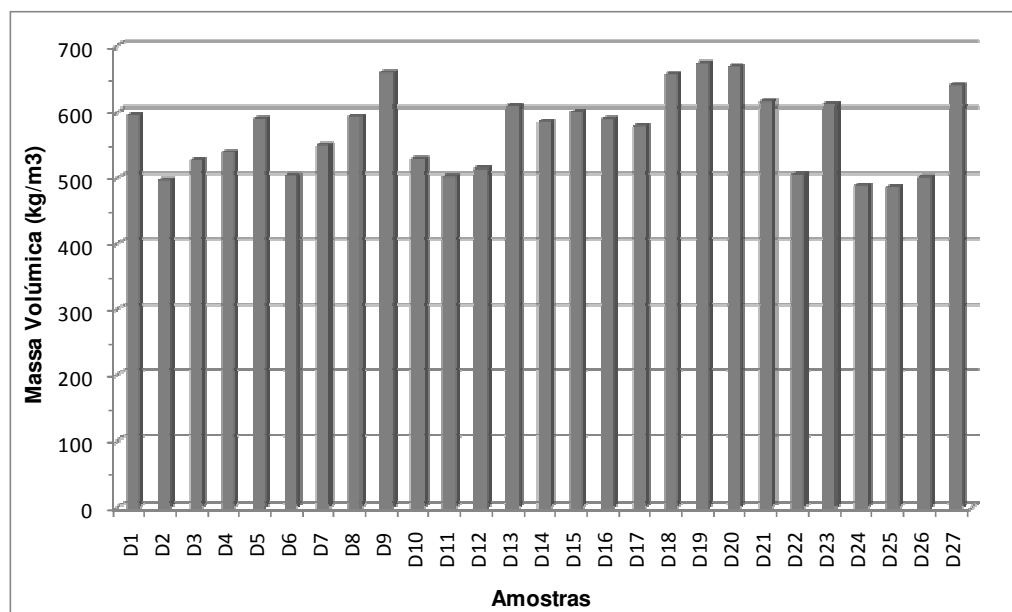


Fig.5.2 – Massa volúmica das amostras do lote “D”

Para o caso do lote “G”, face aos dados recolhidos junto de vinte e cinco amostras, chegou-se a um valor médio para o conjunto de $598,0 \text{ kg/m}^3$. Apesar de este valor não representar o conjunto total das amostras ensaiadas, pode-se afirmar que constitui uma boa aproximação já que foi calculado com base em cinquenta por cento, mais precisamente quarenta e oito por cento (48%), do número total de amostras do lote. O conjunto revela ainda uma homogeneidade considerável já que o coeficiente de variação determinado atinge apenas um valor de sete por cento (7%), ou seja, o desvio padrão representa apenas sete por cento do valor médio calculado para o conjunto de amostras com dados.

Quadro 5.6 – Valores estatísticos do lote “G”

Média	Desvio padrão	Coefficiente de Variação	Valor Característico	Máximo	Mínimo
ρ_m	σ	CV	ρ_k	$\rho_{m\acute{a}x}$	$\rho_{m\acute{i}n}$
(Kg/m³)	(Kg/m³)	(%)	(Kg/m³)	(Kg/m³)	(Kg/m³)
598,0	41,9	7,0	529,3	673,5	526,7

Face aos valores apresentados para os dois conjuntos, pode-se afirmar que representam amostras homogêneas, isto é, existe uma variabilidade reduzida entre os seus valores face às médias determinadas, sendo que o lote “G” constitui o conjunto com menor dispersão de valores (coeficiente de variação mais baixo).

Uma análise sintética dos dois quadros apresentados (quadro 5.5 e quadro 5.6) e também das figuras 5.2 e 5.3 permite concluir que os dois valores médios são relativamente semelhantes, diferindo apenas em $26,8 \text{ kg/m}^3$. Os valores foram retirados de amostras de dimensões idênticas (vinte e sete provetes do lote “D” e vinte e cinco do lote “G”) e como tal esta comparação faz todo o sentido. No sentido oposto, os dois valores característicos exibem uma diferença considerável justificada pelo facto do lote “D” ser um conjunto com um desvio padrão mais elevado e ao mesmo tempo apresentar uma média de

valores mais baixa, quando comparado com o lote “G”. Isto combinado, resulta num valor característico mais baixo do que o apresentado pelo lote das amostras “G” exibindo uma diferença de aproximadamente seis dezenas.

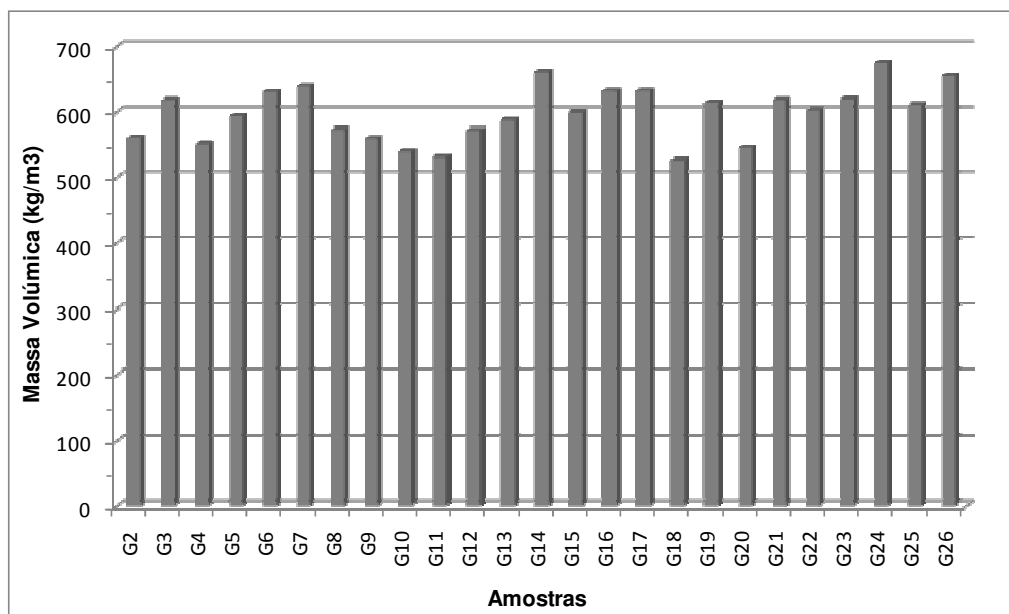


Fig.5.3 – Massa volúmica das amostras do lote “G”

5.3.2.2. Lotes ensaiados à compressão

O tratamento estatístico destas amostras seguiu os mesmos passos e baseou-se nas mesmas grandezas presentes no tratamento dos resultados obtidos referentes aos lotes ensaiados à flexão. Apesar deste tratamento estatístico não assumir grande importância, optou-se por seguir o esquema apresentado no tratamento estatístico dos dados recolhidos nos ensaios de flexão.

O lote “Dc” (constituído por peças de Castanho), constituído por vinte e sete amostras medidas e pesadas, apresenta um valor médio na ordem dos 600 kg/m³ e apresenta-se como um conjunto homogêneo já que o coeficiente de variação calculado revelou uma percentagem reduzida (5,9%). A figura 5.4 ajuda a perceber o que se acaba de dizer, mostrando que a dispersão de valores não é muito acentuada (ver também quadro 5.7).

Quadro 5.7 – Valores estatísticos do lote “Dc”

Média	Desvio padrão	Coeficiente de Variação	Valor Característico	Máximo	Mínimo
ρ_m	σ	CV	ρ_k	$\rho_{m\acute{a}x}$	$\rho_{m\acute{i}n}$
(Kg/m ³)	(Kg/m ³)	(%)	(Kg/m ³)	(Kg/m ³)	(Kg/m ³)
606,7	36,1	5,9	547,5	676,5	540,7

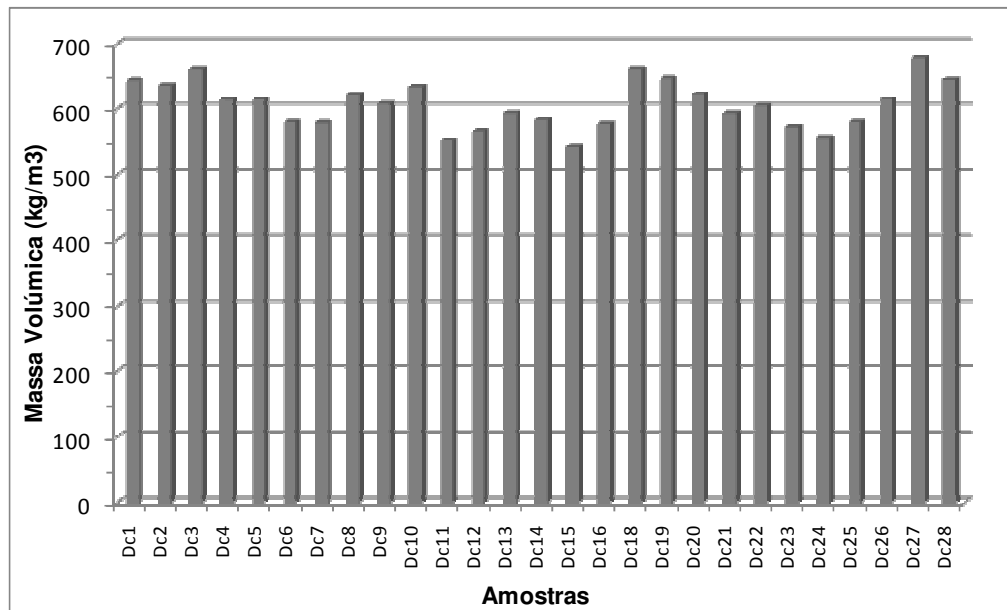


Fig.5.4 – Massa volúmica das amostras do lote “Dc”

Face aos valores obtidos para o lote “Ac” (quadro 5.8 e figura 5.5), cujas cinquenta e uma amostras de Carvalho foram medidas e pesadas, pode-se dizer que a média apresenta um valor elevado (próximo de 600 kg/m^3) e que o seu coeficiente de variação tem um valor relativamente baixo (7,9%). O conjunto assemelha-se muito, em termos estatísticos, ao conjunto de amostras designado por lote “Dc”, já que as grandezas estatísticas determinadas ostentam valores parecidos. Importa relembrar que o conjunto “Ac” recebeu um maior número de amostras e como tal os valores obtidos são dotados de um rigor superior aos valores recolhidos do lote “Dc”. Mas interessa dizer que, face à semelhança entre os dois conjuntos de valores e à diferença entre o número de amostras na sua proveniência, os conjuntos foram constituídos por um número suficientemente grande de amostras capazes de proporcionar valores credíveis para caracterizar cada uma das espécies em estudo (sem nunca esquecer que se tratou de uma método de medição expedito e que se trata de uma grandeza difícil de determinar *in situ*). Neste sentido, os resultados do tratamento estatístico da massa volúmica dos lotes ensaiados à compressão vieram dar crédito aos produtos da campanha experimental realizada.

Quadro 5.8 – Valores estatísticos do lote “Ac”

Média	Desvio padrão	Coeficiente de Variação	Valor Característico	Máximo	Mínimo
ρ_m	σ	CV	ρ_k	$\rho_{\text{máx}}$	$\rho_{\text{mín}}$
(Kg/m ³)	(Kg/m ³)	(%)	(Kg/m ³)	(Kg/m ³)	(Kg/m ³)
603,6	47,9	7,9	525,1	696,1	510,5

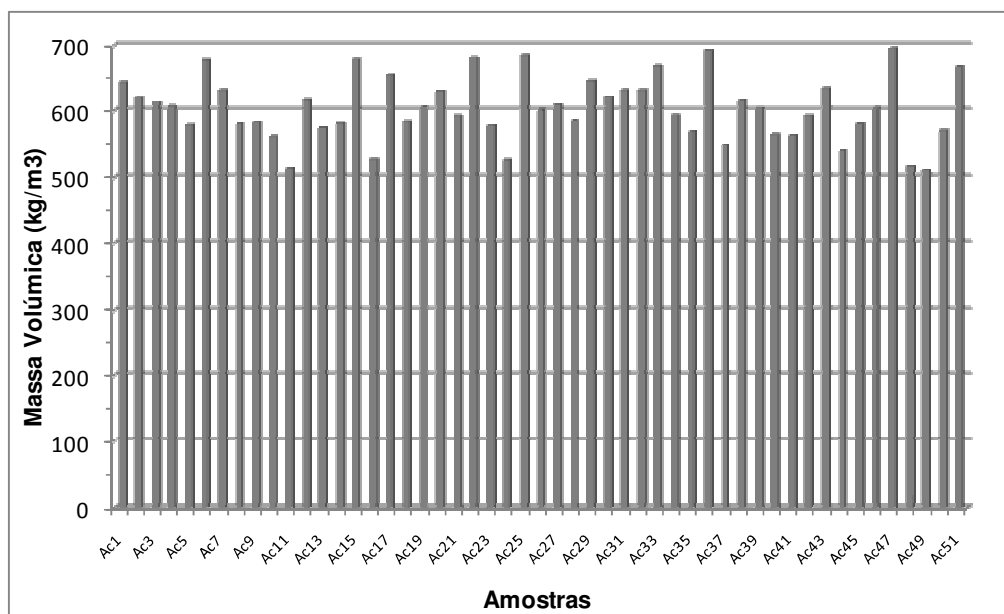


Fig.5.5 – Massa volúmica das amostras do lote “Ac”

5.4. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

5.4.1. APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

A campanha experimental englobou os ensaios à compressão paralela às fibras de madeira para, como se disse no capítulo quatro, legitimar a proposta de classificação de peças de madeira antiga por inspecção visual na parte referente à resistência característica à compressão paralela ao fio e além disto ser possível colher algumas informações a respeito do módulo de elasticidade em compressão, assunto tratado no decorrer deste capítulo. Neste sentido, com base nos dados provenientes do ensaio, procurou-se estimar o valor característico da tensão de rotura à compressão dos dois conjuntos de amostras para ser possível a realização de uma comparação com o valor definido na proposta.

5.4.1.1. Mecanismo de rotura

Ainda antes de se proceder à validação da proposta de classificação de madeira antiga, pela análise dos diversos ensaiados de compressão axial realizados, conseguiu-se definir linhas gerais do mecanismo de rotura mais habitual: a rotura ocorre num plano mais ou menos inclinado dentro do elemento de madeira. A madeira é um material heterogêneo e por isso torna-se difícil indicar objectivamente um mecanismo de rotura concreto e bem definido.

A fractura à compressão axial pode ser devida à rotura das camadas intercelulares, fendimento ou corte, varejamento (dobragem) das células e rotura das paredes celulares. As linhas de rotura seguem a orientação do fio e aproveitam-se dos defeitos que a peça de madeira exhibe, como nós e fendas, para se desenvolverem e progredirem. São visíveis fenómenos de encurvadura, provocados pelo deslizamento das fibras no sentido tangencial com o avanço da deformação, num ângulo de aproximadamente quarenta e cinco graus (45°) em relação à direcção das fibras na madeira. Esta facto fica a dever-se à maior fragilidade que a madeira manifesta no plano dos raios (tangencial) quando comparada com o plano radial.

A figura 5.6 mostra um conjunto de imagens que procuram evidenciar o estado de uma peça de madeira antes e depois de submetida a um ensaio de compressão axial. Como se pode verificar, as peças ensaiadas não estavam isentas de defeitos e o mecanismo de rotura foi influenciado pela

presença destes nas diversas faces do elemento. As linhas de rotura espalham-se pelas zonas mais afectadas pelos defeitos pois estas representam partes fragilizadas, como se consegue perceber na imagem com faixa inferior da amostra que inicialmente exibía uma coloração escura e a correspondente falta de material associada. A linha de rotura propagou-se através desta zona e seguiu um plano inclinado, tal como o descrito teoricamente num parágrafo anterior.

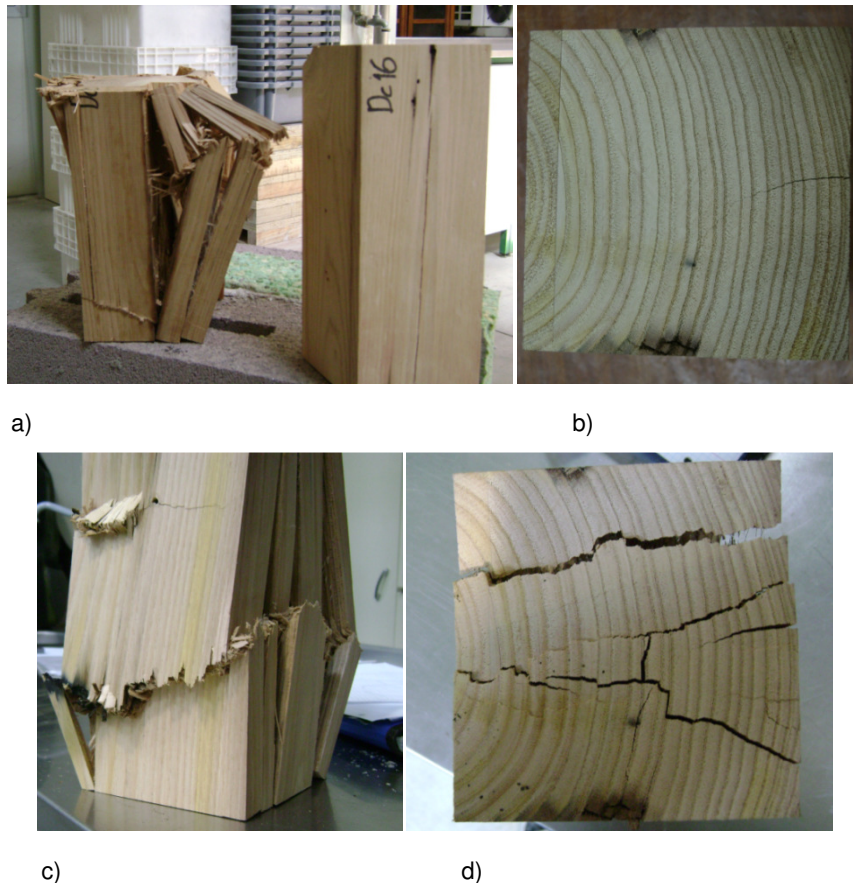


Fig.5.6 – Exemplo de rotura nos provetes de compressão axial. a) Comparação entre dois provetes (antes e depois do ensaio); b) Face comprimida antes do ensaio. c) Vista do provete depois do ensaio. d) Face comprimida depois do ensaio

Na figura anterior, na parte a), pode-se ver como uma fenda repassada presente numas das faces afectou o mecanismo de rotura desta amostra, já que proporcionou o destacamento de parte da secção (possibilitou o desenvolvimento e expansão das linhas de rotura), evidenciando a encurvadura característica dos provetes ensaiados à compressão. A presença de fendas em peças submetidas a esforços de compressão é indesejável porque são capazes de separar as fibras, contribuindo para a perda de integridade e consequentemente de resistência.

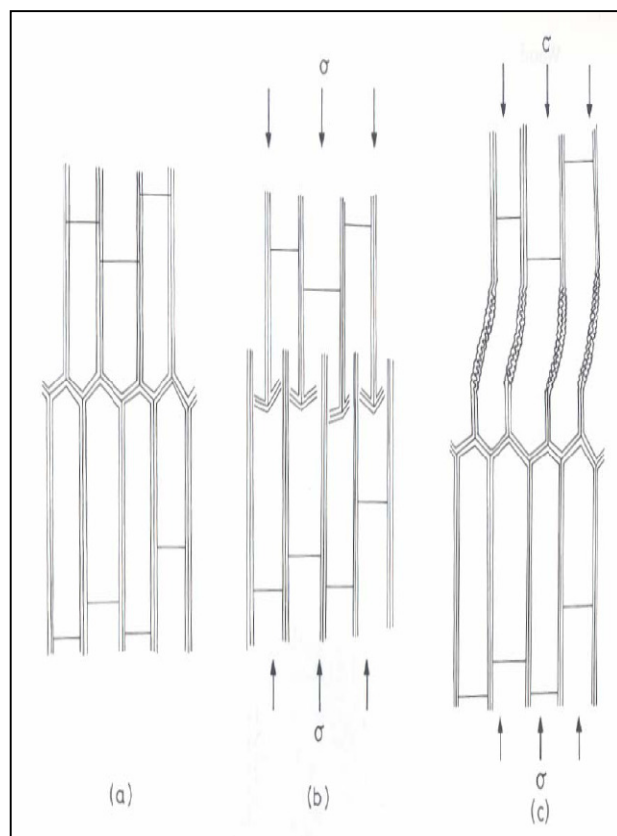


Fig.5.7 – Mecanismo de rotura: a) Antes de aplicação da carga; b) Colapso das células por quebra das paredes de topo; c) Colapso por varejamento das paredes laterais.

Como se analisou madeira antiga, alguns factores não naturais relacionados com a utilização e função específica da amostra durante a sua vida útil, enquanto parte enquadrada num elemento estrutural, também influenciaram a rotura das peças, ainda que de uma forma menos marcante comparativamente com os defeitos naturais presentes. Mesmo assim, foi notório que as linhas de rotura beneficiaram da presença destes elementos, entre os quais se pode destacar buracos produzidos por pregos, prosseguindo o seu traçado pelos pontos onde estas particularidades estavam patentes. A figura seguinte, figura 5.8, procura mostrar o que se acaba de afirmar.



Fig.5.8 – Influência dos furos provocados por pregos nas linhas de rotura

Apesar de se ter conseguido definir um mecanismo de rotura típico, nem todas as amostras evidenciaram o mesmo comportamento. Os fenómenos de encurvadura foram visíveis na totalidade das peças ensaiadas mas a intensidade com que se exibiram foi muito variável, dependendo do tipo de rotura. Com base na afirmação anterior, conseguiu-se distinguir dois tipos de comportamentos: o mais habitual envolveu uma rotura pouco frágil evidenciando uma elevada deformação (após pico de carga o seu decaimento era muito lento), provocando grandes destacamentos de material; um outro, menos usual, foi motivado por roturas frágeis com a consequente reduzida deformação apresentada pelos provetes. Neste último caso, os fenómenos de encurvadura não estavam presentes com tanta intensidade como a revelada para a maioria das amostras onde a rotura era muito dúctil, sendo que as quebras das paredes de topo foram predominantes nas roturas mais frágeis.

As amostras de cada um dos lotes exibiram comportamentos distintos, seguindo sempre as linhas gerais apresentadas anteriormente mas evidenciando, habitualmente, uma resposta mais frágil no caso do conjunto “Dc” enquanto os provetes “Ac” demonstravam mais ductilidade. Os fenómenos de encurvadura e o mecanismo de rotura descritos foram comuns aos dois lotes, mas o tipo de resposta após se atingir a carga máxima variou ligeiramente de um caso para o outro. Existiram sempre excepções a este padrão pois é difícil encontrar uma tipologia para o comportamento das madeiras.

5.4.1.2. Resultados dos ensaios realizados

Dos ensaios à compressão realizados conseguiu-se extrair directamente o valor da força máxima de rotura para cada um dos provetes juntamente com o valor do deslocamento medido entre os pratos da máquina para o instante em que se alcançou esse valor máximo. A obtenção destas grandezas baseia-se em componentes experimentais, já que a força máxima fica registada no sistema de aquisição de dados, que se encontra ligado à prensa do LSC (Laboratório de Sistemas e Componentes), juntamente com os valores que constituem o aumento progressivo da carga e, por outro lado, a área da secção transversal resultou das medições realizadas na determinação da massa volúmica.

Com os dois conjuntos de resultados, construíram-se gráficos que os relacionam, ou seja, produziram-se gráficos que demonstram a interacção entre a força transmitida à amostra com o deslocamento sofrido por esta e que apresentam a seguinte forma (figura 5.9):

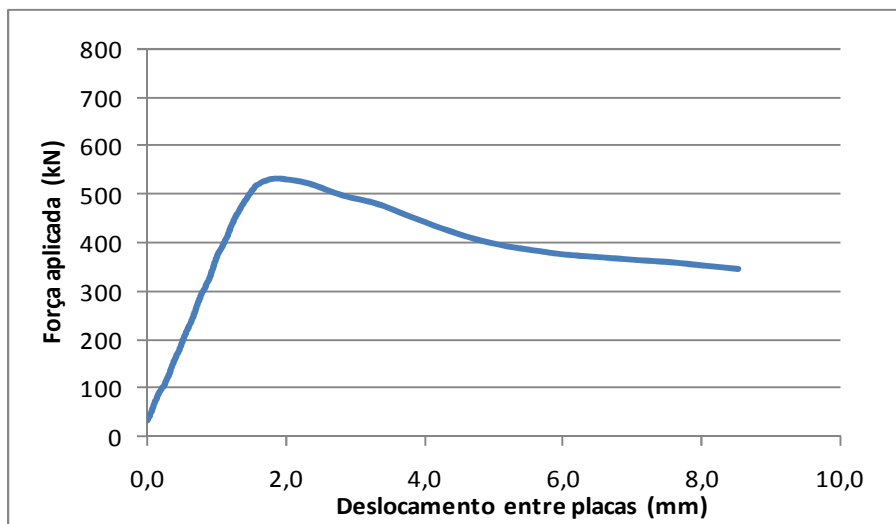


Fig.5.9 – Tipo de resposta mais frequente obtida nos ensaios à compressão: Força vs Deslocamento entre placas (amostra Ac16)

Este gráfico representa a forma mais usual dos resultados dos ensaios do lote “Ac”, depois de relacionados. Contudo, cada amostra representou um caso particular uma vez que a força máxima atingida e a deformação registada variaram de caso para caso. Genericamente pode-se dizer que as amostras do conjunto “Ac” resistiram a cargas mais baixas e apresentaram um decréscimo gradual da carga após pico, evidenciando assim grandes deformações.

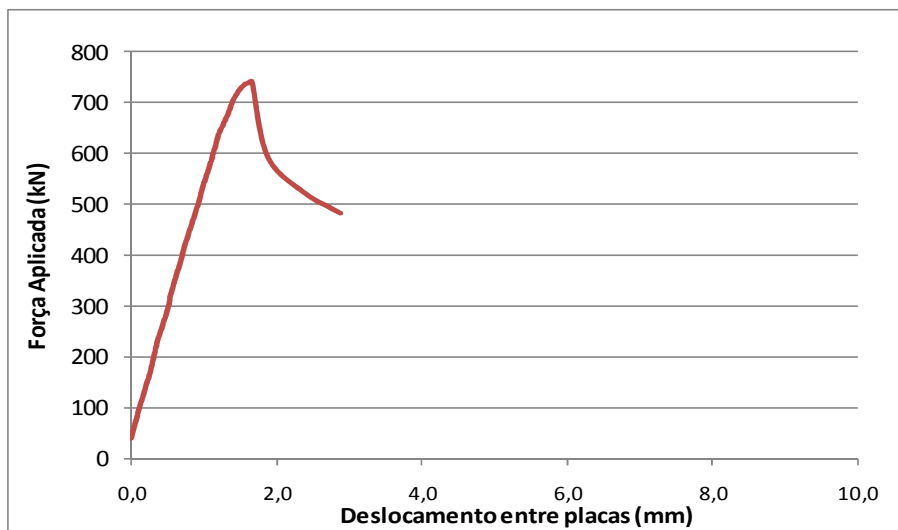


Fig.5.10 – Tipo de resposta mais frequente obtida nos ensaios à compressão: Força vs Deslocamento entre placas (amostra Dc28)

Tal como se verifica na figura 5.10, a resposta exibida pela maioria dos provetes do lote “Dc” difere da registada nas amostras “Ac” fundamentalmente na zona após se atingir a carga máxima, já que se nota uma quebra mais rápida de resistência. Além disto, de uma forma geral as amostras “Dc” atingem uma carga máxima superior à registada pelas peças “Ac”.

Também se constatou que alguns provetes do lote “Dc” foram capazes de suportar cargas elevadas, face à maioria dos valores registados, aproximando-se bastante dos 800 kN enquanto apenas uma amostra “Ac” ultrapassou 700 kN de carga máxima transmitida.

Os comentários realizados a respeito dos comportamentos específicos de cada um dos lotes, em termos de deformação observada e carga máxima atingida, são meramente informativos não se pretendendo retirar daqui nenhuma conclusão definitiva a respeito destes temas. Convém não esquecer que o motivo que conduziu à realização dos ensaios de compressão paralela ao fio foi a procura de uma estimativa do valor da resistência da madeira a este esforço, sendo depois objecto de uma comparação com o valor definido na proposta de classificação com o objectivo de a validar (sem nunca deixar de parte a capacidade de gerar informação a respeito do módulo de elasticidade obtido por ensaio de compressão).

Na figura 5.11, encontram-se expostas todas as respostas das amostras “Dc” e, na figura 5.12, as respostas dos provetes contidos no lote “Ac”. Pode-se ver a diferença de comportamentos referida, com a visível quebra de resistência mais repentina nas amostras “Dc” comparativamente à resposta exibida pelos provetes “Ac”. Estas figuras pretendem fundamentar os comentários tecidos ao longo deste ponto, sem nunca procurar retirar daqui ilações ou conclusões a respeito do comportamento plástico da madeira pois, como já se disse, não é objecto de estudo neste trabalho.

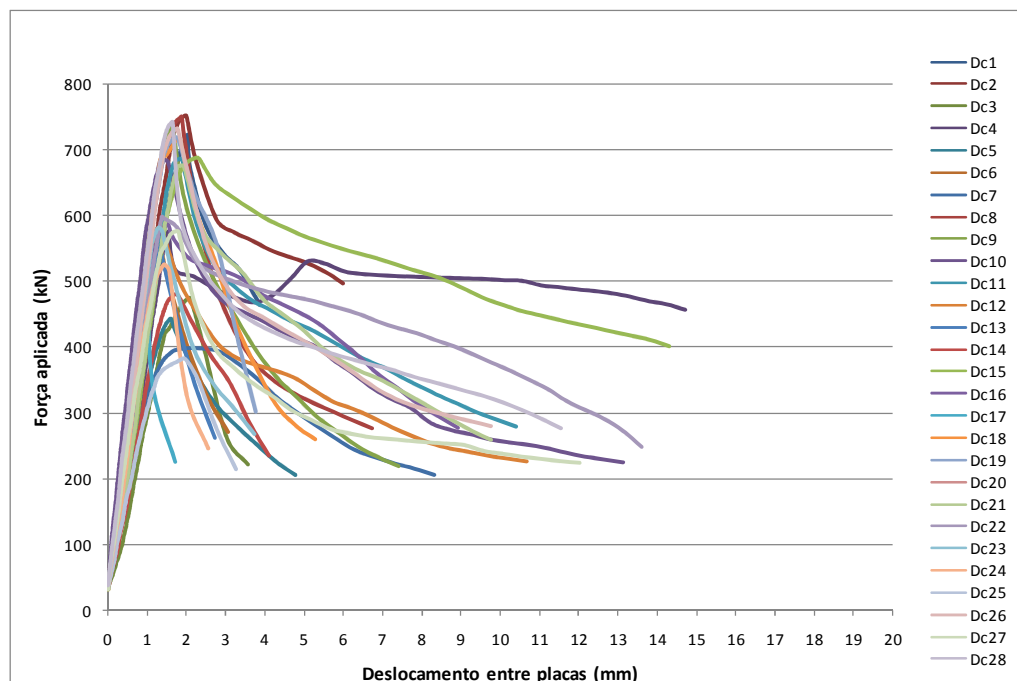


Fig.5.11 – Conjunto de respostas Força vs Deslocamento entre placas - Lote “Dc”

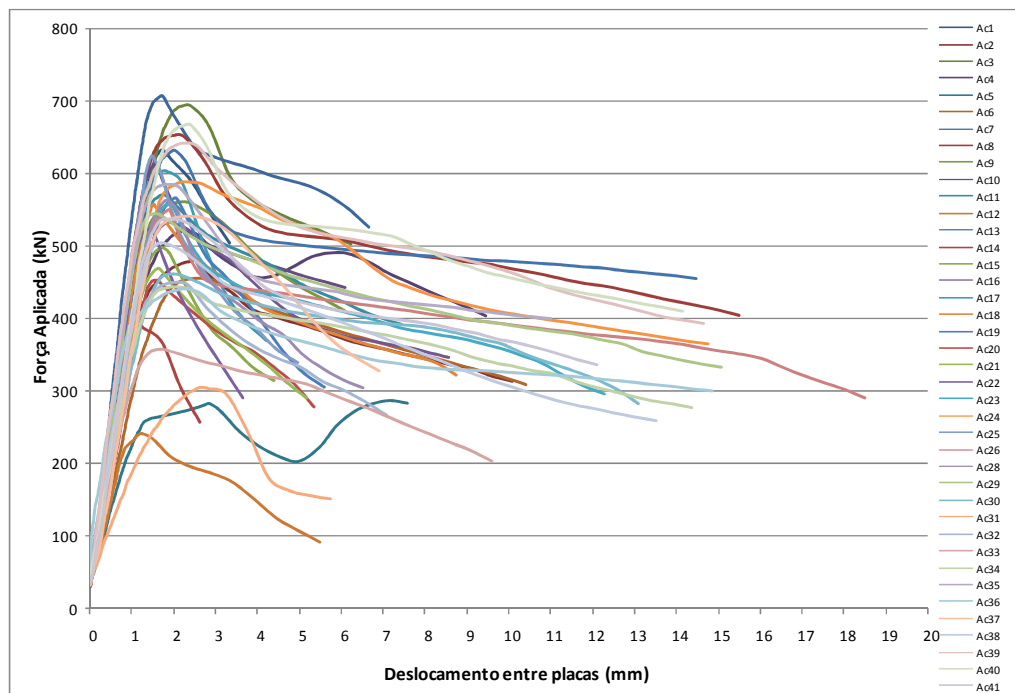


Fig.5.12 – Conjunto de respostas Força vs Deslocamento entre placas - Lote “Ac”

5.4.1.3. Obtenção de valores de resistência à compressão paralela ao fio

Com base nos valores máximos das forças transmitidas às amostras e através da expressão 5.4, obteve-se o valor da tensão máxima de compressão de cada uma, também designada por valor da resistência máxima à compressão axial. Trata-se pois da parte mais importante do trabalho realizado no âmbito dos ensaios à compressão paralela ao fio porque vai de encontro aos objectivos definidos como primordiais e que motivaram a sua realização.

A resistência à compressão paralela ao fio é determinada a partir da expressão:

$$f_{c,0} = \frac{F_{máx}}{A_c} \quad (5.4)$$

Sendo: $f_{c,0}$ – resistência à compressão paralela ao fio (em kPa); $F_{máx}$ – força máxima aplicada à amostra (em kN); A_c – área da secção transversal (em m^2).

Tendo como suporte o tipo de gráfico mostrado tanto na figura 5.9 como na figura 5.10, conseguiu-se elaborar outro género de gráficos relacionando a tensão de compressão e a extensão entre placas (figura 5.13 e figura 5.14). Usou-se a expressão 5.4 para determinar a tensão de compressão a partir dos valores da força registados no decorrer do ensaio e a extensão entre placas foi obtida a partir do deslocamento entre placas, medido pelo extensómetro colocado debaixo do prato inferior, através da seguinte equação:

$$\epsilon_{placas} = \frac{\Delta_{placas}}{L_{amostra}} \quad (5.5)$$

Sendo: ϵ_{placas} – extensão entre placas (mm/m); Δ_{placas} – deslocamento entre placas (mm); L_{amostra} – comprimento da amostra (igual a 0,30m para todos os provetes ensaiados).

A vantagem deste tipo de gráfico, face ao género de gráfico que utiliza força ao deslocamento, consiste na facilidade de leitura, já que a extensão, como grandeza adimensional, pode ser usada mais facilmente para comparar deformações entre os diversos provetes testados. Se porventura os provetes não tivessem a mesma dimensão, isto é, caso possuíssem comprimentos diferentes, a extensão daria para se ter uma percepção mais clara do comportamento de cada um, sendo possível compará-los objectivamente em termos de deformação.

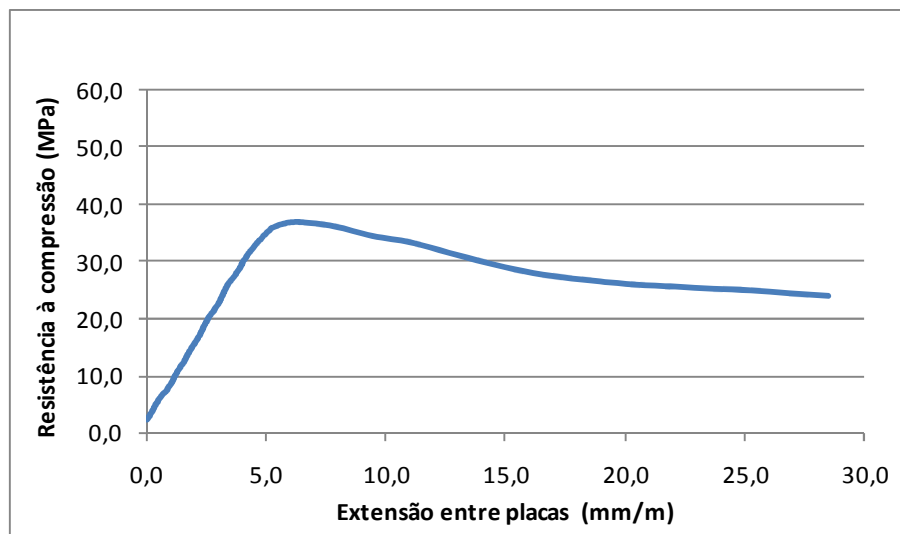


Fig.5.13 – Tipologia dos gráficos obtidos nos ensaios à compressão: Tensão de compressão vs Extensão entre placas (amostra Ac16)

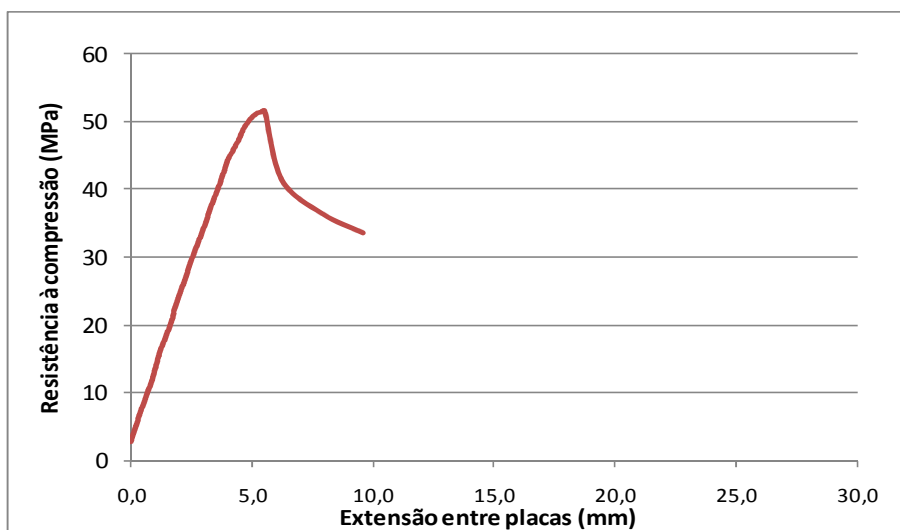


Fig.5.14 – Tipologia dos gráficos obtidos nos ensaios à compressão: Tensão de compressão vs Extensão entre placas (amostra Dc28)

Os quadros seguintes, quadros 5.9 e 5.10, sintetizam os valores obtidos experimentalmente (força máxima e deslocamento entre placas para o mesmo instante) e a aplicação da expressão 5.4 para se determinar o valor máximo da resistência à compressão paralela ao fio para os dois lotes ensaiados, “Dc” e “Ac” respectivamente.

Quadro 5.9 – Resultados dos ensaios do lote “Dc”

Amostra	F _m máxima (kN)	Deslocamento entre placas (mm)	f _{c,0} (MPa)
Dc1	722,5	2,04	50,2
Dc2	751,9	2,00	52,2
Dc3	474,7	2,11	33,0
Dc4	575,2	1,54	39,9
Dc5	442,7	1,54	30,7
Dc6	561,4	1,31	39,0
Dc7	397,6	1,98	27,6
Dc8	749,3	1,88	52,0
Dc9	735,5	1,65	51,1
Dc10	684,4	1,38	47,5
Dc11	686,1	1,89	47,6
Dc12	580,4	1,25	40,3
Dc13	552,7	1,33	38,4
Dc14	480,8	1,70	33,4
Dc15	687,8	2,32	47,8
Dc16	586,5	1,54	40,7
Dc17	468,7	0,99	32,5
Dc18	718,1	1,78	49,9
Dc19	719,0	1,70	49,9
Dc20	496,4	1,16	34,5
Dc21	674,8	1,81	46,9
Dc22	599,5	1,38	41,6
Dc23	582,1	1,30	40,4
Dc24	525,8	1,46	36,5
Dc25	382,1	1,98	26,5
Dc26	732,0	1,78	50,8
Dc27	576,1	1,80	40,0
Dc28	741,5	1,65	51,5

Quadro 5.10 – Resultados dos ensaios do lote “Ac”

Amostra	F _{máxima} (kN)	Deslocamento entre placas (mm)	f _{c,0} (MPa)
Ac1	631,5	1,75	43,9
Ac2	479,9	2,35	33,3
Ac3	693,9	2,40	48,2
Ac4	520,6	2,25	36,2
Ac5	285,9	7,17	19,9
Ac6	454,8	2,42	31,6
Ac7	707,7	1,73	49,1
Ac8	651,4	1,97	45,2
Ac9	560,5	2,09	38,9
Ac10	613,3	1,58	42,6
Ac11	570,0	1,79	39,6
Ac12	241,7	1,24	16,8
Ac13	631,5	2,03	43,9
Ac14	404,6	1,14	28,1
Ac15	497,3	1,72	34,5
Ac16	531,9	1,78	36,9
Ac17	603,8	1,82	41,9
Ac18	557,9	1,49	38,7
Ac19	565,7	2,07	39,3
Ac20	451,3	1,50	31,3
Ac21	469,5	1,66	32,6
Ac22	522,4	1,38	36,3
Ac23	559,6	2,29	38,9
Ac24	587,3	2,32	40,8
Ac25	624,6	1,49	43,4
Ac26	550,1	1,91	38,2
Ac28	563,1	1,86	39,1
Ac29	543,2	1,48	37,7
Ac30	461,7	1,88	32,1
Ac31	305,0	2,63	21,2
Ac32	450,5	7,06	31,3
Ac33	356,9	1,73	24,8
Ac34	444,4	2,00	30,9
Ac35	585,6	1,82	40,7
Ac36	441,8	2,28	30,7
Ac37	541,4	2,43	37,6
Ac38	503,3	1,63	35,0
Ac39	642,8	2,24	44,6
Ac40	666,2	2,41	46,3
Ac41	536,2	1,87	37,2
Ac42	462,6	1,63	32,1
Ac43	466,9	1,69	32,4
Ac44	590,8	1,61	41,0
Ac45	413,2	1,27	28,7
Ac46	663,6	1,93	46,1
Ac47	373,4	2,13	25,9
Ac48	600,3	1,68	41,7
Ac49	564,8	1,69	39,2
Ac50	615,9	1,83	42,8
Ac51	480,8	2,21	33,4

Os valores da resistência máxima à compressão, traduzidos pelas tensões resistentes reais apresentadas nos quadros anteriores, serviram para se estimar valores característicos representativos dos conjuntos, com o objectivo de servirem de ponto de comparação com o valor da resistência característica à compressão exposta na proposta de classificação de madeira antiga.

Comprova-se pela análise dos quadros 5.9 e 5.10 que os valores obtidos para a grandeza calculada (resistência à compressão axial) divergem uns dos outros, sendo que poucos são aqueles que se conseguem agrupar num conjunto com valores máximos idênticos. Verificou-se a existência de amostras com valores de força máxima sustida próximos de 450 kN e outros provetes, do mesmo lote, que suportaram cargas a rondar os 600 kN. Por isso, surgiu a necessidade de tratar estatisticamente os resultados, obtendo-se assim um valor que caracterize cada um dos lotes ensaiados. Também é importante dizer que, mesmo antes de se submeter os resultados ao tratamento estatístico, através deste tipo de ensaios realizados não se conseguiu aferir diferenças significativas na resistências à compressão axial entre os dois lotes testados, apesar de terem diferentes origens, serem de diferentes espécies e um deles resultar do aproveitamento de madeira ardida (lote Ac).

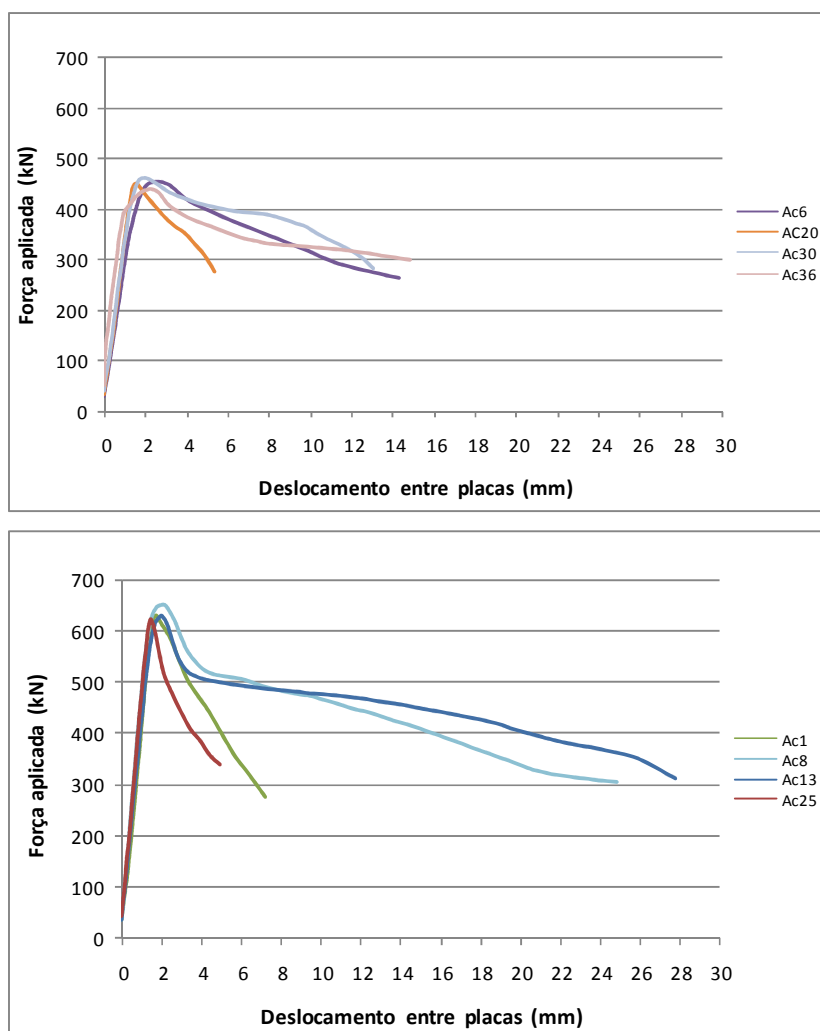


Fig.5.15 – Diferença de comportamentos de amostras do mesmo lote (lote Ac)

5.4.2. TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS VALORES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

5.4.2.1. Considerações gerais sobre o trabalho realizado

Como se referiu, o presente tratamento estatístico reveste-se de uma importância particular uma vez que a partir dele foi possível obter valores característicos que permitirão satisfazer um dos objectivos deste trabalho referente à resistência à compressão axial: comparação com o valor apresentado na proposta de classificação de madeira antiga e respectiva validação. Esta acção será aprovada caso os valores encontrados neste ponto sejam superiores ao estipulado na dita proposta e a margem entre eles seja considerada aceitável para as duas espécies em estudo, fazendo com que o valor característico esteja munido de segurança suficiente para fazer face à diversidade própria da madeira.

À semelhança do trabalho estatístico realizado para a massa volúmica, descrito no ponto 5.3.2, procurou-se definir valores médios, desvios padrões e valores característicos dos dois conjuntos ensaiados à compressão axial. Para isto recorreu-se aos conceitos estatísticos definidos no ponto 5.2, aproveitando concretamente as equações 5.1 (define o valor característico), 5.2 (referente ao desvio padrão) e 5.3 (coeficiente de variação).

Todos os ensaios que testaram provetes à compressão paralela ao fio foram considerados neste tratamento estatístico, pois assim conseguiu-se um resultado final mais próximo do que realmente pode representar as espécies de madeira estudadas. Assim, submeteu-se a um procedimento de cálculo estatístico os resultados alusivos à resistência à compressão axial dos lotes “Dc” e “Ac” e no fim teceram-se alguns comentários, mais directamente evidenciados dos resultados obtidos.

5.4.2.2. Lote “Dc”

Ao analisar as grandezas obtidas nos ensaios de compressão para os provetes de Castanho (quadro 5.9) verificou-se uma determinada variação das tensões de rotura que vai desde os 26,5 MPa, no caso do provete Dc25, até aos 52,2 MPa para o provete Dc2. A dispersão de valores pode ser mais facilmente visualizada a partir da Figura 5.16, onde se tem uma melhor noção da variação referida.

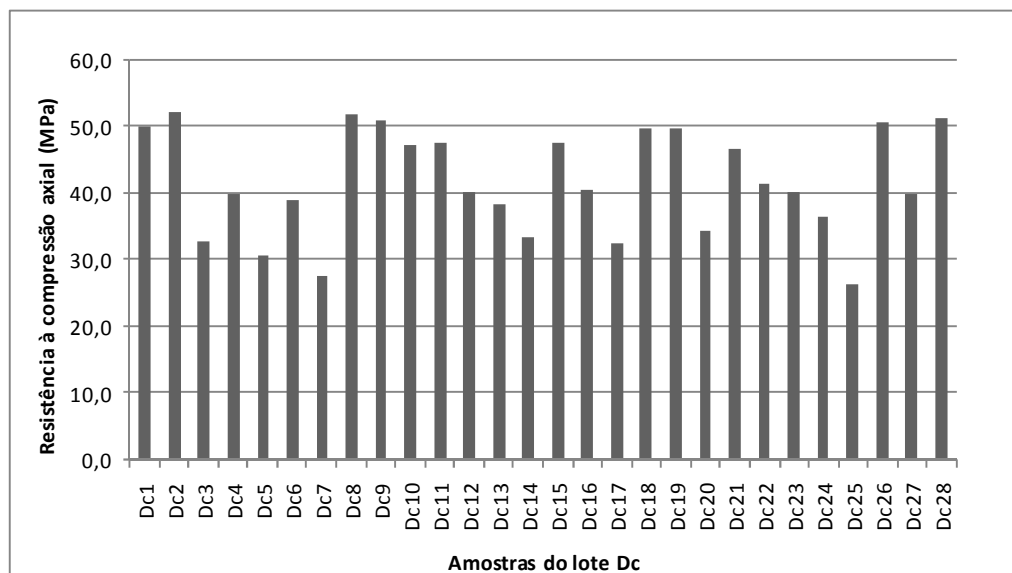


Fig.5.16 – Resistência à compressão axial ($f_{c,0}$) - Lote Dc

A grande amplitude de valores que a resistência à compressão axial exibe pode ser justificada pela quantidade de defeitos afectos a cada amostra específica. Além da quantidade, pode-se afirmar que a localização de defeitos como nós ou fendas influencia bastante os resultados obtidos pois, caso um provete apresente nós em algumas das suas faces nas mesmas posições relativas (por exemplo), isto pode originar secções mais fracas nas peças, reduzindo assim o valor da respectiva capacidade resistente. Analisando particularmente o caso da amostra que apresentou o valor mais baixo de resistência à compressão, o provete Dc25, consegue-se justificar com maior detalhe os motivos que influenciaram os baixos valores obtidos.

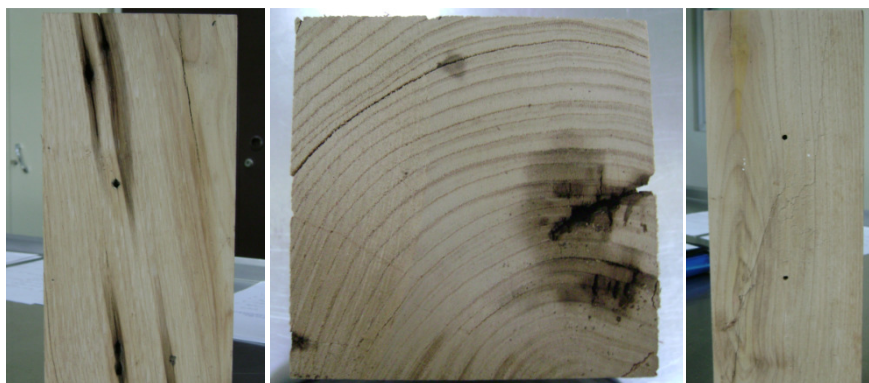


Fig.5.17 – Faces da amostra Dc25

Na figura 5.17 estão visíveis defeitos que podem ter motivado o comportamento menos resistente da amostra, como fendas repassadas (unem duas faces paralelas e têm expressão significativa nessas faces), ataque biológico associado a perda de material e alguns nós junto à parte inferior da peça provocando uma variação local acentuada de desvio do fio que, sem dúvida, influencia a compressão axial das fibras. Em geral, a peça apresentava um aspecto, antes de submetida ao ensaio, que face a uma apreciação visual poderia indicar que o seu comportamento não seria semelhante aos melhores do seu lote, em termos resistentes.

Por outro lado, a peça que apresenta o valor mais elevado de resistência à compressão axial, Dc2, encontrava-se em termos visuais em bom estado, não apresentando nós, fendas ou outros defeitos que pudessem indiciar um mau comportamento. Neste dois casos, assim como na maioria das outras amostras, a sintética análise visual realizada antes de submeter os provetes a ensaio forneceu informação que foi de encontro ao comportamento real verificado posteriormente.



Fig.5.18 – Faces da amostra Dc2

O quadro 5.11 resume as grandezas estatísticas determinadas para o lote “Dc”. Face aos valores nele contidos pode-se dizer que o conjunto apresenta alguma variabilidade, reforçada por um valor moderado do coeficiente de variação ($CV = 19\%$).

O conjunto de valores do lote “Dc” relativos à resistência à compressão axial apresenta um valor médio de 41,9 MPa variando entre um valor máximo de 52,2 MPa e um valor mínimo de 26,5 MPa.

O desvio padrão dos valores de resistência à compressão obtidos no ensaio é de 8 MPa, resultando um valor característico de 28,8 MPa.

Quadro 5.11 – Valores característicos da resistência à compressão (lote “Dc”)

Média	Desvio padrão	Coeficiente de Variação	Valor Característico	Máximo	Mínimo
$f_{c,0}$	σ	CV	$f_{c,0,k}$	$f_{c \text{ máx}}$	$f_{c \text{ mín}}$
(MPa)	(MPa)	(%)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
41,9	8,0	19,0	28,8	52,2	26,5

5.4.2.3. Lote “Ac”

Os resultados expostos no quadro 5.10 foram submetidos ao mesmo tratamento estatístico seguido para as amostras do lote “Dc”.

Nesta circunstância, perante os resultados referidos pode-se dizer que a gama de valores é maior do que a exibida para o lote “Dc”. Isto justifica-se porque os resultados do lote “Ac” envolvem uma diferença entre o valor máximo (49,1 MPa) e mínimo (16,8 MPa) superior ao primeiro lote discutido, fixando esta diferença no valor de 32,3 MPa.

O valor máximo relatado no parágrafo anterior foi alcançado pela amostra Ac7. Observou-se uma peça com bom aspecto geral, caracterizada por pequenas fissuras próximas de nós (nas faces de topo e base), por pequenos buracos (em número muito reduzido) e por uma ligeira inclinação pontual do fio. Resumidamente, não se detectou assim nenhum defeito ou conjunto de defeitos que pudessem justificar um mau comportamento, o que na realidade, ou seja após o ensaio mecânico realizado, se veio a comprovar.

De seguida mostra-se a tradução visual dos comentários tecidos no parágrafo anterior, através das imagens contidas na figura 5.19.



Fig.5.19 – Faces da amostra Ac7

O valor mínimo de resistência à compressão axial do conjunto “Ac” foi registado na resposta da amostra Ac12. À semelhança do que aconteceu na amostra Ac7, também o provete Ac12 foi inspeccionado e apreciado visualmente antes de ser ensaiado. Através deste procedimento verificou-se a presença de algumas fendas profundas combinadas com nós de grandes dimensões, principalmente junto da face superior do provete. As faces apresentavam sinais de instabilidade no fio e ainda manchas amarelas de grande extensão motivadas possivelmente por ataques de fungos neste momento inactivos mas que provocaram a degradação localizada das fibras de celulose presentes nessas zonas. O aspecto geral desta amostra apresentava assim indícios de que o seu comportamento poderia apresentar algum tipo de fragilidade, tal como se veio a confirmar durante o ensaio mecânico.

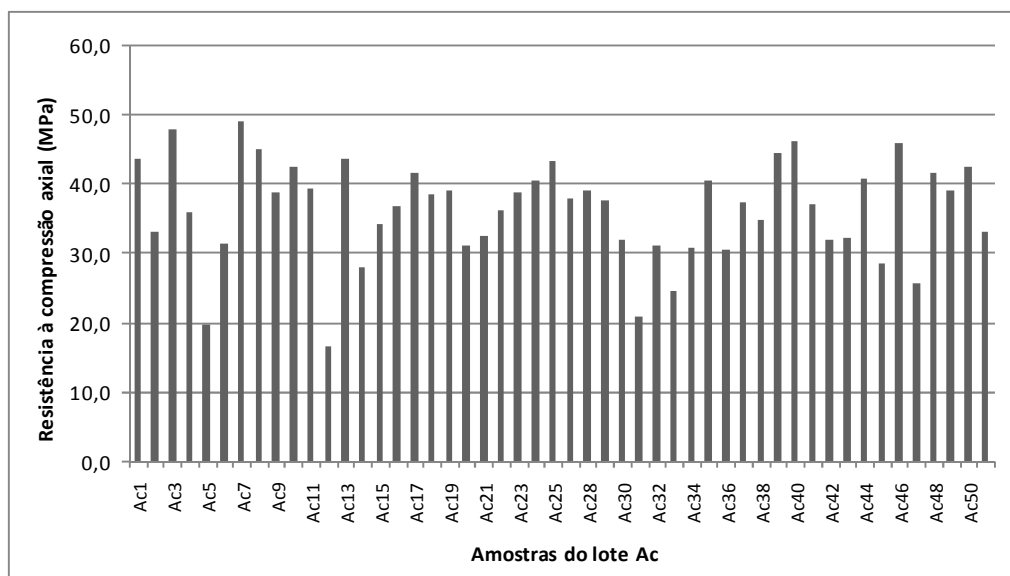


Fig.5.20 – Faces da amostra Ac12

Em geral, os provetes das amostras “Ac” exibem uma resistência à compressão axial inferior à verificada para os provetes “Dc”. Este facto pode ser explicado pela proveniência do lote “Ac”, já que as amostras foram aproveitadas de elementos de madeira ardida resgatadas de um incêndio num edifício, aproveitando por corte apenas as respectivas secções residuais interiores, motivando assim uma ligeira, e impossível de prever por simples análise visual, quebra de resistência.

O tratamento estatístico concreto encontra-se sintetizado tanto na figura 5.20 como no quadro 5.12, onde se comprova a variabilidade de resultados exibida pelo conjunto (CV próximo de 20% e a diferença de comprimentos no gráfico de barras são dois indicadores desta variabilidade moderada). O conjunto apresenta um valor médio de 36,4 MPa e um desvio padrão de aproximadamente 7 MPa, que combinados dão origem a um valor característico igual a 24,6 MPa para a resistência à compressão axial do lote “Ac”.

Pode-se ainda dizer que ficou comprovada a relação linear existente entre a massa volúmica e a resistência à compressão já que, em termos de valores característicos, o lote “Dc” apresenta massa volúmica superior ($\rho_k = 547,5 \text{ kg/m}^3$) associada a uma resistência à compressão axial superior ($f_{c,0,k} = 28,8 \text{ MPa}$) relativamente ao lote “Ac”.

Fig.5.21 – Resistência à compressão axial ($f_{c,0}$) - Lote Ac

Quadro 5.12 – Valores característicos da resistência à compressão (lote “Ac”)

Média	Desvio padrão	Coefficiente de Variação	Valor Característico	Máximo	Mínimo
$f_{c,0}$	σ	CV	$f_{c,0,k}$	$f_c \text{ máx}$	$f_c \text{ min}$
(MPa)	(MPa)	(%)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
36,4	7,2	19,8	24,6	49,1	16,8

5.5. RESISTÊNCIA À FLEXÃO

5.5.1. CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

Os ensaios à flexão realizados no LESE sobre setenta e nove amostras de dois lotes desiguais, provenientes de diferentes locais e de espécies botânicas distintas tiveram como principal objectivo a vontade de alcançar uma estimativa do valor característico da resistência à flexão ($f_{m,k}$) para ser posteriormente comparado com o valor mínimo (imposto pelo lado da segurança) definido na proposta de classificação visual *in situ* de madeira antiga. Pretendia-se assim validar se o intervalo de segurança fixado para esta propriedade é suficiente para englobar diferenças de comportamento expectáveis entre diferentes peças de um dado lote de madeira.

O outro propósito que esteve na génese da produção de ensaios à flexão consistiu na determinação de um valor médio para o módulo de elasticidade, assunto tratado no ponto 5.6.

Neste ponto, apresentam-se os resultados obtidos para as tensões de rotura à flexão e todos os procedimentos realizados para alcançá-los. Inserem-se ao longo deste ponto alguns comentários importantes para auxiliar a compreensão dos resultados alcançados, tais como considerações a respeito do comportamento do provete que apresentou maior resistência à flexão. Numa parte final, explica-se o tratamento estatístico realizado para a resistência à flexão realizado, tal como nos casos precedentes, com a intenção de obter valores médios e característicos desta grandeza.

5.5.2. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

À semelhança do que aconteceu no ponto anterior (ponto 5.4), referente à apresentação de resultados dos ensaios de compressão, procura-se aqui também, antes de expor quadros resumindo os valores obtidos para a resistência à flexão de todos os provetes ensaiados, definir em linhas gerais o mecanismo de rotura observado. Em seguida, mais à frente neste texto, parte-se para a exposição detalhada dos resultados e do seu tratamento estatístico.

5.5.2.1. Tipos de mecanismos de rotura

A madeira, pela sua natureza heterogênea, não apresenta roturas idênticas mesmo sendo submetida ao mesmo tipo de solicitação. A forma de rotura depende do tipo de madeira e das suas características, mas conseguiu-se estipular uma rotura típica que englobava um rompimento no lado oposto da aplicação da carga (lado condicionado por tração), geralmente com uma fissura muito prolongada ao longo do comprimento da peça acompanhando a linha neutra (figura 5.22). No lado oposto, o lado em que a carga é aplicada (sujeito à compressão) manifesta deformação plástica sob a forma de esmagamento.



Fig.5.22 – Fissura prolongada ao longo da peça



Fig.5.23 – Rompimento na zona traccionada

As figuras anteriores (figuras 5.22 e 5.23) evidenciam a tipologia de fissuras descritas, visíveis principalmente nas amostras de maior comprimento pertencentes ao lote “G”. Resumidamente, ocorre na zona comprimida uma pré-rotura localizada, caso o limite de resistência à compressão seja

ultrapassado acabando por, no fim, as peças romperem por rotura e estilhaçamento das fibras de extradorso, quando a tensão resistente máxima à tracção é ultrapassada.

Nos ensaios realizados sobre as vigas de maiores dimensões, presenciaram-se algumas roturas muito frágeis, sem qualquer tipo de aviso prévio e caracterizadas por alguma violência no momento da rotura. Estas roturas podem ser definidas em traços gerais por um corte brusco na zona de aplicação da carga (geralmente), sem que esta tenha atingido valores muito elevados (em alguns casos, o valor da carga e rotura não ultrapassou 5 kN). Como é expectável, o mecanismo de rotura definido anteriormente não caracteriza o que se passou nestes casos, considerados como excepções perigosas do comportamento usual das vigas e que ocorreram quase exclusivamente em peças integrantes do lote de madeira ardida.

Tal como se referiu, as roturas por corte (figura 5.24) constituíram algumas excepções ao comportamento geral evidenciando pela maioria das vigas. As amostras G4, G7 (rotura por corte junto ao local de aplicação da carga do lado esquerdo), G10 (igual a G7), G18 (diferente de todos os outros por apresentar um rompimento inclinado), G30 (mesmo fenómeno do G7 mas no lado direito), G34 (igual a G7 e G10) e G51 foram os casos registados onde este tipo de rotura esteve presente. No que refere ao lote “D”, as vigas D4, D7 (com a destruição do setup de ensaio) e D12 também demonstraram roturas frágeis.

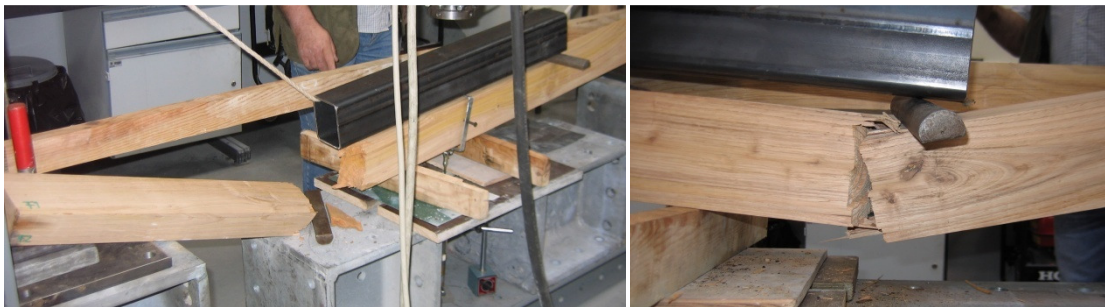


Fig.5.24 – Rotura por corte

5.5.2.2. Resultados alcançados nos ensaios à flexão

Os ensaios destrutivos realizados sobre as vigas dos lotes “D” e “G” permitiram o registo dos valores da força máxima de rotura e dos deslocamentos observados a meio vão (flecha para a carga máxima). A partir destes resultados directos do ensaio, foi possível determinar o valor da resistência à flexão e assim proceder posteriormente à comparação com o valor considerado através da classificação visual.

Algumas vigas ensaiadas não dispõem de resultados por falha humana, nomeadamente a D2, a D16 e a G36, sendo que os motivos que levaram a este acontecimento tiveram duas origens: não colocação do extensómetro no local correcto (não obteve leituras) e a falha no accionamento do sistema de aquisição de dados no início do ensaio (tendo como resultado a inexistência de leituras).

Tanto para as vigas referidas como para todas as outras, o procedimento de ensaio seguido foi o explicitado no capítulo quatro e os resultados que deles se extraíram são os que se encontram contidos nos quadros 5.13 e 5.14, para os lotes “G” e “D” respectivamente. Os valores exibidos resultam directamente dos valores captados experimentalmente.

Quadro 5.13 – Resultados dos ensaios de flexão (lote “D”)

Amostra	F _{máxima} (kN)	deslocamento meio vão (mm)
D1	9,9	54,5
D3	5,4	14,0
D4	3,8	18,9
D5	3,2	18,9
D6	7,4	26,9
D7	7,5	20,1
D8	7,8	24,6
D9	7,1	45,1
D10	5,7	16,5
D11	4,7	19,8
D12	3,2	11,2
D13	4,5	13,8
D14	5,0	21,2
D15	9,4	26,3
D17	5,5	27,3
D18	10,1	22,6
D19	6,9	16,3
D20	10,6	22,7
D21	4,2	17,3
D22	4,6	14,0
D23	5,2	27,7
D24	6,1	21,2
D25	5,3	16,3
D26	6,9	23,9
D27	8,0	22,9

A dispersão de resultados (dentro de cada lote) é grande, apesar de terem sido obtidos a partir de ensaios mecânicos realizados sob as mesmas condições, seguindo o mesmo procedimento, utilizando o mesmo esquema de ensaio e testando vigas de madeira da mesma espécie botânica e com as mesmas dimensões. Particularidades como defeitos assumem uma importância mais significativa para a flexão do que para a compressão o que pode justificar a variação que, à primeira vista, afecta os conjuntos de valores registados.

A influência dos nós é, nestes casos, fundamental e dependerá do tipo, dimensão, localização na peça e solicitação mecânica, sendo menos desfavoráveis quando se localizam somente na zona comprimida das peças. Por outro lado, as fendas influenciam o comportamento e a consequente resposta das vigas, conforme se encontrem mais ou menos distantes dos seus eixos neutros. O seu efeito pode ser desprezado se estiverem próximas do bordo de compressão ou tracção a não ser que estejam contidas em zonas onde as fibras se encontrem desviadas ou torcidas.

As figuras 5.25 e 5.26 representam as respostas de cada amostra testada e ao mesmo tempo encontra-se associada a classificação visual realizada: as amostras ilustradas a preto foram aprovadas e as amostras a vermelho rejeitadas.

Quadro 5.14 – Resultados dos ensaios de flexão (lote “G”)

Amostra	F _{máxima} (kN)	Deslocamento a meio vão (mm)
G1	5,0	15,8
G2	11,1	29,7
G3	10,5	26,4
G4	10,1	21,8
G5	9,5	21,1
G6	14,7	31,0
G7	8,9	28,2
G8	11,2	24,9
G9	16,8	50,5
G10	7,7	19,4
G11	6,1	16,8
G12	6,3	15,3
G13	12,4	37,4
G14	16,3	45,3
G15	19,9	47,3
G16	5,6	10,8
G17	12,1	34,6
G18	5,2	16,5
G19	18,5	51,8
G20	15,3	27,9
G21	12,0	24,4
G22	1,5	5,7
G23	4,3	10,4
G24	15,7	36,2
G25	9,9	26,9
G26	20,7	47,6
G27	9,9	24,2
G28	18,6	38,2
G29	10,6	32,3
G30	8,4	18,1
G31	7,6	19,8
G32	17,6	71,3
G33	11,4	24,0
G34	5,0	16,4
G35	5,6	12,0
G37	10,7	31,5
G38	13,2	27,0
G39	17,0	36,5
G40	13,8	46,2
G41	9,0	22,9
G42	15,5	39,0
G43	14,4	32,1
G44	3,6	8,6
G45	20,7	81,3
G46	19,0	46,4
G47	15,3	46,0
G48	5,5	13,5
G49	6,5	27,4
G50	13,1	35,2
G51	8,2	20,2
G52	8,4	26,1

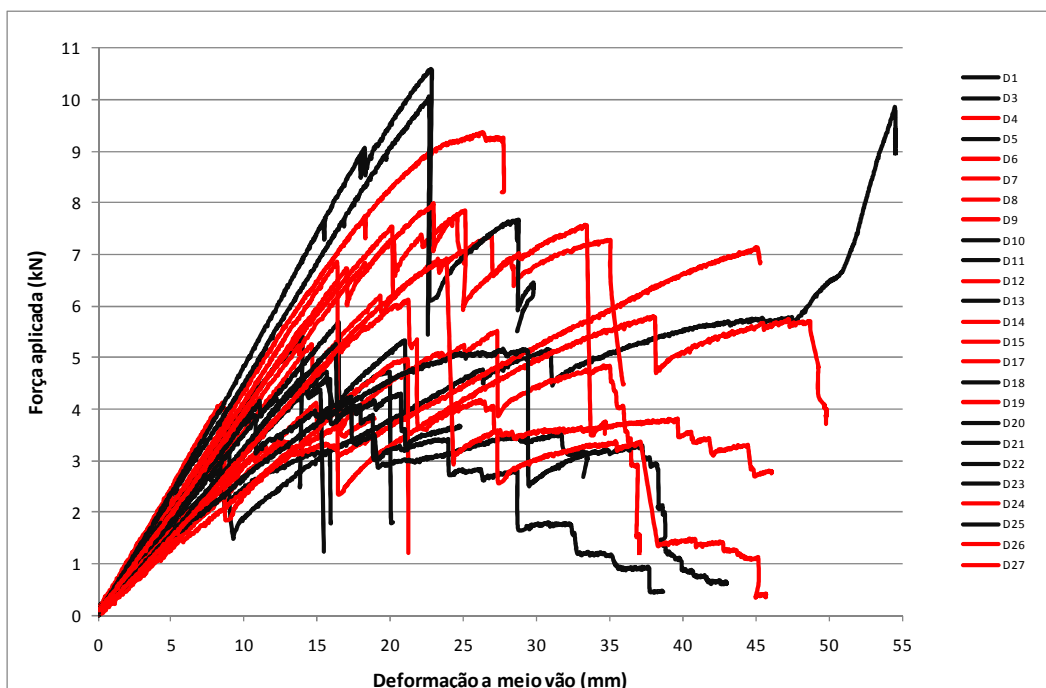


Fig.5.25 – Conjunto de respostas Força vs Deslocamento a meio vão - Lote "D"

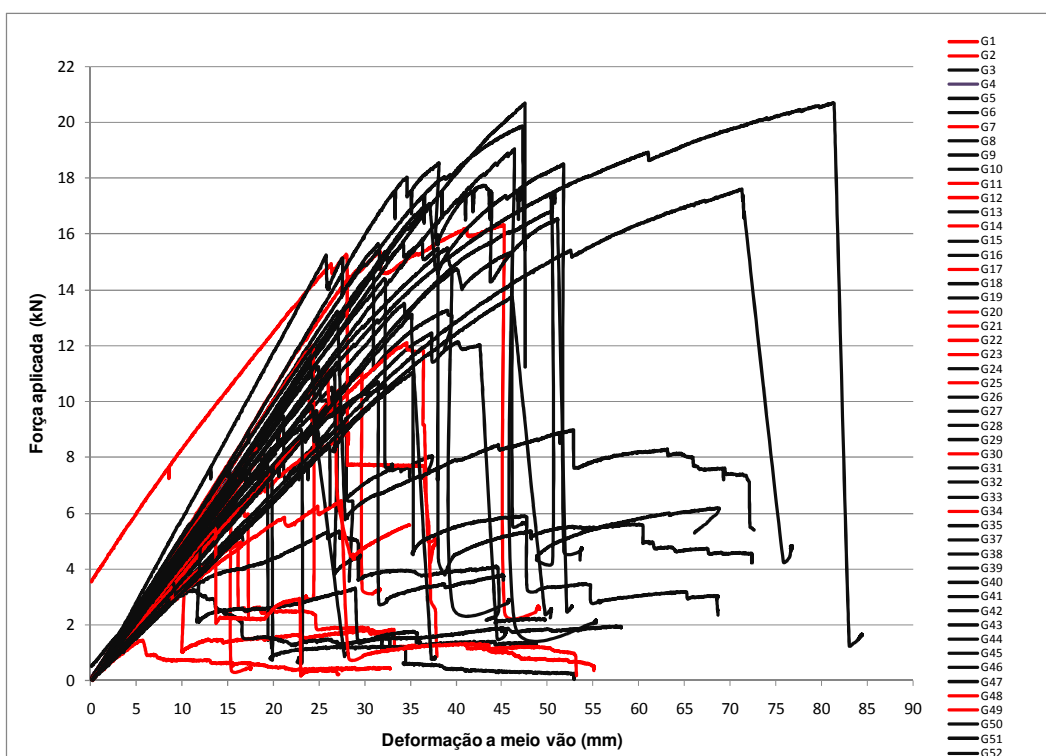


Fig.5.26 – Conjunto de respostas Força vs Deslocamento a meio vão - Lote "G"

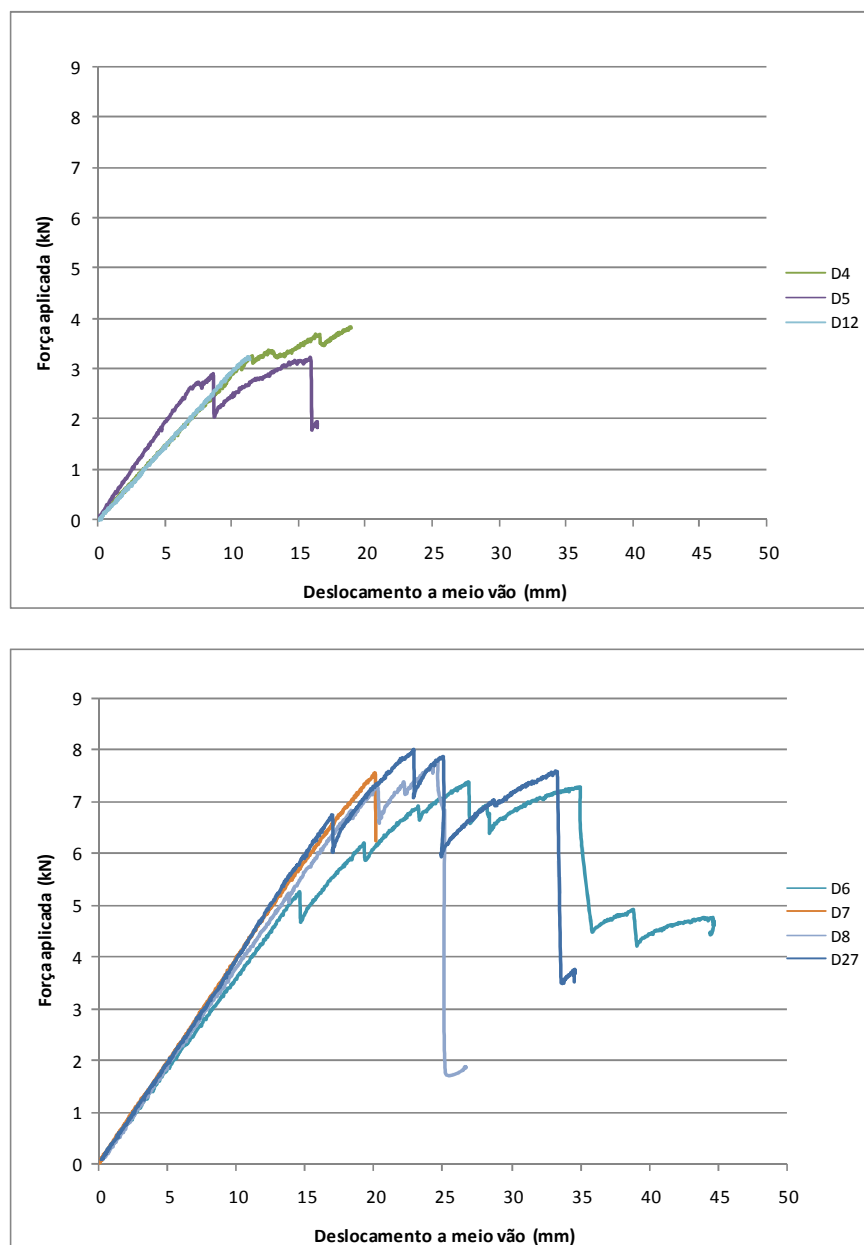


Fig.5.27 – Diferença de comportamentos de amostras do mesmo lote (Lote “D”)

Nas figuras anteriores dispõem-se graficamente os resultados atingidos, evidenciando primeiramente a sua globalidade (figura 5.25 e 5.26), não sendo assim possível distinguir com pormenor a resposta de cada uma das vigas, mas onde é fácil de entender a diversidade de comportamentos que vigas com características semelhantes conseguem exibir. Na figura 5.27, detalha-se o fenómeno da diversidade de respostas das vigas constituintes de um determinado lote, neste caso do lote “D”, conseguindo-se, por exemplo, agrupar as amostras em função de algumas propriedades, como é o caso do módulo de elasticidade ou da força máxima atingida.

As amostras D4, D5 e D12 manifestaram um mau comportamento, com rotura frágil por corte evidente em dois deles (D4 e D12). No que diz respeito ao D4, a rotura deu-se no local onde o esforço transversal é máximo, isto é na zona de aplicação da carga mas no caso do D12, a rotura foi motivada por um nó degradado próximo do apoio, constituindo-se como um buraco visível em duas faces, ou

seja, um defeito causador de uma enorme fragilidade da peça. Tratou-se de um exemplo onde os defeitos influenciaram bastante o comportamento final da peça.

O segundo subconjunto ilustrado graficamente exibe provetes que atingiram forças máximas semelhantes mas partindo de comportamentos bem diferentes, entre eles o D7 que rompeu violentamente por corte desmontando o setup criado; o D8 e o D27 atingiram a rotura a partir de um mecanismo mais habitual, com rompimento na zona traccionada.

5.5.2.3. Determinação dos valores de tensão de rotura à flexão

Após se terem ensaiado os provetes dos dois lotes à flexão, levando-os à rotura e registando depois disto os valores de força máxima aplicada, conseguiu-se a partir deles determinar os valores da tensões de rotura à flexão, também designada por resistência à flexão. A norma NP EN 408 mostra no seu ponto 13.3 a expressão que relaciona a força máxima obtida experimentalmente com a resistência à flexão e que se transcreveu para este texto:

$$f_m = \frac{a.F_{máx}}{2.W} \quad (5.6)$$

Sendo que as variáveis contidas na expressão apresentam o seguinte significado:

a – distância entre a posição de uma força e o apoio mais próximo, em milímetros (mm);

F_{máx} – força máxima, em Newton (N);

W – módulo de flexão da secção, em milímetros cúbicos (mm³);

$$W = \frac{bh^2}{6} \quad (5.7)$$

b – largura da secção transversal da viga ensaiada, em milímetros (mm);

h – altura da secção transversal da viga ensaiada, em milímetros (mm);

Os valores da largura e altura das duas secções transversais tipo dos conjuntos de vigas foram apresentados no capítulo quatro, pelo que a determinação do módulo de flexão é de cálculo directo.

Através da expressão (5.6) determinou-se a resistência à flexão dos provetes ensaiados, estando os valores obtidos resumidos no quadro 5.15, para o lote “G” e no quadro 5.16, para o lote das vigas mais pequenas constituintes do conjunto “D”.

Pela expressão citada, percebe-se que a tensão máxima de rotura à flexão é directamente proporcional à força máxima aplicada já que os valores da distância entre a posição de uma força e o apoio mais próximo (designada por “a”) e os valores do módulo de flexão (W) são iguais dentro de cada conjunto. Por este motivo, as razões apontadas para a variabilidade de resultados referentes à força máxima, nomeadamente a quantidade e localização de defeitos, são perfeitamente válidos para justificar a grande variação de valores apresentada pela resistência à flexão nos dois conjuntos.

Quadro 5.15 – Tensão de rotura à flexão (lote “G”)

Amostra	F _{máxima} (N)	a (mm)	W (mm ³)	f _m (MPa)
G1	5041	600	100000	15,1
G2	11076	600	100000	33,2
G3	10506	600	100000	31,5
G4	10067	600	100000	30,2
G5	9495	600	100000	28,5
G6	14686	600	100000	44,1
G7	8913	600	100000	26,7
G8	11240	600	100000	33,7
G9	16818	600	100000	50,5
G10	7720	600	100000	23,2
G11	6104	600	100000	18,3
G12	6286	600	100000	18,9
G13	12435	600	100000	37,3
G14	16330	600	100000	49,0
G15	19888	600	100000	59,7
G16	5627	600	100000	16,9
G17	12109	600	100000	36,3
G18	5199	600	100000	15,6
G19	18501	600	100000	55,5
G20	15262	600	100000	45,8
G21	12013	600	100000	36,0
G22	1466	600	100000	4,4
G23	4289	600	100000	12,9
G24	15688	600	100000	47,1
G25	9855	600	100000	29,6
G26	20706	600	100000	62,1
G27	9865	600	100000	29,6
G28	18551	600	100000	55,7
G29	10594	600	100000	31,8
G30	8359	600	100000	25,1
G31	7575	600	100000	22,7
G32	17607	600	100000	52,8
G33	11406	600	100000	34,2
G34	4979	600	100000	14,9
G35	5550	600	100000	16,7
G37	10710	600	100000	32,1
G38	13234	600	100000	39,7
G39	16995	600	100000	51,0
G40	13760	600	100000	41,3
G41	9038	600	100000	27,1
G42	15487	600	100000	46,5
G43	14416	600	100000	43,2
G44	3581	600	100000	10,7
G45	20700	600	100000	62,1
G46	19045	600	100000	57,1
G47	15345	600	100000	46,0
G48	5483	600	100000	16,5
G49	6465	600	100000	19,4
G50	13146	600	100000	39,4
G51	8153	600	100000	24,5
G52	8389	600	100000	25,2

Quadro 5.16 – Tensão de rotura à flexão (lote “D”)

Amostra	F _{máxima} (N)	a (mm)	W (mm ³)	f _m (MPa)
D1	9868	300	20833,3	71,1
D3	5413	300	20833,3	39,0
D4	3840	300	20833,3	27,6
D5	3219	300	20833,3	23,2
D6	7378	300	20833,3	53,1
D7	7539	300	20833,3	54,3
D8	7777	300	20833,3	56,0
D9	7137	300	20833,3	51,4
D10	5685	300	20833,3	40,9
D11	4736	300	20833,3	34,1
D12	3236	300	20833,3	23,3
D13	4463	300	20833,3	32,1
D14	4976	300	20833,3	35,8
D15	9377	300	20833,3	67,5
D17	5503	300	20833,3	39,6
D18	10060	300	20833,3	72,4
D19	6864	300	20833,3	49,4
D20	10605	300	20833,3	76,4
D21	4235	300	20833,3	30,5
D22	4644	300	20833,3	33,4
D23	5160	300	20833,3	37,1
D24	6118	300	20833,3	44,1
D25	5270	300	20833,3	37,9
D26	6908	300	20833,3	49,7
D27	7985	300	20833,3	57,5

5.5.2.4. Análise dos resultados obtidos

Face aos resultados alcançados e expostos nos quadros 5.15 e 5.16, consegue-se elaborar alguns comentários sobre as possíveis causas que estiveram na origem de tais comportamentos. Limitou-se esta análise aos provetes que, em cada conjunto, exibiram resultados extremos ao nível da resistência à flexão, quer atingindo o valor máximo, quer atingindo o valor mínimo dentro do conjunto.

O conjunto “G” apresenta um valor máximo para a resistência à flexão de 62,1 MPa, obtido com a amostra G45 (ver figura 5.28). A viga, na altura da inspeção visual, ostentava apenas pequenos nós na zona central de duas das suas faces. Demonstrava, através do seu bom aspecto geral, que poderia comportar-se bem quando sujeita ao ensaio de flexão. Durante a visualização da viga apontou-se apenas uma exceção a este bom aspecto: duas manchas em duas faces, uma de coloração negra e outra em tons de amarelo. O bom comportamento anunciado veio-se a comprovar durante o ensaio com a viga a sustentar uma carga elevada (aproximadamente 20 kN) e exibindo uma grande flecha, visível a olho nu.



Fig.5.28 – Faces da amostra G45

No lado oposto, o valor mínimo de resistência à flexão patenteado pelo conjunto “G” foi de 4,4 MPa, obtido no ensaio da amostra G22. Visualmente tratou-se de uma amostra que apresentava uma série de nós dispostos ao longo das faces, alguns deles juntos aos apoios e em zonas que seriam posteriormente traccionadas (ver figura 5.29). Além disto duas faces encontravam-se muito fissuradas, constituindo-se a partir delas algumas fendas repassadas. Em termos gerais a peça exibia mau aspecto, possuindo alguns buracos associadas a fendas. Esta peça enquadrou-se na classe “*Rejeitada*”, nem tanto pela dimensão dos defeitos mas sim pela sua localização e pelo mau aspecto geral que denotava uma grande fragilidade (a rejeição não partiu do facto de se ter ultrapassado os limites definidos na proposta).

A amplitude entre o valor máximo e o mínimo para este lote é grande, situando-se numa diferença de 57,7 MPa, o que suscita obviamente apreensão e motiva o uso de coeficientes de segurança elevados exigindo ao mesmo tempo a infalibilidade dos mecanismos de rejeição de peças de má qualidade com defeitos comprometedores .



Fig.5.29 – Faces da amostra G22

Nos ensaios das amostras “D”, o valor máximo a que se chegou para a resistência à flexão foi igual a 76,4 MPa, para o provete D20. Apresentou-se como uma amostra sem grandes defeitos, exibindo apenas um nó de pequenas dimensões (diâmetro não ultrapassava os dois centímetros) na zona do apoio do lado esquerdo e por isso foi colocada na classe “*Aprovada*”, segundo a proposta de classificação visual de peças de madeira antiga. A classificação visual antecipou o bom

comportamento que a peça exibiu no ensaio, sustentando carga elevada e rompendo com visível aviso (flecha na ordem dos 22 mm para o instante da carga máxima).

O valor mínimo de resistência à flexão foi registado com base nos resultados do ensaio da amostra D5. Tratou-se de uma amostra em que a classificação visual não conseguiu prever o seu mau comportamento, uma vez que não ostentava defeitos que o pudessem indicar. Visualmente, recebeu a designação de “Aprovada” pois os nós que manifestava tinham dimensões reduzidas (nos restantes critérios não se assinalou nada de relevante). O mau comportamento foi algo que não se conseguiu prever antes da realização do ensaio. A figura 5.30 evidencia algumas particularidades da amostra em questão.



Fig.5.30 – Aspecto geral da amostra D5

5.5.3. TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS RESULTADOS DA RESISTÊNCIA À FLEXÃO

5.5.3.1. Aspectos relevantes

O tratamento estatístico realizado sobre os resultados da resistência à flexão obtidos sobre os dois lotes testados engloba as mesmas grandezas estatísticas definidas no ponto 5.2. O objectivo passa pela validação da proposta de classificação visual, no que refere ao valor da resistência característica apresentado. Para isto surgiu a necessidade de determinar valores característicos e comprovar a existência de uma margem de segurança entre eles e o mínimo definido na proposta de classificação visual de madeira antiga.

Todos os ensaios realizados e que foram considerados válidos, isto é, ensaios sobre os quais se conseguiu obter valores, constituíram a base para o tratamento estatístico. A dimensão dos dois lotes é considerável, pelo que as conclusões deste cálculo estatístico podem-se relevar como importantes e representativas do comportamento mecânico deste lote de madeira.

5.5.3.2. Lote “D”

Os resultados apresentados no quadro 5.16 foram alvos de um tratamento que englobou a determinação da sua média, do seu desvio padrão e do seu valor característico. A figura 5.31 apresenta os valores da resistência à flexão para cada amostra associada à sua classificação visual (a vermelho ilustra-se as amostras reprovadas e a preto as amostras aprovadas).

A dispersão de valores obtidos é elevada, com uma diferença entre o valor máximo e mínimo, de grande proporção tal como se referiu. A amostragem apresenta um valor médio de 45,5 MPa com um desvio padrão de 15,3 MPa, o que constitui 33,5 % do valor médio referido. Este valor do coeficiente de variação traduz a variabilidade anunciada anteriormente para este conjunto, revelando-se como bastante elevado, o que fundamenta a necessidade de estipular elevados coeficientes de segurança.

O valor característico cifra-se em 20,5 MPa, para madeira da espécie botânica de Castanho ensaiada sob a designação de lote “D” (ver quadro 5.17).

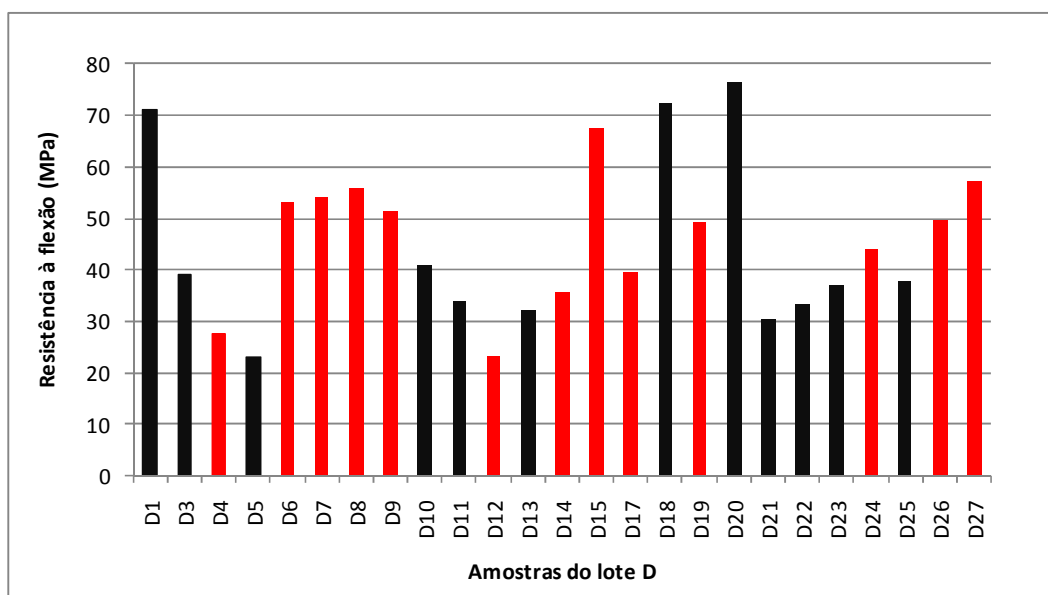


Fig.5.31 – Resistência à flexão ($f_{m,k}$) - Lote “D”

Quadro 5.17 – Valores característicos da resistência à flexão (lote “D”)

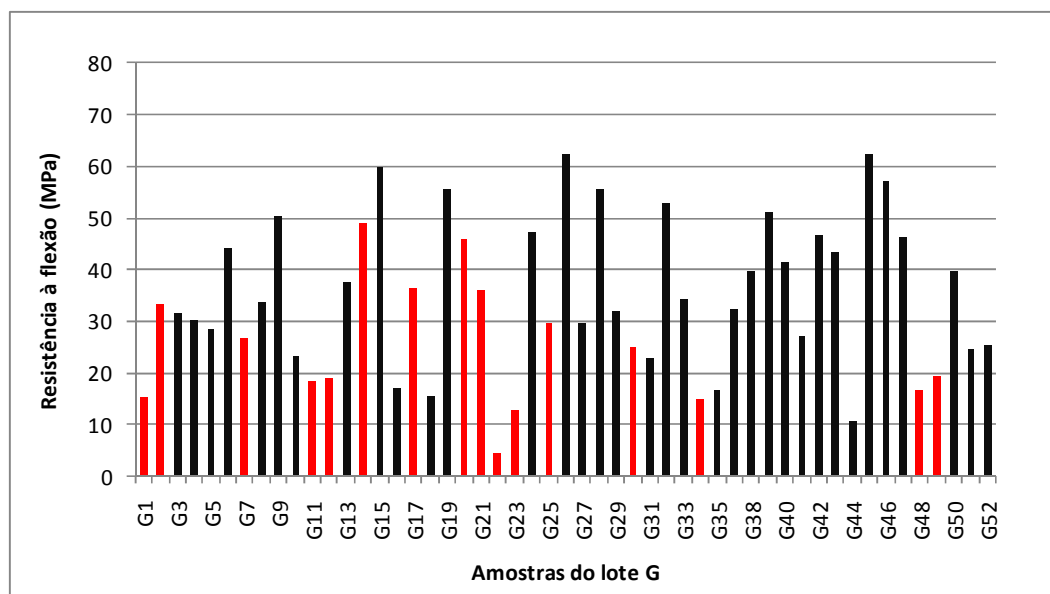
Média	Desvio padrão	Coefficiente de Variação	Valor Característico	Máximo	Mínimo
$f_{m,0}$	σ	CV	$f_{m,0,k}$	f_m máx	f_m min
(MPa)	(MPa)	(%)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
45,5	15,3	33,5	20,5	76,4	23,2

5.5.3.3. Lote “G”

O lote assumiu a mesma imagem ilustrada para o lote “D”, isto é, consiste num conjunto com um elevado coeficiente de variação, já que o desvio padrão representa 31,5% do valor médio ($f_{m,0}$ igual a 47,1 MPa) da amostragem. Isto leva-nos a afirmar que se trata de um lote com elevada dispersão de resultados, evidenciando valores muito distintos, o que se torna particularmente perigoso para a utilização da madeira como elementos estrutural uma vez que estamos a falar de um conjunto com 52 amostras, o que é uma dimensão considerável.

O conjunto pode ser caracterizado por uma resistência característica à flexão de 22,8 MPa, o que corresponde a um valor ligeiramente superior ao definido na proposta de classificação (ver quadro 5.18).

Na figura 5.32 ilustra-se a relação entre a resistência à flexão e a classificação visual realizada previamente aos ensaios mecânicos para o lote das vigas “G”. Uma vez mais, a preto encontram-se representadas as vigas aprovadas e a vermelho as vigas rejeitadas.

Fig.5.32 – Resistência à flexão ($f_{m,k}$) - Lote "G"

Quadro 5.18 – Valores característicos da resistência à flexão (lote "G")

Média	Desvio padrão	Coefficiente de Variação	Valor Característico	Máximo	Mínimo
$f_{m,0}$	σ	CV	$f_{m,0,k}$	$f_m \text{ máx}$	$f_m \text{ min}$
(MPa)	(MPa)	(%)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
47,1	14,8	31,5	22,8	62,1	4,4

5.6 MÓDULO DE ELASTICIDADE

5.6.1. MÓDULO DE ELASTICIDADE OBTIDO A PARTIR DOS ENSAIOS À FLEXÃO

5.6.1.1. Aspectos Gerais

O módulo de elasticidade à flexão estática na direcção do fio é uma propriedade muito importante na análise estrutural, constituindo-se como um indicador ou medida de flexibilidade ou rigidez de um material.

Ao olhar para um conjunto de resultados obtidos experimentalmente consegue-se dizer que esse material é frágil, caso a rotura ocorra ao atingir o limite de proporcionalidade, sem se denotar a presença de deformações que fizessem prever essa situação. Esta informação é importante para o cálculo de estruturas já que o módulo de elasticidade é essencial para calcular deformações e é um parâmetro essencial à quantificação dos esforços em muitas situações.

A determinação do módulo de elasticidade à flexão seguiu os critérios gerais definidos na EN 408 [12], ponto 10, calculando o que é definido na norma como módulo de elasticidade global em flexão e que será aqui referido como módulo de elasticidade em flexão. O procedimento de ensaio realizado foi o descrito para o cálculo da resistência à flexão já que as duas grandezas (módulo de elasticidade e resistência à flexão) basearam a sua determinação no mesmo conjunto de valores obtido a partir de um único ensaio (para cada amostra). Teve-se atenção às indicações sugeridas na norma principalmente no

que refere à velocidade de ensaio e ao facto de não se dever considerar valores acima de 40% da Força máxima.

Convém afirmar que os resultados obtidos para o módulo de elasticidade através de ensaios à flexão são mais representativos comparativamente com aqueles que se obtêm a partir de ensaios à compressão, cuja representatividade pode ser considerada nula para esse efeito.

5.6.1.2. Resultados alcançados com base na norma EN 408

Como foi referido no ponto anterior, o módulo de elasticidade em flexão foi determinado recorrendo à seguinte expressão, presente na norma NP EN 408 [12]:

$$E_{m,g} = \frac{l^3 (F_2 - F_1)}{bh^3 (w_2 - w_1)} \left[\left(\frac{3a}{4l} \right) - \left(\frac{a}{l} \right)^3 \right] \quad (5.8)$$

Sendo que as variáveis contidas na expressão apresentam o seguinte significado:

$F_2 - F_1$: é um incremento de força na porção recta da curva força-deformação, em Newton (N);

$w_2 - w_1$: é o incremento de deformação correspondente a $F_2 - F_1$, em milímetros (mm);

a : distância entre a posição de uma força e o apoio mais próximo, em milímetros (mm);

l : vão em flexão, em milímetros (mm);

b : largura da secção transversal num ensaio de flexão, em milímetros (mm);

h : altura da secção transversal num ensaio de flexão, em milímetros (mm);

O parâmetro da equação que traduz o incremento de força sobre o incremento de deformação pode ser obtido graficamente a partir de uma regressão linear, desde que, segundo a EN 408 [12], o quadrado do coeficiente de correlação linear obtido seja superior a 0,99. Considerou-se que se trata de um valor muito rigoroso e por isso aceitaram-se quadrados dos coeficientes de correlação linear superiores a 0,95, condição satisfeita pela generalidade dos provetes.

A dimensão do vão e a largura e altura da secção transversal variam caso se esteja a ensaiar amostras do lote “G” ou amostras do lote “D”. Apresenta-se de seguida o quadro 5.19 onde se sintetizam os valores para cada um dos lotes em questão.

Quadro 5.19 – Características das amostras dos dois lotes ensaiados

Lote	l (mm)	b (mm)	h (mm)	a (mm)
"D"	995	50	50	300
"G"	1890	60	100	600

Aplicando a expressão (5.8) a todos os provetes ensaiados e utilizando os valores correspondentes do quadro 5.19 conseguiu-se obter dois conjuntos de valores para o módulo de elasticidade em flexão referentes a cada um dos lotes testados.

Considerou-se que a porção recta da curva força-deformação estava delimitada por valores compreendidos entre 20% e 40% da força máxima aplicada. Assim, para cada amostra, bastou calcular os dois valores referidos e encontrar nos valores obtidos experimentalmente aqueles que se fizessem

corresponder aproximadamente. Os quadros 5.20 e 5.21 ilustram os resultados a que se chegou para o lote “D” e “G” respectivamente.

Quadro 5.20 – Módulo de Elasticidade em flexão (lote “D”)

Amostra	$E_{\text{flexão}}$ (MPa)
D1	12684
D3	12119
D4	8971
D5	12313
D6	11399
D7	12310
D8	12036
D9	15442
D10	10711
D11	9390
D12	9195
D13	11391
D14	8519
D15	13214
D17	7384
D18	13907
D19	12492
D20	14949
D21	12786
D22	9867
D23	8327
D24	9448
D25	9893
D26	9950
D27	12021

Quadro 5.21 – Módulo de Elasticidade em flexão (lote “G”)

Amostra	$E_{\text{flexão}}$ (MPa)
G1	7827
G2	10033
G3	9832
G4	11330
G5	10840
G6	11093
G7	9196
G8	10484
G9	8778
G10	9109
G11	8833
G12	10040
G13	8606
G14	11901
G15	11564
G16	11598
G17	9927
G18	7334
G19	10755
G20	11674
G21	11446
G22	6821
G23	8897
G24	13387
G25	8845
G26	10587
G27	9554
G28	11971
G29	9831
G30	11417
G31	9365
G32	7786
G33	10967
G34	8137
G35	10650
G37	9256
G38	11899
G39	10941
G40	7631
G41	10794
G42	10318
G43	11055
G44	11561
G45	9970
G46	10089
G47	9479
G48	9413
G49	8830
G50	8494
G51	9923
G52	7286

Os módulos de elasticidade determinados, tanto para o lote “D” como para o lote “G”, apresentam resultados muito distintos exibindo diferenças assinaláveis. Uma vez mais, é possível encontrar pequenos grupos dentro de cada lote, que se organizam, neste caso, por módulos de elasticidade semelhantes. A figura 5.33 ilustra dois subconjuntos com módulos de elasticidade bem distintos referentes ao lote “G”.

Pela análise da figura, consegue-se perceber diferentes inclinações dos segmentos de recta da curva de resposta das amostras traduzindo-se, no primeiro caso, em valores do módulo de elasticidade em flexão próximos de 8,5 GPa enquanto, no segundo caso, as amostras ilustradas atingiram valores mais elevados (inclinação mais acentuada da recta) à volta de 11,5 GPa.

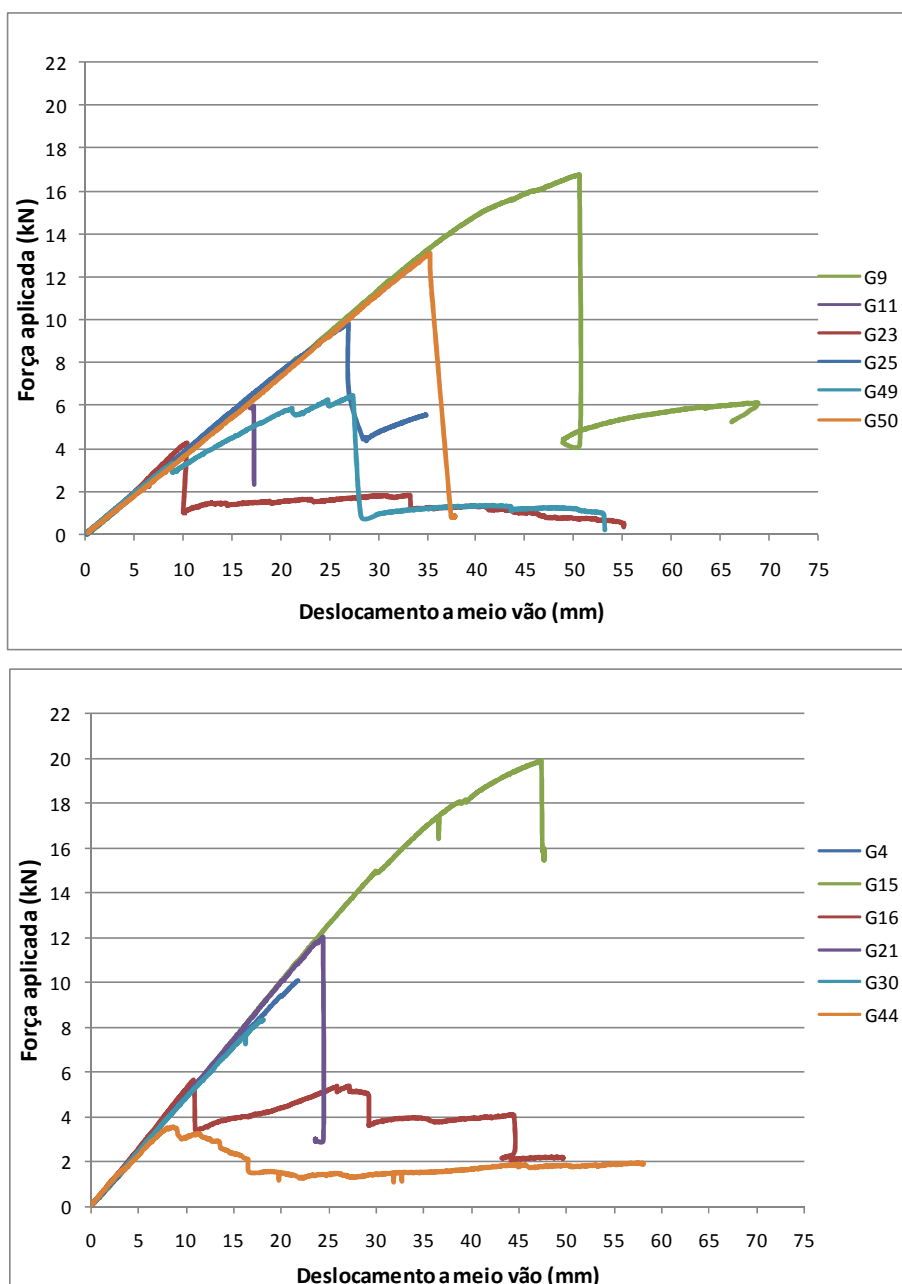


Fig.5.33 – Diferentes Módulos de Elasticidade em flexão - Lote “G”

5.6.1.3. Tratamento estatístico dos valores obtidos

No que refere ao lote “G” verifica-se, analisando tanto a figura 5.34 como o quadro 5.22, que os valores determinados oscilam entre um valor máximo de 13,4 GPa e um valor mínimo de 6,8 GPa, exibindo assim uma amplitude entre eles de 6,6 GPa, o que é um valor significativo. O valor médio encontrado para o conjunto foi de 9,9 GPa e o desvio padrão de 1,4 GPa, representando 14,4% da média. Por sua vez, a média e o desvio padrão referidos deram origem a um valor característico do lote global de 7,6 GPa.

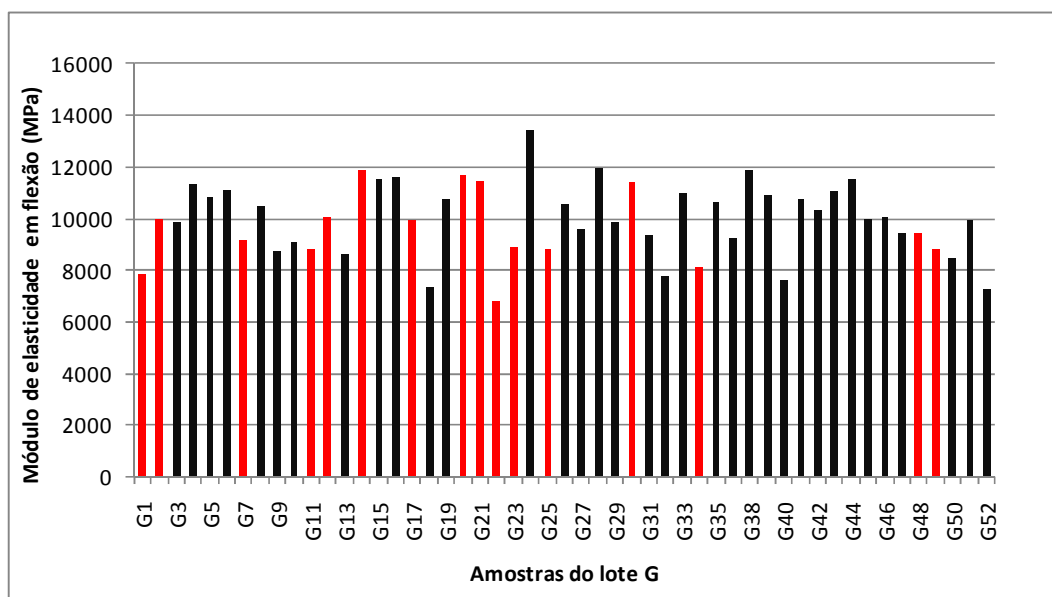


Fig.5.34 – Módulo de Elasticidade em flexão – Lote “G”

Quadro 5.22 – Valores característicos do módulo de elasticidade em flexão (lote “G”)

Média	Desvio padrão	Coefficiente de Variação	Valor Característico	Máximo	Mínimo
E_{mean}	σ	CV	E_k	$E_{m\acute{a}x}$	$E_{m\acute{i}n}$
(MPa)	(MPa)	(%)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
9948	1437	14,4	7592	13387	6821

A variabilidade exibida por este lote para o módulo de elasticidade não é tão marcante como a exibida para o caso da resistência à flexão, já que neste caso o coeficiente de variação cifra-se num valor de 14,4% enquanto no caso referido ultrapassou os 30%. Esta afirmação tem de ser avaliada para o sub-lote das amostras aprovadas para ser possível perceber esta grande diferença. Os defeitos têm influência superior na resistência à flexão.

No que diz respeito ao outro lote ensaiado à flexão, lote “D” (Castanho), o valor médio calculado foi 11,2 GPa e o desvio padrão situou-se em 2,1 GPa, constituindo-se como 18,6% da média (ver quadro 5.23). Com isto afirma-se que a variabilidade não é muito acentuada (apesar de ostentar um valor superior ao lote “G”), já que se alcançaram valores superiores para uma outra grandeza recorrendo ao mesmo aglomerado de registos.

O valor que caracteriza o conjunto é 7,8 GPa, tratando-se portanto de um valor aproximadamente igual ao apresentado pelo conjunto “G”. A amplitude de resultados também é elevada pois a diferença entre o máximo (15,4 GPa) e o mínimo (7,4 GPa), ou seja, é 8 GPa, valor que também é superior ao exibido para o lote “G”.

A figura 5.35 ilustra o valor do módulo de elasticidade em flexão para cada uma das vigas testadas, associando uma cor referente à classificação visual realizada: a preto as vigas aprovadas e a vermelho as vigas rejeitadas.

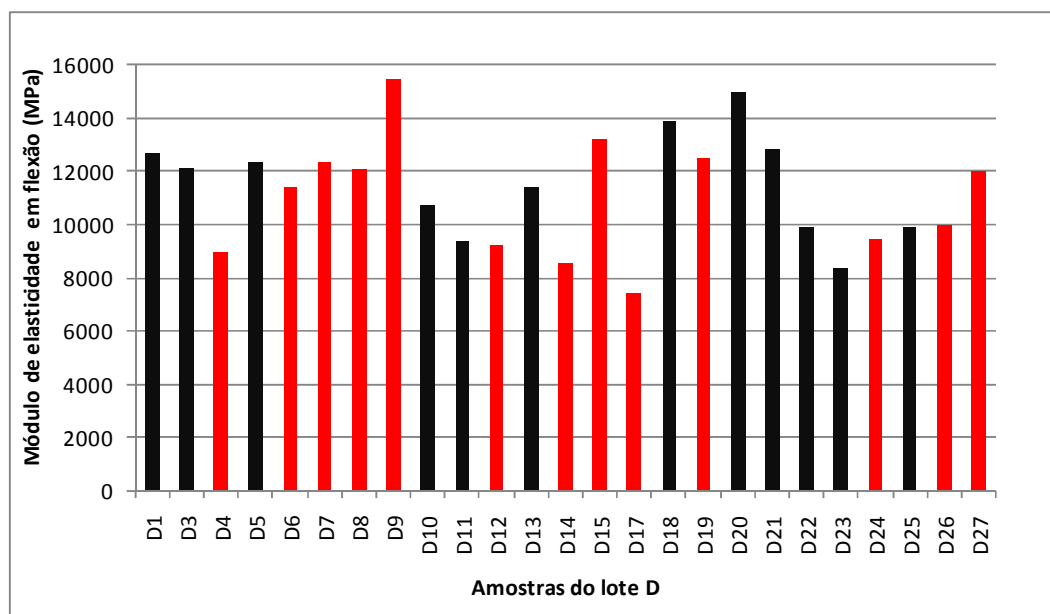


Fig.5.35 – Módulo de Elasticidade em flexão – Lote “D”

Quadro 5.23 – Valores característicos do módulo de elasticidade em flexão (lote D)

Média	Desvio padrão	Coefficiente de Variação	Valor Característico	Máximo	Mínimo
E_{mean}	σ	CV	E_k	$E_{máx}$	E_{min}
(MPa)	(MPa)	(%)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
11229	2094	18,6	7795	15442	7384

Neste caso, os valores sobre os quais deverá incidir a comparação com o valor apresentado pela proposta de classificação visual de madeira antiga são os valores médios dos dois lotes. Para o módulo de elasticidade, a proposta não faz referência a valores característicos mas sim ao valor médio e, por este motivo, a comparação tem de se restringir à média de cada conjunto.

A proposta de classificação visual apresenta, para as espécies de Castanho e Carvalho, o valor de 8,0 GPa para o Módulo de Elasticidade médio (E_{mean}). Como se pode constatar, os valores médios calculados são superiores ao disposto na proposta e com margem considerável, o que constitui uma validação do valor proposto no “método Amorim Faria”.

5.6.2. MÓDULO DE ELASTICIDADE CALCULADO COM BASE NOS ENSAIOS À COMPRESSÃO PARALELA AO FIO

5.6.2.1. Considerações acerca da determinação do módulo de elasticidade

O cálculo do módulo de elasticidade com recurso aos valores registados nos ensaios de compressão teve como finalidade a obtenção de mais informação a respeito da madeira em análise porque, tal como se disse, é dos ensaios à flexão que resultam os valores mais representativos do módulo de elasticidade. Neste sentido, aproveitou-se o facto de se testar setenta e nove amostras à compressão estimando-se valores de resistência à compressão para, com base nos mesmos registos experimentais, se determinar o valor médio do módulo de elasticidade em compressão, avaliado directamente pela medição de deformação axial do provete.

O módulo de elasticidade foi determinado usando o conjunto de valores colhidos experimentalmente, até ao limite de proporcionalidade (porção recta da curva de resposta), partindo de duas formas: a norma EN 408 [12] define, no seu ponto 16 (determinação do módulo de elasticidade em compressão paralela ao fio), uma expressão para o cálculo do módulo de elasticidade:

$$E_{t,0} = \frac{l_1 (F_2 - F_1)}{A (w_2 - w_1)} \quad (5.9)$$

Onde,

$F_2 - F_1$: é um incremento de força na porção recta da curva força-deformação, em Newton (N);

$w_2 - w_1$: é o incremento de deformação correspondente a $F_2 - F_1$, em milímetros (mm);

l_1 : comprimento de medida para a determinação do módulo de elasticidade, em milímetros (mm);

A : área de secção transversal, em milímetros quadrados (mm²);

Uma outra forma de calcular o módulo de elasticidade assenta numa determinação gráfica a partir de representações que relacionam a tensão de compressão com a extensão entre placas de ensaio. Obtendo-se a curva de resposta, o $E_{c,0}$ é determinado através de uma regressão linear onde, segundo a EN 408 [12], o quadrado do coeficiente de correlação deverá ser superior a 0,99. Uma vez mais achou-se o valor demasiado rigoroso e optou-se por considerar as amostras nas quais que se registou um quadrado do coeficiente de correlação mínimo de 0,95, o que se verificou nas setenta e nove amostras ensaiadas.

Além dos gráficos que relacionam a tensão de compressão com a extensão entre placas também se retirou informação através de relações gráficas entre a tensão de compressão com a extensão no terço central do provete. A medição do deslocamento no terço central torna-se mais rigorosa do que a medida entre os pratos perto de se atingir a carga máxima e no regime plástico evidenciado após esta, já que os fenómenos de encurvadura tiram rigor à deformação entre pratos.

No início da campanha experimental referente aos ensaios de compressão, dispunha-se de setenta e nove amostras para serem submetidas ao esforço em estudo. Trata-se sem dúvida de um número relevante e, por isso, era importante otimizar o tempo de preparação de cada ensaio. Primeiramente pensou-se em utilizar três extensómetros, dois colocados nas faces laterais da amostra e o outro na placa inferior da prensa, tal como foi dito no capítulo quatro. Mas este procedimento exigia o dispêndio de tempo considerável, já que a colocação dos extensómetros nas faces laterais exigia alguns cuidados para assegurar a qualidade da leitura. Com isto, pensou-se numa medida para tornar os ensaios mais sistemáticos: optou-se por testar alguns provetes com o esquema de ensaio idealizado inicialmente, isto é, com os três extensómetros, para que, face aos resultados obtidos, se conseguisse

encontrar uma relação entre o valor das extensões entre placas e o valor das extensões registadas no terço central. Assim conseguia-se obter a extensão do terço central a partir dos valores medidos experimentalmente para o deslocamento entre placas, recorrendo a uma correlação para cada um dos lotes. Tentou-se também encontrar uma relação que conciliasse e definisse os dois lotes ensaiados, traduzida por uma única equação, mas o resultado não foi satisfatório.

5.6.2.2. Correlações da extensão entre placas com a extensão do terço central

Para o lote “Ac”, inicialmente prepararam-se três amostras com os extensómetros colocados nas faces laterais e ensaiaram-se à compressão com o procedimento explicado no capítulo anterior. Obtiveram-se então dois conjuntos de deslocamentos (entre placas e no terço central) para cada amostra e, aplicando a tais grupos de valores a expressão 5.5, obtiveram-se as respectivas extensões. A relação entre elas foi determinada através de uma regressão linear que poderia ser classificada como boa aproximação para se calcularem as futuras extensões no terço central caso o seu declive (assinalado na equação como o membro que acompanha o valor de “x”) fosse próximo de um.

Tal como mostra a figura 5.36, o declive da recta afastou-se muito do valor que traduzia a interacção perfeita entre as extensões, o que correspondia a uma recta com inclinação de quarenta e cinco graus (45°), apresentando um valor próximo de 1,8. Por este motivo resolveu-se aumentar o número de amostras ensaiadas com os três extensómetros para averiguar se a dispersão de valores diminuía e consequentemente se chegava a uma relação mais satisfatória (ver figura 5.37).

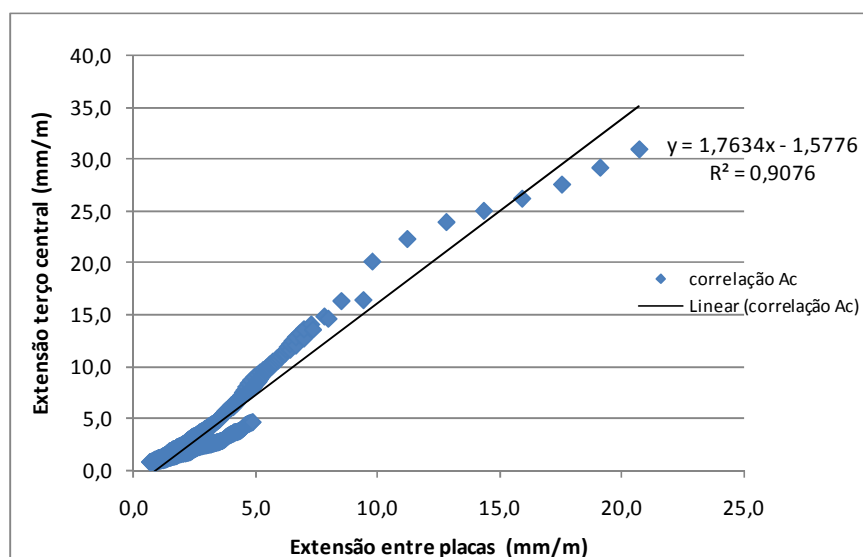


Fig.5.36 – Correlação entre extensões obtida a partir de três amostras “Ac”

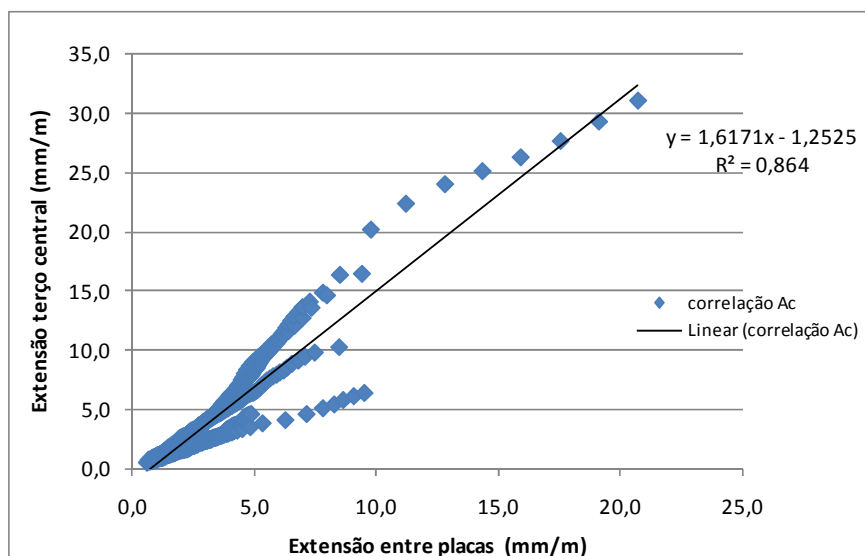


Fig.5.37 – Correlação entre extensões obtida a partir de cinco amostras “Ac”

Como se pode constatar, o benefício não foi muito já que a recta da regressão continuou a exibir um valor elevado para ser considerada uma boa aproximação de extensões no terço central.

O pressuposto utilizado no conjunto “Dc” foi idêntico ao exposto no ponto anterior para o lote “Ac” e por isso apenas se apresenta a correlação obtida (ver figura 5.38). A única diferença residiu na consideração de três amostras enquanto no caso do lote “Ac” se utilizaram cinco.

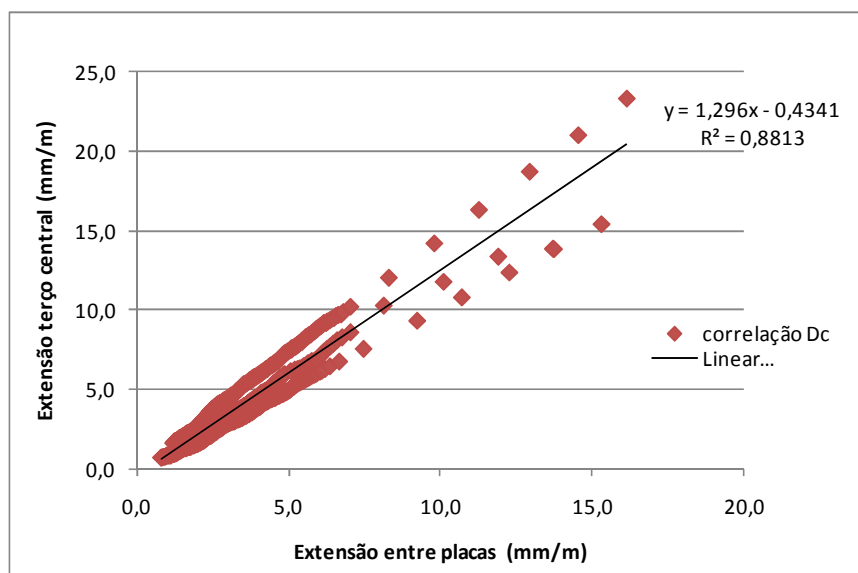


Fig.5.38 – Correlação entre extensões obtida a partir de três amostras “Dc”

A regressão linear obtida apresentou-se com um valor aceitável e por isso considerou-se apta a ser usada no cálculo de extensões no terço central para os restantes vinte e cinco provetes do lote “Dc”.

5.6.2.3. Resultados obtidos

Depois de se terem exposto os processos usados na determinação do módulo de elasticidade em compressão paralela ao fio, mostram-se neste ponto os resultados a que se chegou aplicando o descrito no ponto anterior. Assim, apresentam-se três aglomerados de valores para cada lote, um referente ao processo que tem por base a expressão 5.9 da norma EN 408 [12], um outro relativo ao processo baseado na regressão linear entre a tensão de compressão e a extensão entre placas e por fim, ainda outro que utiliza a correlação entre extensões explicada no ponto anterior.

O quadro 5.24 ilustra os três conjuntos de resultados determinados para o lote “Dc”. Como se pode verificar, os dois primeiros conjuntos evidenciam valores semelhantes uma vez que a expressão 5.9, base de cálculo para se obter a primeira coluna de valores ($E_{t,0}$), foi definida para o intervalo utilizado no gráfico que relaciona a tensão de compressão com a extensão entre placas de ensaio e para a respectiva regressão linear (usada para determinar a segunda coluna de valores – $E_{t,1}$). Por seu turno, a terceira coluna de valores ($E_{t,2}$) difere das duas restantes porque o coeficiente de correlação entre extensões encontrado não é exactamente igual à unidade (para o lote “Dc” o coeficiente é igual a 1,296), o que condicionou a obtenção dos valores da extensão no terço central e por sua vez o respectivo módulo de elasticidade.

Quadro 5.24 – Módulos de Elasticidade em compressão paralela ao fio (lote “Dc”)

Amostra	$E_{t,0}$ (MPa)	$E_{t,1}$ - entre placas (MPa)	$E_{t,2}$ - terço central (MPa)
Dc1	8421	8610	6643
Dc2	8047	8555	6601
Dc3	6015	6126	4727
Dc4	6857	7224	5574
Dc5	6703	6485	5004
Dc6	9384	9190	7091
Dc7	6785	6639	5123
Dc8	11002	10570	8156
Dc9	11021	10566	8153
Dc10	12318	12377	9550
Dc11	8585	8230	6404
Dc12	10910	11145	8600
Dc13	8815	8615	6648
Dc14	6436	6006	4634
Dc15	7551	7650	5903
Dc16	9439	9126	7042
Dc17	9655	9146	7057
Dc18	12127	11695	9024
Dc19	11028	10434	8051
Dc20	9101	8249	6388
Dc21	7870	7949	6133
Dc22	9090	9004	6942
Dc23	10514	10107	7800
Dc24	9173	9148	7059
Dc25	6352	5921	4579
Dc26	10454	10229	7893
Dc27	8889	9294	7171
Dc28	10699	10942	8443

No que refere ao conjunto “Ac”, seguiu-se o mesmo procedimento que foi apresentado para o lote “Dc”, elaborando-se o quadro 5.25. Este quadro contém três colunas com as mesmas designações das contidas no quadro 5.24.

Os valores obtidos para o módulo de elasticidade calculado a partir da relação entre a tensão de compressão e a extensão no terço central foram, à semelhança do que se verificou no quadro anterior, diferentes dos evidenciados para os outros dois conjuntos. A razão que justificou este facto para o lote “Dc” também se adequa ao grupo de amostras em questão (conjunto “Ac”), uma vez que o coeficiente de correlação entre extensões difere da unidade (no caso do lote “Ac” é igual a 1,62).

As restantes duas colunas exibem valores parecidos, pela mesma razão apresentada para o lote “Dc”.

Quadro 5.25 – Módulos de Elasticidade em compressão paralela ao fio (lote “Ac”)

Amostra	$E_{t,0}$ (MPa)	$E_{t,1}$ - entre placas (MPa)	$E_{t,2}$ - terço central (MPa)
Ac1	8177	8108	6583
Ac2	7154	7240	5878
Ac3	8492	8582	6968
Ac4	6978	7077	5746
Ac5	4344	4183	3396
Ac6	5527	5483	4452
Ac7	11452	11403	9258
Ac8	9334	9687	7865
Ac9	8090	8077	6558
Ac10	9717	9955	8082
Ac11	9023	9433	7658
Ac12	4394	4171	3379
Ac13	8903	8457	6866
Ac14	6930	6920	5537
Ac15	7553	7439	6040
Ac16	7102	7148	5804
Ac17	8958	9371	7608
Ac18	8090	8635	7011
Ac19	7626	7836	6362
Ac20	5865	5653	4589
Ac21	7635	7409	6015
Ac22	8873	9104	7392
Ac23	7820	7716	6313
Ac24	7557	7259	5893
Ac25	8722	8277	6720
Ac26	7778	7929	6437
Ac28	7880	7279	5910
Ac29	9023	9544	7749
Ac30	6316	6334	5142
Ac31	3324	3376	2741
Ac32	7594	8061	6544
Ac33	6644	7131	5790
Ac34	7010	7226	5867
Ac35	9439	9501	7714
Ac36	8285	8120	6592
Ac37	7277	6902	5604
Ac38	7686	7384	5995
Ac39	10683	10816	8781
Ac40	7720	7459	6056
Ac41	7716	8506	6906
Ac42	6436	6006	4877
Ac43	9195	9661	7843
Ac44	9439	8623	7001
Ac45	6930	6645	5395
Ac46	7720	7323	5946
Ac47	5830	6109	4960
Ac48	9290	8473	6879
Ac49	7700	7645	6207
Ac50	8836	8732	7089
Ac51	7553	7326	5948

5.6.2.4. Tratamento dos resultados alcançados

O tratamento estatístico realizado sobre os resultados do módulo de elasticidade em compressão paralela ao fio seguiu os mesmos passos explicados para as restantes grandezas sobre as quais se efectuaram tratamentos semelhantes. O grupo de valores obtido a partir da expressão contida na EN 408 [12] foi o único considerado para o tratamento estatístico executado neste ponto.

A figura 5.39 e o quadro 5.26 sintetizam o trabalho realizado sobre os resultados do lote “Dc”. Como se pode constatar, obteve-se um valor médio de 9,0 GPa e um desvio padrão de 1,8 GPa. Trata-se pois de um conjunto sem grande dispersão de valores (coeficiente de variação próximo de 20%) mas com amplitude de resultados enorme, variando entre o valor máximo de 12,3 GPa e o valor mínimo de 6,0 GPa (diferença entre os extremos de 6,3 GPa). Com isto pode-se concluir que, apesar de ser um conjunto relativamente homogêneo, a diversidade de resultados é grande.

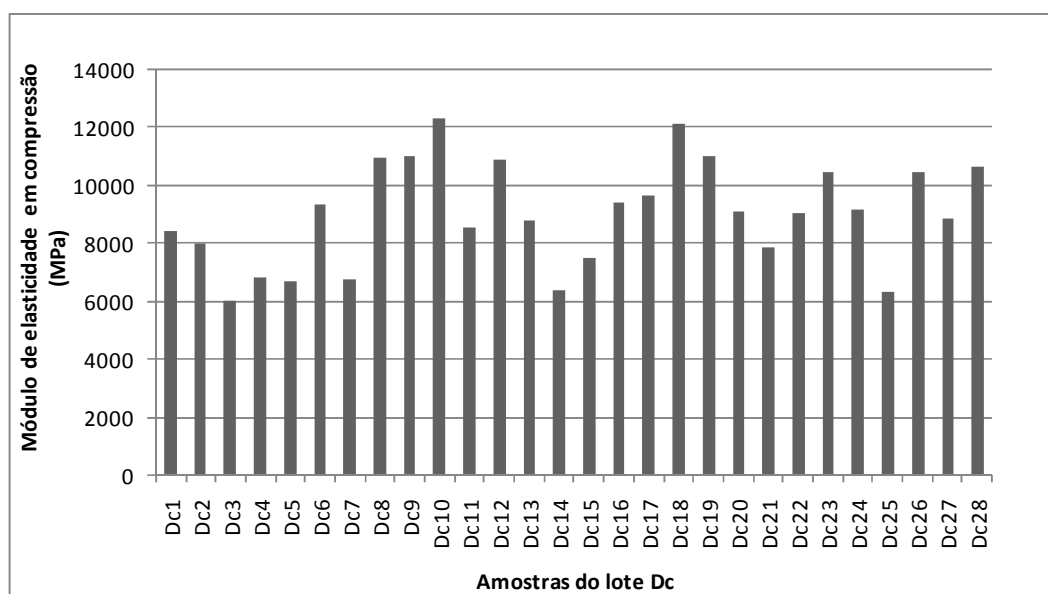


Fig.5.39 – Módulo de Elasticidade em compressão paralela ao fio – Lote “Dc”

Quadro 5.26 – Valores característicos do módulo de elasticidade em compressão paralela ao fio (lote “Dc”)

Média	Desvio padrão	Coeficiente de Variação	Valor Característico	Máximo	Mínimo
$E_{mean,t}$	σ	CV	$E_{t,0,k}$	$E_{t,c} \text{ máx}$	$E_{t,c} \text{ min}$
(MPa)	(MPa)	(%)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
9044	1793	19,8	6104	12318	6015

O quadro 5.27 apresenta os valores das grandezas estatísticas determinadas para o conjunto de amostras “Ac” (Carvalho). Neste sentido, chegou-se a um valor médio do conjunto de 7,8 GPa, com o respectivo desvio padrão de 1,5 GPa. O coeficiente de variação atingiu um valor moderado (próximo de 20%), revelando que o conjunto ensaiado alguma dispersão. Essa dispersão de valores fica mais uma vez evidente quando se analisa a diferença entre o valor máximo e o valor mínimo, iguais a 11,5

GPa e 3,3 GPa respectivamente. Numericamente, esta diferença é traduzida em 8,2 GPa, significando que se trata de um conjunto não homogêneo e com elevada dispersão de resultados.

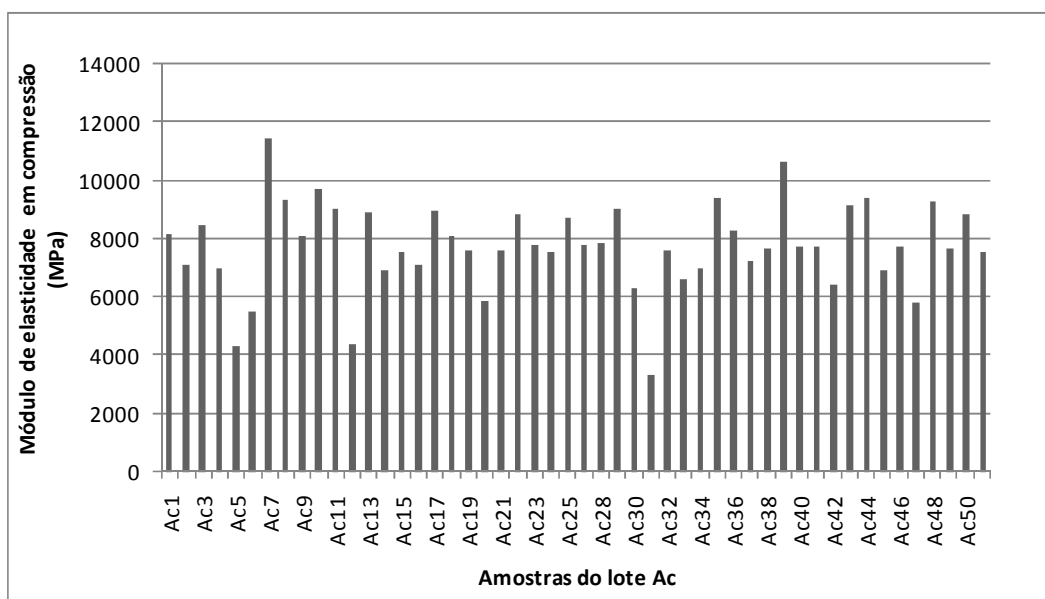


Fig.5.40 – Módulo de Elasticidade em compressão paralela ao fio – Lote “Ac”

Quadro 5.27 – Valores característicos do módulo de elasticidade em compressão paralela ao fio (lote “Ac”)

Média	Desvio padrão	Coefficiente de Variação	Valor Característico	Máximo	Mínimo
$E_{mean,t}$	σ	CV	$E_{t,0,k}$	$E_{t+c} \text{ máx}$	$E_{t+c} \text{ min}$
(MPa)	(MPa)	(%)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
7752	1518	19,6	5264	11452	3324

É conveniente referir-se que ficam por fazer, por limitação do tempo disponível, o tratamento dos resultados de um conjunto constituído apenas pelas amostras aprovadas. Isto poderia levar a conclusões diferentes, nomeadamente a respeito da dispersão de resultados que se ia revelar, em princípio, muito menor. Por outro lado, parece possível também concluir-se que no que se refere ao módulo de elasticidade em compressão o efeito dos defeitos e do incêndio é menos significativo do que na flexão, conclusão que importa validar com o tratamento estatístico do sub-lote dos provetes aprovados.

6

INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

6.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo desenvolvem-se e apresentam-se as principais conclusões que são possíveis de extrair dos resultados dos ensaios e que se sintetizam no capítulo anterior. Para isto, dividiu-se a interpretação de resultados conforme a espécie botânica em análise: numa primeira parte do capítulo (6.2) começou-se por tecer comentários a respeito dos lotes de madeira de Carvalho (lotes “G” e “Ac”) e do seu comportamento face às solicitações de compressão axial e de flexão; também se levou a discussão os valores obtidos para a massa volúmica e o módulo de elasticidade (tanto em flexão como em compressão paralela ao fio). A segunda parte do capítulo (6.3) apresenta exactamente a mesma estrutura da fase anterior mas refere-se aos lotes de madeira de Castanho (lotes “D” e “Dc”).

Na parte final do capítulo surge a validação da proposta de classificação visual, apresentada pelo método “Amorim Faria”, comparando os valores obtidos experimentalmente com os valores sugeridos. Este ponto poderá ajudar a perceber se o método proposto tem fundamento para sustentar a certificação das propriedades mecânicas a utilizar no cálculo ou reaproveitamento de elementos de madeira antiga em sistemas estruturais.

6.2. LOTES DE MADEIRA DE CARVALHO

Este subcapítulo abrange a interpretação de resultados dos lotes “G” e “Ac”, constituídos por madeira de carvalho ardida, facto que permitindo obter conclusões bastante interessantes. Os pontos referentes à massa volúmica e ao módulo de elasticidade apresentam observações que incidiram sobre os resultados dos dois lotes em questão enquanto os restantes dois pontos, identificados por 6.2.2 e 6.2.3., compreendendo respectivamente a resistência à compressão axial e a resistência à flexão, tratam de explicar de uma forma menos numérica os resultados alcançados para essas duas propriedades mecânicas.

6.2.1. MASSA VOLÚMICA

A massa volúmica, tal como se explicou no Capítulo 2, é uma medida indirecta de qualidade e uma característica intrínseca à madeira, isto é, está associada às condições de formação do lenho e à espécie botânica em questão. É fácil de determinar e tem grande interesse por estar directamente associada à resistência (ambas evoluem no mesmo sentido, considerando defeitos semelhantes e a mesma espécie).

Os dois lotes são formados por madeira da mesma espécie botânica, e da mesma proveniência, e como tal seria expectável que apresentassem valores semelhantes para a massa volúmica, com os seus valores máximos e mínimos relativamente próximos (entre lotes), mesmo sabendo que existe uma certa variação dentro de elementos da mesma espécie e dentro de uma árvore (nos sentidos longitudinais e radiais).

Verificou-se que, como está patente nos quadros 5.6 e 5.8, os valores obtidos do tratamento estatístico são idênticos, tanto no que refere aos extremos do intervalo como ao valor médio ou até mesmo ao valor característico. Os conjuntos “G” e “Ac”, compostos por provetes de dimensões diferentes, exibem valores caracterizadores praticamente iguais, permitindo dizer que o lenho se formou sobre as mesmas condições ambientais e que provavelmente os lotes são oriundos de árvores do mesmo local. Os conjuntos de madeira ardida apresentam-se muito homogêneos em termos de massa volúmica, pois os coeficientes de variação registados rondam os 7-8%. Por seu turno, a gama de valores é considerável já que estes se situam entre 500 kg/m^3 e 700 kg/m^3 , justificada pela variabilidade presente dentro de uma espécie botânica de madeira.

Sabia-se que, antes da determinação da massa volúmica, a madeira de carvalho foi obtida a partir de vigas e de outros elementos estruturais de um edifício consumido por um incêndio. A determinação da massa volúmica permitiu concluir, que além de pertencerem à mesma espécie botânica, a madeira das amostras esteve submetida às mesmas condições ambientais na sua génese e mais tarde enquanto parte dos elementos estruturais do edifício em questão. De uma forma geral, permite inferir que se encontra completamente estabilizada em termos de secagem/teor de água.

O fogo, registado no edifício de onde surgiu a madeira para a composição das amostras, pode ter influenciado os valores da massa volúmica dos lotes, na medida em que a decomposição em gases inflamáveis pode conduzir a perdas de integridade com a potencial deterioração de material da secção residual (diminuição da massa das amostras). Isto pode justificar o facto dos valores médios dos lotes “G” e “Ac” (respectivamente iguais a $\rho_k = 598,0 \text{ kg/m}^3$ e $\rho_k = 603,6 \text{ kg/m}^3$) serem próximos do limite mínimo fixado na proposta de classificação visual para a espécie botânica de Carvalho ($\rho = 600 \text{ kg/m}^3$). A aplicação deste critério a cada amostra individual poderia conduzir à rejeição, em termos de classificação visual, da maioria das amostras do lote “G”, ensaiado à flexão e previamente submetido à inspecção visual pelo “método Amorim Faria”, caso o critério que estipula um valor mínimo para a massa volúmica seja considerado rígido e eliminatório.

Neste caso, a massa volúmica não parece ser um critério determinante. A determinação simplificada realizada neste trabalho não permite interpretar com rigor os valores extraídos, mas é importante para ajudar a definir a espécie (mesmo neste caso particular de madeira ardida). A identificação da espécie por métodos visuais completados por análise em laboratórios de carotes extraídos no local constitui um procedimento fundamental para se obter valores rigorosos de massa volúmica.

Em conclusão, parece possível dizer-se que o critério da massa volúmica mínima deverá ser excluído do “método Amorim Faria” de classificação de madeira antiga com base na limitação de defeitos.

6.2.2. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO PARALELA AO FIO DA MADEIRA

A interpretação de resultados realizada neste ponto incide sobre as grandezas estatísticas calculadas sobre os valores experimentais obtidos a partir dos ensaios à compressão axial das amostras do lote “Ac” (quadro 5.12). Como ficou demonstrado pelos resultados da determinação da massa volúmica, os lotes “Ac” e “G” apresentam elementos constituídos por madeira de origem semelhante. Com isto, pode-se afirmar que os comentários tecidos sobre os valores da resistência à compressão também caracterizam a madeira do lote “G”, que apenas foi ensaiado à flexão. Procura-se agora desenvolver e

completar as afirmações proferidas ao longo do capítulo cinco, particularmente na exposição do ponto 5.4.

O conjunto “Ac” apresenta-se relativamente homogêneo em torno da média ($f_{c,0} = 36,4$ MPa), manifestando um coeficiente de variação aproximadamente igual a 20%.

Está patente uma diferença importante entre os valores extremos do conjunto, máximo e mínimo, situados numa grandeza próxima de 30 MPa. Esta amplitude de valores pode motivar preocupação face ao comportamento da madeira antiga e ardida (neste contexto) quanto sujeita a esforços de compressão axial, fundamentando a necessidade de se usarem coeficientes de segurança que possam prever a ocorrência frequente de madeira menos resistente. Com o alargamento da margem de segurança introduzida nos valores resistentes de madeira estrutural, pode-se compensar a falta de certeza a respeito da resposta futura, caso uma possível inspecção visual prévia não tenha revelado indícios de um possível mau comportamento levando à consequente rejeição da peça estrutural.

Como foi dito ao longo desta dissertação, os ensaios à compressão surgiram para se conseguir ter um ponto de referência prático com o qual se possa comparar e validar o valor proposto na classificação visual de madeira estrutural antiga. O valor característico do conjunto, 24,6 MPa, situa-se relativamente próximo do referido na metodologia de classificação proposta (20,7 MPa). Mesmo assim existe uma pequena margem de segurança, já que se associa às madeiras aprovadas uma resistência menor comparativamente com os valores experimentais, permitindo, em primeira instância, validar o método na parte respeitante ao valor característico da resistência à compressão axial. Contudo, não se deve resumir a análise apenas ao valor característico do conjunto porque, tal como se exhibe na apresentação de resultados (figura 5.21 e quadro 5.12), alguns provetes registaram valores resistentes muito baixos e, em alguns casos, inferiores a 20,7 MPa.

O valor mínimo do conjunto, $f_{m \min} = 16,8$ MPa, situa-se abaixo do valor característico sugerido na metodologia de inspecção visual e como tal este valor não abrange todas as situações verificadas num universo de cinquenta e uma (51) amostras. Analisando a figura 5.21, pode-se detectar dois provetes com resistência à compressão axial abaixo do valor característico estipulado no método “Amorim Faria”, o que representa aproximadamente 4% do número total de provetes ensaiados.

O valor das amostras não rejeitadas com resistência inferior ao valor 20,7 MPa é assim muito reduzido e permite concluir que, mesmo para madeira ardida, é possível usar o método sem problemas para elementos que irão funcionar à compressão.

6.2.3. RESISTÊNCIA À FLEXÃO

Para comentar e interpretar o comportamento da madeira ardida de Carvalho quando se encontra submetida a esforços de flexão, utilizaram-se os valores obtidos com os ensaios do lote “G” e o tratamento estatístico que sobre eles incidiu, sintetizado na figura 5.32 e no quadro 5.18. Algumas considerações foram introduzidas ao longo da exposição dos resultados, mas de uma forma muito superficial, sendo assim alvo de aprofundamento neste ponto.

Em termos estatísticos, o valor característico da resistência à flexão do conjunto ficou-se por 22,8 MPa, superior ao valor proposto no “método Amorim Faria” ($f_{m,0,k} = 21,0$ MPa). A diferença entre os valores característicos é relativamente pequena, o que pode levar a alguma falta de segurança caso se considere o valor proposto como representativo da espécie de Carvalho. Isto torna-se evidente quando se faz uma avaliação do agregado de resistências singulares à flexão já que se verifica a existência de doze provetes com resistência inferior a 21,0 MPa., representando 23% do número total de amostras. A amplitude de valores registados reforça esta afirmação já que se testemunhou uma diferença entre

valores extremos da ordem de 58 MPa, o que representa uma enorme dispersão de resultados. Sendo assim, a tentativa de atribuir um valor característico a um conjunto com dispersão tão elevada é quase inútil já que a grandeza do intervalo de valores é quase igual ao valor máximo registado ($f_{m \text{ máx}} = 62,1$ MPa), significando com isto que o valor encontrado não representa correctamente o lote “G”. Deve, no entanto, esclarecer-se que estas considerações se referem ao conjunto global das vinte e sete amostras o que reforça a necessidade de classificação e consequente rejeição das peças mais defeituosas.

A madeira ardida revelou uma enorme variabilidade de comportamentos, revestindo a sua aplicação em estruturas de pouca segurança, especialmente quando incidem sobre as peças esforços de flexão. Concluiu-se por isso que o aproveitamento de madeira ardida com a finalidade estrutural não é aconselhável, uma vez que não se conseguiram arranjar indicadores fiáveis que pudessem prever a resposta de uma percentagem considerável da população. Esta é a principal conclusão que se pode tirar dos ensaios à flexão sobre as cinquenta e duas vigas do lote “G”.

No Capítulo 5, particularmente no ponto 5.5, falou-se de um modo geral dos mecanismos de rotura registados pelas amostras, explicando a rotura que seria expectável e que foi comum a grande parte das vigas ensaiadas. Contudo, tal como se disse, verificaram-se roturas violentas por corte, mesmo para pequenas tensões aplicadas, motivando uma certa apreensão e conduzindo a uma postura de desconfiança face à aplicação de madeira ardida em estruturas, já que algumas destas vigas foram aprovadas (G4, G10, G18, G51).

Outras vigas, que exibiram mau comportamento à flexão com roturas frágeis, evidenciavam sinais visuais menos agradáveis (combinações desfavoráveis de defeitos naturais) detectados pela inspecção realizada antes de cada ensaio. Estes sinais de fragilidade faziam adivinhar comportamentos menos resistentes mas sem indícios que pudessem apontar para um prognóstico preocupante caracterizado em traço gerais por roturas por corte.

Assim deduz-se que, tendo como ferramenta de previsão a classificação visual de madeiras, não é seguro prever o comportamento de madeira ardida nas estruturas, já que os casos onde a rotura atingiu contornos imprevisíveis representaram quase 14 % do número total de amostras ensaiados (sete vigas em cinquenta e duas). Outro motivo que justifica a afirmação anterior é o facto de, mesmo tendo em conta que o operador não tinha experiência na inspecção visual realizada, a classificação baseada em limitações das dimensões de defeitos não conseguiu colocar todas as vigas mais frágeis na classe “*Rejeitada*”, aprovando algumas que posteriormente evidenciaram roturas por corte ou resistência à flexão muito baixa. No que refere ao lote em estudo, as amostras G4, G10, G18 e G51 foram aprovadas porque aparentemente cumpriam os critérios pré-estabelecidos no método de classificação visual mas, todas elas evidenciaram roturas frágeis por corte. Por outro lado, também ocorreram casos, como o G14, que foram rejeitados por não cumprirem as limitações impostas mas que depois vieram a apresentar um bom comportamento geral e um mecanismo de rotura dentro do esperado.

Com base no que foi dito no parágrafo anterior pode-se assim identificar algumas limitações no “método Amorim Faria” apresentado e a incapacidade deste prever com rigor o comportamento das vigas face às solicitações. Torna-se difícil aplicar a classificação visual a madeiras antigas *in situ* porque não se consegue ver o estado da peça no seu interior e com isto surge a impossibilidade de relatar eventuais patologias bióticas e as suas consequências (ocos no interior ou nós ocultos).

Convém não esquecer que a variação do esforço que uma peça de madeira pode suportar é afectada de uma forma expressiva pela direcção da carga em relação à direcção das fibras, pela massa volúmica, pelo teor em água e pelos defeitos.

6.2.4. MÓDULO DE ELASTICIDADE

Sabe-se que, a partir do Módulo de Elasticidade, é possível determinar a resistência à flexão e obter uma relação da rigidez de uma viga. Por outro lado, sabe-se que, para um mesmo nível de tensão aplicada, quando maior for o módulo de elasticidade menor é a deformação exibida pela amostra (Lei de Hooke).

Neste ponto, apresentam-se as principais conclusões que é possível extrair a respeito dos valores obtidos para o módulo de elasticidade. Como se verificou no capítulo anterior, a determinação do módulo de elasticidade incidiu fundamentalmente sobre os valores dos ensaios à flexão, mas também se procurou retirar informações a respeito desta propriedade mecânica a partir dos resultados dos provetes ensaiados à compressão axial. Como tal, a interpretação de resultados incide, no caso dos lotes de madeira de Carvalho, principalmente sobre os resultados das amostras “G”, ensaiadas à flexão.

A análise dos valores estatisticamente obtidos para o lote “G” revela um conjunto moderadamente homogêneo em torno do valor médio de $E_{\text{mean}} = 9,9 \text{ GPa}$ (informação contida num coeficiente de variação relativamente baixo). Ao contrário do que aconteceu com a resistência à flexão do lote “G”, que apresentava uma variabilidade grande em torno do valor médio, os valores obtidos para o módulo de elasticidade das amostras são menos dispersos. Contudo está patente uma gama de valores muito grande traduzida pela relação entre os extremos: o valor máximo é igual a aproximadamente o dobro do valor mínimo registado, significando isto que em termos de deformabilidade as amostras evidenciam respostas bem diferentes. Este facto era expectável uma vez que o comportamento resistente de alguns provetes demonstrou roturas frágeis, isto é, atingiram a tensão máxima sem qualquer tipo de aviso prévio (nomeadamente deformações), enquanto outras exibiram deformações consideráveis na fase elástica de aplicação de carga atingindo o instante da força de rotura de forma bem visível.

O valor mais baixo registado para o módulo de elasticidade em flexão foi obtido para o mesmo provete que evidenciou a menor resistência à flexão: G22: este facto comprova afirmação anteriormente proferida relativa à relação existente entre a tensão instalada e o módulo de elasticidade.

Verificou-se, em alguns provetes com módulos de elasticidade elevados, que após se retirar a solicitação, com a subida da célula de carga, parte da deformação visível da peça foi recuperada. A maioria das fendas geradas durante o ensaio fecharam, comprovando-se com a aproximação das partes opostas da zona fissurada. Estes provetes evidenciaram um comportamento elástico praticamente até à rotura o que pode constituir uma desvantagem ao nível da ocultação de alguma degradação das fibras interiores.

Face ao valor médio apresentado no início deste ponto pode-se dizer que, mesmo para madeira ardida, o valor apresentado na proposta de classificação visual satisfaz as exigências de margem de segurança. Por outro lado, o valor mínimo do módulo de elasticidade em flexão, evidenciado no quadro 5.22, é inferior ao valor médio definido na proposta, à semelhança do que acontece com mais cinco valores dentro do conjunto (como se pode constatar na figura 5.34), representando quase 12% da amostragem.

Em termos gerais, a capacidade de deformação evidenciada para a madeira antiga é variável, não se verificando grande dispersão de valores face à média do conjunto mas evidenciando comportamentos bem distintos, dentro do lote “G”. A grande amplitude de valores justifica-se pela presença de casos extremos, geradores de mais um sinal de alerta a respeito da madeira antiga e ardida, mas que vai de encontro ao referido na resistência à flexão, quando se descreveu a presença de comportamentos frágeis.

A medição do módulo de elasticidade em compressão axial, para o lote “Ac”, não permitiu concluir nada de relevante já que os valores obtidos fogem completamente daquilo que seria susceptível de ser aceite. Os valores presentes no quadro 5.27 não têm qualquer tipo de representatividade para o módulo de elasticidade já que diferem bastante dos valores obtidos com os resultados dos ensaios à flexão e a sua grandeza exibida não pode ser a verdadeira. Concluiu-se assim, como seria de esperar, que não é possível estimar o módulo de elasticidade de peças de madeira a partir da análise directa por ensaios à compressão.

6.3. LOTES DE MADEIRA DE CASTANHO

O procedimento seguido para relatar factos relacionados com os lotes de Carvalho, comentando-os numa fase posterior, vai ser utilizado também para o caso dos lotes de madeira de Castanho, ou seja, para os lotes “D” e “Dc”.

6.3.1. MASSA VOLÚMICA

Uma vez mais, os dois lotes em questão são formados por elementos de madeira da mesma espécie botânica e em princípio seria de esperar valores semelhantes, em termos gerais, para a massa volúmica, contando com as devidas variações dentro da espécie e mesmo dentro da árvore (tal como já foi referido).

Pela análise dos valores apresentados no capítulo cinco, nomeadamente os quadros 5.5 e 5.7, verificou-se que os dois conjuntos apresentam-se bastante homogéneos em torno do respectivo valor médio levando à conclusão que a dispersão de valores não é muito grande. Contudo registou-se, tanto num conjunto como no outro, que a amplitude de valores era assinalável e aproximadamente igual à verificada nos lotes de Carvalho, motivada uma vez mais pela variabilidade presente dentro de uma dada espécie botânica de madeira.

Os dois conjuntos evidenciam valores de grandezas semelhantes, mas com algumas particularidades diferentes: o valor mínimo ocorrido é mais baixo no caso do lote “D” e os valores que caracterizam os conjuntos são diferentes em certa medida (diferença de quase 80 kg/m³). A única semelhança verificada, numa análise em pormenor sobre os dois conjuntos, corresponde aos valores máximos muito parecidos, situados na ordem dos 675 kg/m³.

Face ao que se acaba de dizer, ficou provado que, apesar dos dois lotes serem constituídos por amostras da mesma espécie botânica e provenientes do mesmo local, a massa volúmica é muito influenciada pela constituição do lenho e pelo sentido em que a madeira se disponha na árvore original.

Outro assunto relacionado com os valores da massa volúmica e que merece ser referido neste ponto é a tipologia das matas existentes em Portugal. A utilização de madeira em estruturas não obedecia, antigamente, a nenhum controlo de qualidade da sua origem e como tal aceitava-se qualquer proveniência como fiável para fornecer madeira sobre a qual se exigiam algumas propriedades resistentes fundamentais para cumprir com satisfação os seus requisitos estruturais. Como tal, a captação de madeira em matas nacionais não passava por nenhum controlo de qualidade, na perspectiva do desempenho estrutural menos bem conhecido na altura em termos numéricos, a escolha da madeira para estruturas no passado resultava de um processo empírico de escolha na mata das “melhores peças”, mais direitas e com menos defeitos, antes de chegar à obra e isto pode justificar também a grande amplitude de valores verificados para a massa volúmica dentro de indivíduos da mesma espécie (sabendo-se que a massa volúmica está directamente relacionada com as propriedades resistentes na madeira).

A classificação visual baseada no “método Amorim Faria” propõe para elementos de madeira, identificadas como pertencentes à espécie botânica “Castanho”, o valor mínimo de 500 kg/m³. Analisando todas as amostras dos dois conjuntos, concluiu-se que algumas delas não satisfazem este requisito mínimo pelo que, caso se tomasse este critério de uma forma rígida, ficariam reprovadas e não estariam a satisfazer a sua função estrutural. Tal como se refere no capítulo cinco, pode-se sugerir a alteração do valor para englobar a possibilidade de se determinar mais casos de madeira de Castanho com massa volúmica inferior a 500 kg/m³. No entanto, como o valor já é bastante baixo para Castanho, parece mais lógico retirar este critério do método por ser pouco conclusivo e de difícil avaliação.

6.3.2. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO PARALELA AO FIO DA MADEIRA

Os produtos do tratamento estatístico realizado sobre os resultados dos ensaios à compressão axial dos provetes do lote “Dc” representam o ponto central de análise neste ponto. O quadro 5.11 e a figura 5.16 contêm a informação necessária para se poder produzir alguns comentários e retirar algumas conclusões.

O comportamento à compressão da madeira de Castanho disponível nos ensaios realizados é, em quase tudo idêntico ao revelado pela madeira de Carvalho anteriormente apresentado, salvo algumas excepções. Além de exibirem, na maioria das amostras, diferenças no comportamento após atingirem a carga máxima, ao nível das deformações registadas, também se consegue identificar uma diferença ao nível da resistência evidenciada pelos dois conjuntos: o lote “Dc” possui, em termos macroscópicos, provetes com resistência mais elevada, comparativamente com o lote “Ac”. Pode-se interligar os valores da massa volúmica obtidos para ambos os conjuntos com a resistência à compressão testemunhada já que existe uma relação linear entre as duas propriedades.

Apresenta-se como um conjunto moderadamente homogéneo à volta do valor médio determinado ($f_{c,0,m} = 41,9$ MPa) pois o coeficiente de variação não ultrapassa os 19% desse valor. A diferença entre os valores extremos é da ordem dos 25 MPa, evidenciando provetes muito diferentes em termos resistentes (ver figura 5.16).

Apesar do que se disse no parágrafo anterior, o valor que caracteriza o conjunto ao nível da resistência à compressão axial valida o proposto pelo método de classificação visual para esta propriedade: $f_{c,0,k} = 28,8$ MPa é superior ao valor estipulado de 20,7 MPa. Este facto ganha mais consistência depois de se comprovar que o valor mínimo exibido continua a ser superior ao definido no método, o que pode significar aptidão da madeira antiga para fins estruturais no que refere a esforços de compressão paralela ao fio. Neste ponto a madeira ardida de Carvalho diverge um pouco desta afirmação pois, certos provetes ficaram aquém da resistência característica estipulada, mas também não se pode dizer abertamente que isto leva à exclusão completa de madeira ardida para aplicações estruturais.

O aproveitamento de madeira ardida para a constituição de elementos estruturais não se pode basear em sinais detectáveis por inspecção visual. Aparentemente os provetes menos resistentes do lote “Ac” (Carvalho) poderiam ter sido cortados a partir de vigas de madeira antiga em melhores condições antes da afectação pelo fogo, o que constitui uma nota importante.

6.3.3. RESISTÊNCIA À FLEXÃO

Os comentários realizados neste ponto a respeito da resistência à flexão incidem sobre os resultados do tratamento estatístico feito sobre o lote “D”. Neste sentido, devem considerar-se os dados contidos no quadro 5.17 e nas ilações que se podem retirar da figura 5.31.

Estatisticamente o conjunto “D” assemelha-se, em alguns parâmetros, ao outro conjunto ensaiado à flexão, evidenciando parecenças no coeficiente de variação relativamente elevado (ligeiramente mais alto do que o registado no lote “G”) e numa média próxima de 45 MPa. Por outro lado difere, em certa medida do lote de madeira ardida na medida em que a amplitude de valores é mais pequena, situando-se num valor próximo dos 46 MPa o que ainda assim constitui um facto a analisar. O valor máximo e, principalmente, o valor mínimo também se apresentam distantes dos revelados pelo conjunto “G”, mostrando valores dentro de uma gama mais expectável (relembra-se que o valor mínimo obtido para o conjunto “G” ficou perto de 4,5 MPa o que representa fraca resistência à flexão, embora diga respeito a uma amostra que seria obviamente rejeitada por ter defeitos enormes e bem evidentes.

A figura 5.31 sugere que os valores elevados (a rondar os 70 MPa) registados em alguns casos, mais precisamente em quatro provetes (cerca de 15% do total), constituem uma excepção à generalidade das amostradas ensaiadas. A maioria dos provetes apresenta uma resistência menor o que implica uma dúvida à volta do valor de 21,0 MPa sugerido pela proposta de classificação visual englobada no “método Amorim Faria”. Haveria que tratar os resultados de um lote reduzido constituído apenas pelas amostras aprovadas para se poder, com rigor, perceber a representatividade do valor 20,7 MPa que se pode, no entanto, desde já considerar adequado por “passar” mesmo com 52% de amostras rejeitadas na avaliação.

A variabilidade exibida pelo lote em termos de resistência à flexão é elevada, seguindo o raciocínio explicitado para o conjunto de madeira ardida testado sobre o mesmo esforço. A classificação visual realizada antes de cada ensaio ajudou a prever a possibilidade de ocorrência de respostas pouco resistentes e a interpretar alguns bons aspectos como indícios de um comportamento positivo. Mesmo assim, apesar de se ter conseguido interpretar bem o aspecto visual das peças, não se foi capaz de materializar a magnitude dos maus comportamentos, isto é, neste lote também ocorreram algumas roturas por corte completamente inesperadas face ao aspecto visual das vigas em questão. As três vigas que romperam violentamente por corte (D4, D7 e D12) apresentavam defeitos com dimensões que conduziram à sua rejeição, depois de aplicar o método de classificação visual proposto, mas mesmo assim, não se previu a ocorrência de roturas frágeis como as que depois se vieram a constatar. Isto fundamenta a opinião de que é inseguro incorporar madeira antiga em sistemas estruturais tendo como única base, um método de classificação visual com critérios que limitam as dimensões, forma e tipo dos defeitos.

Os esforços de flexão, pelo que se disse neste ponto e também por aquilo que foi exposto no ponto 6.2.3, aparecem como as situações de maior risco associadas à utilização de madeira antiga em estruturas de edifícios, o que pode comprovar-se pela fragilidade exibida por vigas de duas espécies diferentes de madeira quando solicitadas por estes esforços, tal como as utilizadas nos ensaios associados a esta dissertação.

6.3.4. MÓDULO DE ELASTICIDADE

A informação que serve de base às considerações apresentadas neste ponto está contida fundamentalmente no quadro 5.23 e na figura 5.35 pertencentes ao capítulo cinco.

O conjunto “D” apresenta-se com um coeficiente de variação de grandeza média ($CV = 18,6\%$), assumindo-se em traços gerais como homogéneo em relação ao seu valor médio ($E_{\text{mean}} = 11,2 \text{ GPa}$). A dispersão verificada para os valores do módulo de elasticidade em flexão é, à semelhança do constatado no lote “G”, menor do que a registada nos valores da resistência à flexão.

A amplitude de valores obtidos, ou seja, a diferença entre o valor máximo e o valor mínimo do conjunto, revela-se muito grande (valor máximo de 15,4 GPa e valor mínimo de 7,4 GPa) existindo uma proporção de aproximadamente 2:1 entre eles (tal como se tinha verificado para o conjunto “G”). A justificação assenta nas mesmas premissas que fundamentaram a amplitude evidenciada pelo conjunto “G”, já que se registou a ocorrência de casos extremos de comportamentos na fase elástica. Este facto contribui para a preocupação revelada na utilização de madeira antiga em estruturas, uma vez que a deformabilidade mostrada por amostras com as mesmas características (dimensões, espécie botânica, mesma origem, etc.) e submetidas às mesmas condições de ensaio abrangeu valores muito distintos. Assim, a resposta de peças de madeira antiga enquadradas num sistema estrutural pode ser diferente não só ao nível da resistência exibida como também na deformação provocada, mesmo sobre condições idênticas de solicitação à flexão. Reforça-se a ideia de que a aplicação de madeira antiga em estruturas necessita de englobar metodologias que sejam capazes de prever com rigor o seu comportamento face às solicitações.

O método de classificação visual “Amorim Faria” deve, como tal, apresentar um valor médio para o módulo de elasticidade que preveja a ocorrência de casos mais frágeis para conseguir fornecer informação credível, estimulada pela inspecção visual, a respeito do comportamento das peças de madeira. A média do conjunto apresenta um valor próximo de 11 GPa (quadro 5.23) sendo superior ao apresentado na proposta de classificação ($E_{\text{mean}} = 8$ GPa) mas, neste caso, apenas se registou um caso (representando, no entanto, quase 4% da população ensaiada) em que o valor ficou abaixo do sugerido pelo método, o que pode representar um sinal positivo pela baixa probabilidade de ocorrência. A limitação do módulo de elasticidade justifica-se já que em sistemas estruturais não convém que as deformações em regime elástico (que ocorrem até cerca de quarenta por cento do valor da carga máxima suportada pela amostra) sejam exageradas e por isso o módulo de elasticidade não deve ser muito baixo.

Neste lote, também se verificou que, depois de retirar a célula de carga, as peças recuperaram parte da deformação exibida no momento da rotura, revelando que tiveram um comportamento elástico quase até esse instante.

A determinação do módulo de elasticidade em compressão axial, utilizando os provetes do lote “Dc”, apresenta valores susceptíveis de serem considerados já que apresentam grandezas próximas do que seria expectável. Mesmo assim, a diferença entre os valores médios das duas determinações é aproximadamente de 2 GPa. Parecem no entanto, pertinentes as justificações com reservas e considerações apresentadas em 6.2.4 relativamente à admissibilidade do ensaio à compressão para avaliar o módulo de elasticidade da madeira.

6.4. VALIDAÇÃO DA CLASSIFICAÇÃO VISUAL

A validação da proposta de classificação visual de peças estruturais de madeira antiga *in situ* constitui um tema comentado abundantemente ao longo deste texto. O processo de classificação de peças de madeira antiga (com ou sem a afectação do fogo), baseado numa inspecção visual que limita a dimensão, tipo e forma dos defeitos presentes, é difícil e acarreta um elevado risco caso seja a única via para se conhecer o comportamento estrutural sem recorrer a meios destrutivos ou a equipamentos de inspecção não destrutiva.

Face aos pressupostos estabelecidos neste capítulo, os tópicos fundamentais que justificam a afirmação referida (dificuldade de aplicar o método e necessidade de o rever e interesse em usar a classificação visual em conjunto com outros métodos de avaliação) apresentam-se em seguida:

- Os valores proposto para as propriedades mecânicas parecem adequados; há que validar esta afirmação, estudando as amostras reduzidas constituídas apenas pelas que foram aprovadas e obviamente realizando novas campanhas de ensaios, semelhantes às produzidas no âmbito desta dissertação;
- Ocorreram algumas situações de amostras aprovadas que apresentaram valores inferiores aos sugeridos no método o que, no entanto, induz alguma preocupação;
- A ocorrência de roturas frágeis, verificada tanto no lote “G” como no lote “D”, imprevisíveis segundo os critérios de limitação de defeitos do método “Amorim Faria”, constitui um facto preocupante e implica que esta ferramenta não pode ser utilizada em exclusivo para se conhecer o comportamento de peças de madeira antiga quando solicitadas por um determinado esforço;
- A aplicação de um método de classificação visual a madeiras antigas por observação *in situ* é uma tarefa árdua e difícil de enquadrar nas classes definidas (*Aprovada* ou *Rejeitada*) tendo apenas presente as dimensões físicas dos defeitos existentes; a visualização do estado interior, quer por meios directos de observação ou recorrendo a ensaios não destrutivos, e a consideração do posicionamento relativo dos defeitos na peça constituem dois parâmetros importantes e que não são considerados por este método;
- Os valores médios sugeridos para o módulo de elasticidade estão pelo lado da segurança face aos valores médios obtidos experimentalmente; contudo verificou-se que 39% do número total de lotes ensaiados à flexão apresentam valores para o módulo de elasticidade abaixo do valor médio considerado, constituindo-se como uma percentagem importante na população em estudo, valor que tem de ser analisado para a amostra constituída apenas pelas peças aprovadas;
- Este método depende bastante da experiência de observação da pessoa/entidade envolvida no processo, já que a consideração de outros factores (como o posicionamento relativo dos defeitos em determinadas zonas da peça) e a sua importância no comportamento geral da peça face a esforços concretos exige experimentação e um vasto conhecimento na área em questão; com isto o processo de classificação de madeiras por inspecção visual exige eventual certificação prévia dos “classificadores” por parte de entidades públicas adequadas, podendo assim proporcionar resultados mais fiáveis.

7

CONCLUSÃO

7.1. PRINCIPAIS RESULTADOS OBTIDOS

Depois de se ter exposto todo o trabalho realizado, com um óbvio maior destaque par as etapas fundamentais desta dissertação, como é o caso da campanha experimental (capítulo quatro), do tratamento dos resultados obtidos (capítulo cinco) e da sua interpretação (capítulo seis), sintetizam-se neste capítulo as principais ideias retiradas de todo o processo de investigação efectuado.

Assim, com base naquilo que foi apresentado no capítulo dois, onde se descreve o carácter único da madeira, podem reter-se as seguintes principais reflexões:

- A madeira apresenta-se como uma material de construção muito particular, exibindo características próprias devido à sua origem natural;
- A obtenção de madeira maciça classificada para utilizar em estruturas ou em construções com elevadas exigências conceptuais constitui uma enorme dificuldade; Os derivados estruturais assumem-se como uma boa resposta face a dificuldades em obter madeira maciça com as características adequadas, inerentes à variabilidade das propriedades e às dimensões geométricas e quantidades disponíveis para sistemas estruturais;
- As propriedades da madeira, tanto físicas como mecânicas, são influenciadas por factores como a espécie botânica, a humidade, a temperatura, a localização da peça na árvore original e a existência de defeitos;
- Os defeitos naturais (nós, fendas, inclinação do fio, empenos, descaio, ataques de insectos e fungos, etc.) afectam de forma muito significativa a qualidade dos elementos e provocam uma diminuição da sua capacidade resistente;
- Os agentes físicos, químicos e biológicos ao actuarem sobre a madeira aumentam a velocidade de degradação e decomposição dos elementos.

O capítulo três, sendo a continuação do capítulo dois, expõe conceitos relacionados com a classificação de madeiras novas e antigas. A parte mais importante deste capítulo surge na parte final, onde se encontra uma apresentação sintética do método de classificação visual de madeira antiga agora designado como “método Amorim Faria”, resultante da adaptação da metodologia desenvolvida na dissertação de Sónia Franco [37] e que serviu de base à avaliação da qualidade e aptidão para funções estruturais dos provetes ensaiados. O referido método de classificação constitui assim a principal base de trabalho seguida nesta dissertação.

A campanha experimental, descrita genericamente no capítulo quatro, é bastante extensa e envolve dois lotes de madeiras:

- Carvalho proveniente de madeira ardida de um palacete localizado em Braga;
- Castanho oriundo de pavimentos de um edifício em reabilitação na Ribeira do Porto.

Os dois lotes que foram incluídos na campanha experimental serviram como conjuntos de amostras para a realização de ensaios mecânicos de flexão e compressão axial com a finalidade de se obterem valores experimentais das suas principais propriedades mecânicas, ou seja da:

- Resistência à compressão axial na direcção do fio;
- Resistência à flexão na direcção do fio;
- Módulo de elasticidade na direcção do fio.

O trabalho desenvolvido na campanha experimental (capítulo quatro) contou ainda com o envolvimento da caracterização da massa volúmica das amostras, provenientes tanto da madeira de Carvalho como da madeira de Castanho.

O principal objectivo traçado para a campanha experimental realizada era a validação do “método Amorim Faria”, tanto pela aplicação dos critérios de limitação de defeitos às peças de madeira dos lotes ensaiados à flexão como pela comparação entre os valores experimentalmente obtidos para as propriedades mecânicas apresentadas e os valores sugeridos na metodologia. Depois de se ter desenvolvido um amplo trabalho, pode-se dizer que esta dissertação constitui uma contribuição muito importante para a validação da metodologia proposta de classificação de madeira antiga por inspecção visual, trabalho de investigação em curso e que necessita ainda de importantes desenvolvimentos como se refere e melhor se explica no ponto seguinte (7.2).

Detalhadamente, os principais resultados alcançados são:

1) Em relação ao método “Amorim Faria”

- Classificação visual não é aplicável a madeira ardida (resultados da classificação não são completamente fiáveis);
- Classificação visual tem maior fiabilidade em madeira antiga que apresente sintomas de poucos ataques bióticos, ocorridos no passado, já que não define um critério rigoroso que limite a presença deste factor apesar de, em muitas ocasiões, este facto se ter revelado condicionante para o comportamento das amostras;
- Por si só, a Classificação visual não pode ser utilizada como único mecanismo de avaliação; necessita do apoio de métodos de avaliação não destrutiva e, em casos com mais importância, da extracção de carotes e mesmo da realização de campanhas experimentais de validação sobre amostras de madeira serrada extraídas da população em análise;
- O método precisa de uma revisão profunda ao nível da correcção dos critérios definidos e da forma como se limitam os defeitos para efeitos de aprovação das amostras nomeadamente, alterando de forma significativa o critério dos nós, o critério de degradação biótica e o critério da massa volúmica;
- No que refere ao critério dos nós, pensa-se que a limitação devia ser mais abrangente, englobando outros factores para além do diâmetro do nó verificado no exterior da peça;
- Em relação ao ataque biológico deve-se repensar a forma de limitação, já que o critério actual é muito alargado e carece de clareza;
- O critério da massa volúmica deve ser retirado da proposta de classificação por não assumir importância na aprovação/rejeição das peças;
- A Classificação visual é de mais difícil aplicação a madeira redonda devido à menor evidência dos defeitos, mesmo realizando a limpeza superficial recomendada (esta

conclusão resulta da comparação com os resultados da dissertação realizada por Sónia Franco ao nível da classificação efectuada);

- O processo de classificação por inspecção visual *in situ* só deve ser efectuado por pessoa muito experiente e conhecedora da temática dado que, se forem aprovadas peças com defeitos graves, as roturas dão-se para valores muito baixos da resistência (exemplo da amostra D4 submetida ao ensaio à flexão);
- Os nós ocultos no interior das peças, não visíveis com facilidade por observação exterior, constituem o maior risco de classificação (provocam roturas inesperadas face ao aspecto visual exterior das peças, tal como aconteceu com a amostra D7);

2) Em relação ao comportamento mecânico da madeira

- Ocorreram roturas frágeis por corte em peças com defeitos de difícil detecção visual, principalmente em peças ardidas de madeira de Carvalho e, em alguns casos, em peças de madeira de Castanho;
- A massa volúmica não constitui um critério relevante para a classificação de peças de madeira antiga nas classes definidas por *Aprovada* e *Rejeitada*; pode ser usado apenas como auxiliar de avaliação qualitativa global;
- O comportamento das peças em serviço e o tipo de esforços sobre elas actuates determinam, em conjunto com os defeitos, os mecanismos de rotura; os defeitos por si só, em peças de que não se conhecem os esforços a que vão estar sujeitas, não permitem aprovar as peças com total fiabilidade; torna-se necessário estudar os defeitos no contexto do tipo de esforço a que as peças estão sujeitas (corte, flexão, compressão), incluindo direcções e esforços combinados;
- Para peças provenientes de elementos previamente sujeitos à acção do fogo, os efeitos mais nocivos, porventura não detectados, ocorrem em peças à flexão (o comportamento é de difícil previsão por observação visual); em peças à compressão o risco é menor, pois verificou-se que o comportamento dos dois lotes testados, tanto o de madeira de Carvalho ardida como o de madeira de Castanho, era basicamente muito semelhante;
- O módulo de elasticidade não pode ser estimado por ensaios de compressão, já que os valores alcançados diferem em larga escala comparativamente com aqueles que foram obtidos a partir dos ensaios de flexão, isto é o módulo de elasticidade em compressão não assume o mesmo valor do ensaio em flexão embora pareça possível afirmar que o valor do módulo de elasticidade em compressão obtido pelo procedimento de ensaio definido na EN 408 [12] é fiável e representativo da fase elástica da deformação em compressão;
- A fórmula de determinação do módulo de elasticidade definida na norma EN 408 [12], e apresentada nesta dissertação através da expressão 5.8, parece ser adequada já que os resultados obtidos são praticamente iguais aos alcançados graficamente sobre os valores experimentais;
- Fez-se a explicação do modo de rotura de alguns ensaios efectuados; o número de amostras não é muito grande mas pode-se concluir que a variabilidade verificada nos ensaios de flexão é maior que nos ensaios de compressão (comportamento das amostras submetidas aos ensaios de flexão é mais diversificado e os modos de rotura bastante variáveis);

- Pode-se também dizer que, no caso dos provetes de flexão, o modo de rotura é, em muitos casos, imprevisível devido à influência dos defeitos na resposta à solicitação, sobretudo dos nós e fendas;
- Para peças mais limpas (que se encontram menos afectadas por defeitos) a rotura em flexão ocorre em geral por rompimento das fibras de celulose na direcção do fio, traccionadas por efeito da solicitação e situada numa das secções da zona central, sujeita a flexão circular;

7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

A reabilitação de edifícios, particularmente a reabilitação de estruturas de madeira, apresenta-se como um caminho próspero e cada vez mais seguro para a evolução da construção. Por este motivo, torna-se fundamental a definição de metodologias que determinem a capacidade resistente de cada elemento estrutural existente, conseguindo-se identificar as peças de madeira antiga que reúnem as condições necessárias para se enquadrarem num sistema estrutural, numa nova fase da vida das estruturas e dos edifícios em que se integram.

O desenvolvimento de metodologias de classificação por inspecção visual, neste caso do “método Amorim Faria”, constitui o trabalho fundamental a realizar. Torna-se importante rever este método, procurando estudar novas formas de limitação dos defeitos, como resultado das sugestões referidas no ponto anterior a respeito do critério dos nós, da massa volúmica e do ataque biológico, entre outras que é necessário prever e validar em sucessivas versões do método que deverá estar em situação de melhoria permanente. É importante, por exemplo, envolver no processo de classificação a influência do posicionamento dos defeitos na peça, quando sujeita a determinados esforços. Pelo estudo realizado, sugere-se a definição rigorosa de critérios que limitem vários aspectos relacionados com os nós e as fendas uma vez que se assumiram como os defeitos mais condicionantes no comportamento da madeira antiga.

Mesmo com o aprofundamento do “método Amorim Faria”, sugere-se a definição de uma nova metodologia, combinando a classificação visual com ensaios não destrutivos de avaliação de propriedades mecânicas da madeira. Dessa forma, conseguem obter-se resultados mais fiáveis e seguros já que é possível ter informação a respeito do estado interior dos elementos de madeira, que se revelou como fundamental e muito determinante do comportamento mecânico das peças. À semelhança do que se disse anteriormente, a classificação visual, mesmo realizada por inspectores experientes, é falível e não constitui um procedimento totalmente seguro para caracterizar a madeira antiga de um sistema estrutural, quando é utilizado como a única forma de validação. Os ensaios não destrutivos e, em casos mais específicos, a extracção de carotes podem constituir mecanismos de avaliação importantes para colmatar as limitações da classificação visual.

Outro desenvolvimento futuro com interesse incide no estudo do comportamento da madeira ardida em relação às propriedades avaliadas nesta dissertação. Tal como se demonstrou, a madeira ardida apresenta um comportamento particular, principalmente quando sujeita a esforços de flexão. Neste sentido, torna-se importante fazer novas campanhas de ensaios sobre madeira ardida de modo a validar as conclusões preliminares retiradas nesta dissertação.

A necessidade de se estudar melhor o comportamento da madeira antiga aponta para a realização de mais campanhas experimentais de validação do método de classificação visual usado nesta dissertação, visando lotes de proveniência bem conhecida de Castanho e Carvalho. Estas espécies são relativamente mal conhecidas, quando estão presentes em peças estruturais de madeira antiga, pois a

sua proveniência não era alvo no passado mais longínquo de um controlo de qualidade totalmente rigoroso na perspectiva estrutural, embora se procurassem peças o mais possível isentas de defeitos.

O tratamento dos resultados experimentais dos ensaios de flexão englobou as amostras que, pela classificação visual foram aprovadas ou rejeitadas conforme os defeitos visíveis nas suas faces. Neste sentido, importa concluir o tratamento estatístico dos dados obtidos nos ensaios realizados, considerando apenas as amostras aprovadas, para se perceber a influência na dispersão de resultados que têm as peças rejeitadas. Perceber-se-á assim melhor, o risco associado à aprovação de amostras que não revelem sinais visuais de provável mau comportamento mecânico, mas que depois venham a exhibir fragilidades importantes, quando sujeitas a esforços mecânicos correntes em situações de serviço.

A classificação visual realizada sobre as setenta e nove amostras dos lotes “D” e “G” foi alvo de uma interpretação com vista à comparação entre as previsões realizadas e o comportamento real, evidenciado nos ensaios mecânicos. Sugere-se uma interpretação mais profunda da classificação visual, estudando todos os registos realizados durante a campanha experimental que não foi concluída nesta dissertação por manifesta falta de tempo disponível.

O que se acaba de dizer para a classificação visual pode ser também referido para a avaliação dos ensaios e a respectiva ligação com os defeitos. O facto de se ter a possibilidade de recorrer a vídeos de todos os ensaios efectuados permite dispor de informação fundamental nesse sentido e que irá permitir retirar novas conclusões mais concretas dispondo de mais tempo para a sua análise. Há que analisar, de forma comparada, o registo da avaliação das peças ao nível dos defeitos, disponível tanto para as peças ensaiadas à flexão como para as peças ensaiadas à compressão, e o comportamento que as mesmas peças evidenciaram nos ensaios mecânicos e que os vídeos dos ensaios e as amostras físicas após rotura, ainda existentes, bem evidenciam.

BIBLIOGRAFIA

Normas consultadas ou referidas:

- [1] EN 338, Structural Timber. CEN, 2003.
- [2] EN 975-1, Sawn timber. Appearance grading of hardwoods. Part 1: Oak and beech, 1995.
- [3] EN 975-2, Sawn timber. Appearance grading of hardwoods. Part 2: Poplars, Instituto Português da Qualidade, 2004.
- [4] EN 1310, Round and sawn timber — Method of measurement of features, 1995.
- [5] EN 1611-1, Sawn timber. Appearance grading of softwoods. Part 1: European spruces, firs, pines and Douglas firs. Instituto Português da Qualidade, 1999.
- [6] EN1912, Structural Timber – Strength Classes – Assignment of visual grades and species, Instituto Português da Qualidade, 2004.
- [7] EN 14081.1, Timber Structures – Strength graded structural timber with rectangular cross section – Part 1 – General requirements, 2005.
- [8] EN 14081.2, Timber Structures – Strength graded structural timber with rectangular cross section – Part 2 – Machine grading: additional requirements for initial type testing, 2005.
- [9] EN 14081.3, Timber Structures – Strength graded structural timber with rectangular cross section – Part 3 – Machine grading: additional requirements for factory production control, 2005.
- [10] EN 14081.4, Timber Structures – Strength graded structural timber with rectangular cross section – Part 4 – Machine grading: grading machine settings for machine controlled systems, 2005.
- [11] EN 350, Durability of wood and wood-based products. Natural durability of solid wood, 1993.
- [12] EN 408, Timber structures – Structural timber and glued laminated timber – Determination of some physical and mechanical properties, 2003.
- [13] NP 616, Madeiras. Determinação da Massa Volúmica. IGPAI – Repartição de Normalização, Lisboa, 1973.
- [14] NP 617, Madeiras. Determinação da dureza. IGPAI – Repartição de Normalização, Lisboa, 1973.
- [15] NP 618, Madeiras. Ensaio de compressão axial. IGPAI – Repartição de Normalização, Lisboa, 1973.
- [16] NP 620, Madeiras. Ensaio de flexão dinâmica, IGPAI – Repartição de Normalização, Lisboa, 1973.
- [17] NP 622, Madeiras. Ensaio de fendimento. IGPAI – Repartição de Normalização, Lisboa, 1973.
- [18] NP 4305, *Madeira Serrada de Pinheiro Bravo para Estruturas. Classificação Visual*, Instituto Português da Qualidade, 1995.
- [19] DIN 4074.1, *Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit: Teil1:Nadelschnittholz*. DIN, Germany, 2001.
- [20] INSTA 142, *Nordic Visual strength grading rules for timber*. Sweden, 1997.

- [21] UNE 56544, *Clasificación Visual de la Madera Aserrada para Uso Estructural: Madera de Coníferas*. AENOR, Madrid, 2003.
- [22] U84000430, *Beni culturalli. Manufatti lignei. Strutture portandi degli edifici. Criteri per la valutazione preventiva, la progettazione e l'esecuzione di interventi*, 2003
- [23] NF B52-001, *Règles d'utilisation du bois dans les constructions. Classement visuel pour l'emploi en structure des principales essences résineuses et feuillues*, 1998

Outros documentos consultados ou referidos:

- [24] Appeton, J. *Reabilitação de edifícios antigos. Patologias e tecnologias de intervenção*, Edições Orion, 2003.
- [25] Arriaga, F., Peraza, F., Esteban, M., Bobadilla, I., Garcia, F., *Intervención en estructuras de madera*. AITIM, Madrid, 2002, ISBN 84-87381-24-3.
- [26] Arriaga, F., Peraza, F., Esteban, M. *Madeira aserrada estrutural*. AITIM, Madrid, 2003, ISBN 84-87381-25-1.
- [27] Bodig, J., *Mechanics of wood and wood composites*, Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1982.
- [28] Botelho, J., *Avaliação não Destrutiva da Capacidade Resistente de Estruturas de Madeira de Edifícios Antigos*. Dissertação de Mestrado em Reabilitação do Património Edificado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2006.
- [29] Brites, R., *Castanho para fins estruturais. Casos de estudo e investigação*, Universidade do Minho, 2007.
- [30] Carvalho, A., *Madeiras Portuguesas – Vol. I*. Instituto Florestal, Lisboa, 1996, ISBN 972-8097-23-9, 415 p.
- [31] Carvalho, A., *Madeiras Portuguesas – Vol. II*. Direcção Geral das Florestas, Lisboa, 1997, ISBN 972-8097-26-3, 415 p.
- [32] Coutinho, J. *Sebenta de materiais de construção I – Madeiras*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 1999.
- [33] Cruz, H., Machado, J., Nunes, L., *Degradação e reabilitação de estruturas de madeira. Selecção de técnicas não destrutivas a aplicar in situ*. Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Estruturas, LNEC, Lisboa, 2000.
- [34] Cruz, H., Machado, J., Nunes, L., *Problemas de conservação da madeira em edifícios*. 2º Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios, ENCORE, LNEC, Lisboa, 1994, p. 301 – 312.
- [35] Dias, T., *Pavimentos de madeira em edifícios antigos. Diagnóstico e intervenção estrutural*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Reabilitação do Património Edificado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008.
- [36] Fernandez-Golfin, J.L., Díez, M., Prieto, E., Mier, R., *Manual de Clasificación de Madera*, AITIM, 2003.

- [37] Franco, S., *Proposta de atribuição de propriedades mecânicas a elementos estruturais de madeira por inspeção visual in situ*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Especialização em Construções, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008.
- [38] Machado, J., Cruz, H., *Avaliação do estado de conservação de estruturas de madeira. Determinação do perfil densidade por métodos não destrutivos*, Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas no.42, p.15 -18, LNEC, 1997.
- [39] Machado, J. S. *Madeiras de Folhosas e Resinosas – Nomenclatura Comercial*. ITES 11. LNEC, Lisboa, 1999.
- [40] Machado, J. *Produtos de madeira maciça para a construção: desafios da qualidade*. Silva Lus., dez. 2004, vol.12, no.2, p. 203-213, ISSN 0870-6352.
- [41] Moreschi, J. *Propriedades tecnológicas das madeiras – Manual didático*, Departamento de Engenharia Florestal da UFPR, 2005, Paraná, Brasil.
- [42] Negrão, H. *Dimensionamento de elementos de madeira segundo o Eurocódigo 5* (PowerPoint). Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2004.
- [43] Peraza, F., Arriaga, F., Guindeo, A., e tal. *Especies de maderas para carpintería, construcción y mobiliário*, AITIM, 2004, ISBN 84-87381.
- [44] Rodrigues, R., *Construções antigas de madeira: experiência de obra e reforço estrutural*. Dissertação para obtenção do grau Mestre em Engenharia Civil, Universidade do Minho, 2004.
- [45] Sandomeer, M., Köhler, J.; *Approach for an efficient Control of Grading Machine Settings*. COSTE 53 Conference – Quality Control for Wood and Wood Products, 2007, Warsaw, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, Switzerland.
- [46] Sandoz, J. L., *Grading of construction timber by ultrasound*. Wood Science and Technology, 27/02/2006, p. 95 – 108, Springer Berlin, Heidelberg, Germany.
- [47] Sardinha, A. M., *Ciência e tecnologia dos materiais – Capítulo III*. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, 1988.

ANEXOS

Todos os gráficos, tabelas e outros registos relativos a cada amostra encontram-se anexados em suporte digital.

