

COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MADEIRA DE CARVALHO PORTUGUÊS

JOEL ALEXANDRE TEIXEIRA DA SILVA

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

Orientador: Professor Doutor José Manuel Marques Amorim de Araújo Faria

JULHO DE 2011

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2010/2011

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 - 2010/2011 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2011.*

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.

Aos meus Pais

Quando atingimos o objectivo, convencemo-nos que seguimos o bom caminho.

Paul Valéry

AGRADECIMENTOS

Gostaria de prestar os agradecimentos devidos a quem, mais de perto, me acompanhou na realização da presente dissertação de Mestrado e que, de forma directa ou indirecta, contribuiu para a sua concretização.

Começo por expressar os meus sinceros agradecimentos ao meu orientador, o Professor Amorim Faria, por toda a sua disponibilidade e pelo apoio incansável que me prestou ao longo de todas as fases da elaboração do presente trabalho. O seu contributo foi fundamental pelos conhecimentos transmitidos sobre um material tão nobre como é a madeira e, sobretudo, pelos conselhos e sugestões com que me confrontou em determinados momentos de incerteza. Obrigado pela forma séria e profissional com que sempre me tratou.

Quero deixar uma palavra de gratidão à Soprem Norte – Comércio e indústria de madeiras, Lda., por me ter recebido prontamente de forma atenciosa e ter colocado à minha disposição as instalações da empresa, nomeadamente o secador usado no processo de secagem dos provetes ensaiados no âmbito da presente tese.

Agradeço ao Professor António Arêde pela cedência do espaço e do equipamento necessário à elaboração dos trabalhos experimentais no Laboratório de Engenharia Sísmica e Estrutural (LESE), assim como pela forma célere com que criou as condições para a realização dos mesmos. Saliento ainda a ajuda dispensada pelo Sr. Valdemar e pelo André nas operações de montagem e monitorização dos ensaios mecânicos à flexão.

Deixo o meu agradecimento à Márcia por me ter acompanhado e ajudado a ultrapassar os momentos mais difíceis ao longo desta grande caminhada. A forma carinhosa com que me tratou, o incentivo que me deu, a coragem que me transmitiu e, sobretudo, a força que me fez chegar foram fundamentais.

Quero agradecer à minha irmã por todas as suas palavras de estímulo e por ter estado sempre presente nas alturas que mais precisei. Agradeço todo o seu apoio incondicional, que em algumas ocasiões foi determinante, e todos os momentos de amizade e boa disposição que me proporcionou.

Não posso findar sem agradecer, de forma especial e sentida, aos meus pais pela educação e valores que me inculcaram e por terem lutado para me criar as condições sem as quais jamais teria chegado até aqui. Obrigado por toda a dedicação que me prestaram, pela confiança que depositaram em mim e, acima de tudo, por nunca me terem faltado.

RESUMO

A madeira é produzida pela árvore e, ao longo do seu processo de formação, está sujeita a um conjunto de factores de origem natural que determinam a sua constituição, justificando assim o seu carácter heterogéneo. É sabido que a presença de “defeitos” reduz significativamente a capacidade resistente das peças estruturais de madeira e, por isso, é necessário efectuar um controlo de qualidade que conduza à exclusão dos elementos que possam comprometer a segurança. A classificação de madeira é o processo usado actualmente e consiste na atribuição de uma classe de qualidade, em função da presença e dimensão dos defeitos, à qual corresponde uma determinada classe de resistência. No entanto, esse procedimento apenas é aplicável a madeira nova e, em Portugal, só existe apoio normativo para a espécie de Pinho bravo português (*Pinus pinaster* Ait.).

Com o intuito de dar resposta a essa problemática, Sónia Franco (2008) propôs uma ferramenta, correntemente designada por método *Amorim Faria*, que permitia atribuir propriedades mecânicas através da inspecção visual dos elementos estruturais antigos. Porém, as campanhas experimentais realizadas por Samuel Pereira (2009) e Albino Ramos (2010) não validaram a sua aplicação para classificar madeira antiga. Deste modo, além de incrementar o conhecimento sobre madeira, a presente dissertação surge com o objectivo principal de avaliar a aplicabilidade do método referido a madeira nova de Carvalho, verificando, paralelamente, se a norma francesa NF B52-001:2007 pode ser usada na classificação visual das espécies do género existentes em Portugal: Carvalho português (*Quercus faginea*), Carvalho negral (*Quercus pyrenaica*) e Carvalho roble (*Quercus robur*).

Foram abatidas 5 árvores de Carvalho português de um povoamento misto localizado 5 Km a Norte de Braga, produzindo-se 51 provetes que, na sua maioria, apresentavam após secagem uma secção de 4,8 x 8,5 cm² e um comprimento de 1,9 m. Todas as peças foram devidamente caracterizadas antes do processo de classificação visual, executado simultaneamente segundo os critérios definidos no método *Amorim Faria* e no documento francês NF B52-001:2007. De seguida procedeu-se à realização de ensaios mecânicos à flexão, de acordo com as especificações definidas na norma EN 408:2003, no sentido de determinar a resistência à flexão e o módulo de elasticidade, ambas as propriedades na direcção do fio.

O acompanhamento dos trabalhos experimentais permitiu constatar a imprevisibilidade da madeira, nomeadamente em relação ao mecanismo de rotura e ao comportamento à solicitação. Os resultados obtidos para as propriedades mecânicas determinadas foram comparados com os valores propostos por ambas as vias de classificação usadas, tendo-se concluído que o método *Amorim Faria* é seguro quando aplicado a madeira nova de Carvalho e que a norma NF B52-001:2007, embora com algumas limitações, é aplicável a madeira de Carvalho português, conclusão porventura extensível às duas restantes espécies do género predominantes no nosso país. As excelentes propriedades mecânicas que a madeira de Carvalho evidenciou justificam a sua utilização em estruturas, nomeadamente no mercado emergente de reabilitação, e, apesar de ser uma espécie de crescimento lento, urge incentivar e valorizar a regeneração dos seus povoamentos.

PALAVRAS-CHAVE: estruturas de madeira, classificação visual de madeira, ensaios mecânicos, propriedades mecânicas de madeira de Carvalho português.

ABSTRACT

Wood is produced by the tree and, over its formation process, is subject to a number of natural factors that determine its constitution, thus justifying its heterogeneous nature. It is known that the presence of “defects” significantly reduces the bearing capacity of structural lumber and so it is necessary to perform a quality control that leads to the exclusion of elements that may compromise security. The classification of wood is currently used and the process consists in assigning a quality grade, depending on the presence and size of defects, which corresponds to a particular class of resistance. However, this procedure applies only to new wood and, in Portugal, there is only normative support for the specie of Portuguese wild pinewood (*Pinus pinaster* Ait.).

In order to address this problem, Sonia Franco (2008) proposed a tool, currently called *Amorim Faria’s* method that allowed attributing mechanical properties through visual inspection of old structural elements. However, the experimental campaigns carried out by Samuel Pereira (2009) and Albino Ramos (2010) have not validated the application to classify old wood. Thus, besides increasing the knowledge about wood, this paper comes up with the main objective to assess the applicability of the mentioned method at new Oak wood, checking, at the same time, if the French standard NF B52-001:2007 can be used in visual classification of species of the genus in Portugal: Portuguese oak (*Quercus faginea*), Pyrenean oak (*Quercus pyrenaica*) and Roble oak (*Quercus robur*).

Five trees of Portuguese oak were felled in a mixed settlement located 5 Km at North of Braga, producing 51 samples which mostly had a drying section of 4,8 x 8,5 cm² and a length of 1,9 m. All parts have been characterized before the visual classification process and the work was done following simultaneously and the work was done following simultaneously, the criteria defined in the *Amorim Faria’s* method and the French document NF B52-001:2007. Then proceeded to testing mechanical bending, according to the specifications defined in the standard EN 408:2003, in order to determine the flexural strength and elasticity module, both properties in the direction of the thread.

The monitoring of experimental work revealed the unpredictability of wood, particularly in relation to the mechanism of failure and the behaviour of the request. The results obtained for the determined mechanical properties were compared with the value proposed by both procedures used for classification. It was concluded that *Amorim Faria’s* method is safe, when applied to new Oak wood and the standard NF B52-001:2007, although with some limitations, is applicable to the Portuguese oak wood, conclusion perhaps extended to two other species of the genus prevailing in our country. The excellent mechanical properties that Oak wood showed justify its use in structures, particularly in the emerging market of rehabilitation and, despite being a slow-growing specie, it is urgent to encourage and promote the regeneration of their settlements.

KEYWORDS: wood structures, visual classification of wood, mechanical tests, mechanical properties of Portuguese oak wood.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
 1. INTRODUÇÃO	 1
1.1. ÂMBITO E OBJECTIVO DA DISSERTAÇÃO	1
1.2. BASES DO TRABALHO DESENVOLVIDO	2
1.3. ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	3
 2. CARVALHO PORTUGUÊS – ÁRVORE E MADEIRA	 5
2.1. INTRODUÇÃO	5
2.2. DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DA ESPÉCIE	6
2.2.1. O CARVALHO NO MUNDO	6
2.2.2. O CARVALHO EM PORTUGAL	6
2.3. HISTÓRIA NATURAL DO CARVALHO PORTUGUÊS	8
2.4. DESCRIÇÃO GERAL DA ESPÉCIE	9
2.4.1. COMPONENTES	9
2.4.2. ASPECTO	10
2.4.3. HABITAT	12
2.5. CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA	12
2.5.1. CLASSIFICAÇÃO BOTÂNICA	13
2.5.2. ESTRUTURA ANATÓMICA DA MADEIRA	14
2.5.2.1. Estrutura macroscópica	14
2.5.2.2. Estrutura microscópica	15
2.5.2.3. Composição química	17
2.5.2.4. Síntese	18
2.6. POTENCIALIDADES DA MADEIRA DE CARVALHO PORTUGUÊS	19
2.7. INTERESSE DA PRODUÇÃO DE CARVALHO PORTUGUÊS PARA ESTRUTURAS	20

3. AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE RESISTENTE DE MADEIRA DE CARVALHO PORTUGUÊS	21
3.1. INTRODUÇÃO	21
3.2. DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MADEIRA NOVA	22
3.2.1. CLASSES DE QUALIDADE	22
3.2.1.1. Classificação visual	23
3.2.1.2. Classificação por máquina	24
3.2.2. CLASSES DE RESISTÊNCIA	26
3.2.3. RELAÇÃO CLASSES DE QUALIDADE – CLASSES DE RESISTÊNCIA	29
3.3. DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MADEIRA ANTIGA	30
3.3.1. MÉTODO DE AVALIAÇÃO POR INSPECÇÃO VISUAL	31
3.3.2. UTILIZAÇÃO DE TÉCNICAS/EQUIPAMENTOS NÃO DESTRUTIVOS	34
3.3.2.1. Sylvatest	35
3.3.2.2. Resistógrafo	39
3.3.2.3. Pilodyn	43
3.3.2.4. Outras técnicas/equipamentos não destrutivos	44
3.3.3. MÉTODO SIMPLIFICADO BASEADO NA NORMA EUROPEIA EN 338:2009	46
3.3.4. MÉTODOS MISTOS	48
3.3.5. CONCLUSÃO	49
4. SÍNTESE DE RESULTADOS – RESISTÊNCIA MECÂNICA DE MADEIRA DE CARVALHO ANTIGA	51
4.1. INTRODUÇÃO	51
4.2. VALORES NORMATIVOS DE REFERÊNCIA	52
4.2.1. MADEIRA NOVA	52
4.2.2. MADEIRA ANTIGA	53
4.3. CAMPANHAS EXPERIMENTAIS REALIZADAS NA FEUP	54
4.3.1. CAMPANHA DE 2008 (FRANCO, 2008)	55
4.3.1.1. Metodologia e descrição	55
4.3.1.2. Resultados	57
4.3.2. CAMPANHA DE 2009 (PEREIRA, 2009)	60
4.3.2.1. Metodologia e descrição	60
4.3.2.2. Resultados	64

4.3.3. CAMPANHA DE 2010 (RAMOS, 2010)	70
4.3.3.1. Metodologia e descrição	70
4.3.3.2. Resultados	72
4.4. OUTROS TRABALHOS RECENTES EM PORTUGAL	75

5. AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE MADEIRA DE CARVALHO NOVA – CAMPANHA EXPERIMENTAL.....77

5.1. INTRODUÇÃO	77
5.2. PREPARAÇÃO DOS PROVETES.....	78
5.2.1. ORIGEM, ABATE E SERRAGEM	78
5.2.2. SECAGEM.....	79
5.2.3. APLAINAMENTO E MOLDURAGEM	82
5.3. CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS	82
5.3.1. IDENTIFICAÇÃO E DESCRIÇÃO GERAL.....	83
5.3.2. DETERMINAÇÃO DA MASSA VOLÚMICA	84
5.3.2.1. Pesagem e medições.....	85
5.3.2.2. Resultados obtidos.....	86
5.4. CLASSIFICAÇÃO VISUAL	89
5.4.1. DEFINIÇÃO DOS CRITÉRIOS DE CLASSIFICAÇÃO VISUAL APLICÁVEIS	89
5.4.1.1. Norma francesa – NF B52-001:2007	90
5.4.1.2. Método de avaliação por inspeção visual	91
5.4.2. PROCEDIMENTO DE AVALIAÇÃO E REGISTO DE DEFEITOS.....	91
5.4.3. ATRIBUIÇÃO DE CLASSES DE QUALIDADE E CORRESPONDENTES PROPRIEDADES MECÂNICAS	94
5.5. ENSAIOS MECÂNICOS	96
5.5.1. SETUP DE ENSAIO	96
5.5.2. PROCEDIMENTO DE ENSAIO	99
5.6. INTERPRETAÇÃO DOS ENSAIOS	100
5.7. ANÁLISE ESTATÍSTICA	109
5.7.1. RESISTÊNCIA À FLEXÃO	110
5.7.1.1. Lote completo.....	110
5.7.1.2. Lote aprovadas – Método Amorim Faria.....	116
5.7.1.3. Lote aprovadas – Norma NF B52-001:2007	118
5.7.2. MÓDULO DE ELASTICIDADE.....	121

5.7.2.1. Lote completo	121
5.7.2.2. Lote aprovadas – Método <i>Amorim Faria</i>	125
5.7.2.3. Lote aprovadas – Norma NF B52-001:2007	127
5.7.3. SÍNTESE DE RESULTADOS	129

6. CONCLUSÃO

131

6.1. RESULTADOS OBTIDOS - CONCLUSÕES.....

131

6.1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

131

6.1.2. APLICABILIDADE DO MÉTODO *AMORIM FARIA* NA CLASSIFICAÇÃO VISUAL DE MADEIRA NOVA DE CARVALHO.....

132

6.1.3. APLICABILIDADE DA NORMA FRANCESA NF B52-001:2007 ÀS ESPÉCIES DE CARVALHO EXISTENTES EM PORTUGAL.....

133

6.1.4. CLASSE DE RESISTÊNCIA ADEQUADA À MADEIRA DE CARVALHO

134

6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

135

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

137

ANEXOS.....

143

ANEXO I – DIMENSÕES DAS AMOSTRAS

145

ANEXO II – FICHAS DE CLASSIFICAÇÃO VISUAL - EXEMPLOS

149

ANEXO III – GRÁFICOS FORÇA - DEFORMAÇÃO

155

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

Fig. 2.1 – Dados climáticos: precipitação e temperatura - Valores médios anuais (fonte: http://snirh.pt).	7
Fig. 2.2 – Eras Geológicas (adaptado de Silva, 2007b).	9
Fig. 2.3 – Estrutura do Carvalho português (adaptado de Martins, 2009).	10
Fig. 2.4 – Arquitectura do Carvalho português. Esquerda: árvore isolada (fonte: http://arvoresdeportugal.free.fr); Direita: árvore em ambiente florestal.	11
Fig. 2.5 – Especificidades do Carvalho português. Esquerda: copa ressequida no Inverno (fonte: http://flickr.com); Direita: folha e fruto no Verão (fonte: http://florestar.net).	11
Fig. 2.6 – Direcções fundamentais da madeira (adaptado de Quoirin, 2004).	12
Fig. 2.7 – Grupos botânicos. Esquerda: folhosa – Carvalho português; Direita: resinosa – Pinheiro. (Adaptado de Martins, 2009).	13
Fig. 2.8 – Corte transversal de um tronco de árvore (fonte: http://timberridgewoodworks.com).	14
Fig. 2.9 – Estrutura microscópica do Carvalho português (adaptado de Rosa, 2007).	15
Fig. 2.10 – Estrutura da parede celular (adaptado de Martins, 2009).	16
Fig. 2.11 – Estrutura microscópica do Carvalho português. Esquerda: corte transversal – porosidade em anel; Centro: corte tangencial – parênquima transversal; Direita: corte radial – fibras longitudinais (Sousa <i>et al.</i> , 2009b).	17
Fig. 2.12 – Decomposição da estrutura anatómica da madeira de Carvalho português.	18
Fig. 2.13 – Aplicações da madeira de Carvalho português. Esquerda: travessas de caminhos-de-ferro (fonte: http://oje.pt); Direita: soalho (fonte: http://flooring-manufacturers.com).	19

CAPÍTULO 3

Fig. 3.1 – Pormenor da máquina de classificação mecânica: <i>Computermatic</i> (adaptado de Machado, 2003).	25
Fig. 3.2 – Pormenor da máquina de classificação mecânica: <i>Cook-Bolinder</i> (Machado, 2003).	26
Fig. 3.3 – Método de transmissão em ultra-sons.	36
Fig. 3.4 – Componentes do equipamento <i>Sylvatest</i> (adaptado de Candian, 2007).	36
Fig. 3.5 – Tipos de medição. Esquerda: medição directa; Direita: medição indirecta. (Fonte: http://sylvatest.com).	37
Fig. 3.6 – <i>Resistógrafo</i> . Esquerda: equipamento (adaptado de Dias, 2008); Direita: funcionamento e sistema de aquisição de dados (fonte: http://bam.de).	40
Fig. 3.7 – Agulha de perfuração do <i>Resistógrafo</i> (fonte: http://imldistribution.com).	40
Fig. 3.8 – Exemplo de perfil resistográfico de uma viga de madeira (adaptado de Botelho, 2006).	41
Fig. 3.9 – Representação gráfica do $VR_{médio}$ (adaptado de Botelho, 2006).	41

Fig. 3.10 – <i>Pilodyn</i> . Esquerda: equipamento (fonte: http://gisup.com); Direita: funcionamento (Dias, 2008).....	44
Fig. 3.11 – <i>Georradar</i> . Esquerda: equipamento (fonte: http://cflhd.gov); Direita: radargrama (Botelho, 2009).....	44
Fig.3.12 – <i>Metriguard</i> . Esquerda: equipamento; Direita: funcionamento. (Fonte: http://metriguard.com)	45
Fig. 3.13 – Raios-X. Esquerda: equipamentos para aplicação da técnica (Botelho, 2006); Direita: funcionamento e resultado (fonte: http://coste53.net).	45
Fig.3.14 – Dendrocronologia (fonte: http://dendrotec.it).....	46
Fig. 3.15 – Processo de atribuição de classes de resistência à madeira em serviço (Negrão e Faria, 2009).....	47

CAPÍTULO 4

Fig. 4.1 – Forma irregular das vigas de madeira <i>in situ</i> (Franco, 2008).	55
Fig. 4.2 – Aspecto final dos provetes antes dos ensaios mecânicos. Esquerda: provetes ensaiados à flexão; Direita: provetes ensaiados à compressão e respectiva identificação. (Franco, 2008).	56
Fig. 4.3 – Avaliação do teor de água. Esquerda: <i>Humidímetro</i> ; Direita: medição expedita. (Franco, 2008).....	56
Fig. 4.4 – Ensaios mecânicos. Esquerda: ensaio à compressão; Direita: ensaio à flexão. (Franco, 2008).....	57
Fig. 4.5 – Propriedades mecânicas. Esquerda: resistência à flexão; Direita: resistência à compressão. (Adaptado de Franco, 2008).....	58
Fig. 4.6 – Gráfico força-deslocamento dos provetes ensaiados à flexão (adaptado de Franco, 2008).....	59
Fig. 4.7 – Aparência das vigas de madeira <i>in situ</i> após incêndio (Pereira, 2009).	61
Fig. 4.8 – Preparação dos provetes de Carvalho. Esquerda: serração da viga; Centro: aspecto final dos provetes ensaiados à flexão; Direita: aspecto final dos provetes ensaiados à compressão. (Pereira, 2009).....	61
Fig. 4.9 – Marcação de provetes. Esquerda: designação atribuída; Direita: numeração de superfícies dos provetes que constituíam os lotes G e D (Pereira, 2009).....	62
Fig. 4.10 – Avaliação da massa volúmica do provete Ac1. Esquerda: pesagem; Direita: medições. (Pereira, 2009).....	63
Fig. 4.11 – Ensaio à flexão. Esquerda: setup do ensaio; Direita: rotura por tracção paralela na zona traccionada (Pereira, 2009).	64
Fig. 4.12 – Ensaio à compressão. Esquerda: setup de ensaio; Direita: provete antes e depois do ensaio. (Pereira, 2009).	64
Fig. 4.13 – Método <i>Amorim Faria</i> : resistência à flexão – Lote G (adaptado de Pereira, 2009).....	66
Fig. 4.14 – Método <i>Amorim Faria</i> : gráficos força - deslocamento – Lote G (adaptado de Pereira, 2009).....	67

Fig. 4.15 – Resistência à compressão – Lote Ac (adaptado de Pereira, 2009).	69
Fig. 4.16 – Gráfico força - deslocamento – Lote Ac (adaptado de Pereira, 2009).	70
Fig. 4.17 – Aspecto final dos provetes ensaiados à flexão (Ramos, 2010).	71
Fig. 4.18 – Marcação de amostras. Esquerda: designação atribuída; Direita: numeração de superfícies. (Ramos, 2010)	71
Fig. 4.19 – Pesagem das amostras (Ramos, 2010).....	72
Fig. 4.20 – Ensaio à flexão. Esquerda: setup do ensaio; Direita: rotura por tracção paralela na zona traccionada. (Ramos, 2010).	72
Fig. 4.21 – Método <i>Amorim Faria</i> : resistência à flexão (adaptado de Ramos, 2010).....	74
Fig. 4.22 – Método <i>Amorim Faria</i> : gráficos força - deslocamento (adaptado de Ramos, 2010).	75

CAPÍTULO 5

Fig. 5.1 – Exemplo de alguns dos Carvalhos abatidos.	78
Fig. 5.2 – Rodelas (secção transversal) de alguns dos Carvalhos abatidos.	79
Fig. 5.3 – Aspecto geral de uma estufa para secagem de madeira (http://termometalicas.pai.com)....	80
Fig. 5.4 – Sistema de climatização. Esquerda: depósito de resíduos (combustível); Centro: caldeira de biomassa; Direita: circuito de aquecimento da câmara de secagem.....	80
Fig. 5.5 – Posicionamento das amostras na câmara de secagem.	81
Fig. 5.6 – Monitorização do teor de água. Esquerda: leitura no quadro de controlo ao fim de 8 dias de secagem; Centro: aplicação das sondas eléctricas no provete testemunha; Direita: sonda eléctrica.	81
Fig. 5.7 – Defeitos de secagem. Esquerda: fendas longitudinais; Centro: fenda radial; Direita: distorção e empeno.	82
Fig. 5.8 – Local de acondicionamento dos provetes no LESE.	83
Fig. 5.9 – Identificação de vigas e numeração de superfícies.	83
Fig. 5.10 – Diferentes perspectivas da pesagem do provete <i>N1</i>	85
Fig. 5.11 – Medição das dimensões do provete <i>N6</i> . Esquerda: medição da altura (<i>h</i>); Centro: medição da largura (<i>b</i>); Direita: medição do comprimento (<i>L</i>).	86
Fig. 5.12 – Marcação de uma das secções medidas na viga <i>N6</i>	86
Fig. 5.13 – Massa volúmica.....	89
Fig. 5.14 – Exemplo de alguns defeitos medidos. Esquerda: nó – provete <i>N44</i> ; Centro: descaio – provete <i>N22</i> ; Direita: inclinação do fio – provete <i>N45</i>	93
Fig. 5.15 – Registo fotográfico efectuado para o provete <i>N10</i>	93
Fig. 5.16 – Esquema de ensaio da norma EN 408:2003.	97
Fig. 5.17 – Esquemas de ensaio adoptados na campanha experimental.	97
Fig. 5.18 – Esquema de ensaio real. Esquerda: alçado; Centro: perspectiva; Direita: vista lateral.	98

Fig. 5.19 – Sistema de solicitação.	98
Fig. 5.20 – Medição de deslocamentos. Esquerda: LVDT; Centro: tripé de apoio; Direita: peça de fixação à viga.	99
Fig. 5.21 – Materialização dos apoios. Esquerda: vista geral; Centro: pormenor do apoio esquerdo; Direita: pormenor do apoio direito.	99
Fig. 5.22 – Monitorização do ensaio. Esquerda: aquisição de dados; Direita: gráfico força – deslocamento.	100
Fig. 5.23 – Tracção perpendicular devido ao desvio do fio provocado pela presença de um nó (Santos, 2007).	109
Fig. 5.24 – Lote completo – Método <i>Amorim Faria</i> : resistência à flexão.	113
Fig. 5.25 – Lote completo – Método <i>Amorim Faria</i> : gráficos força – deslocamento.	114
Fig. 5.26 – Lote completo – Norma NF B52-001:2007: resistência à flexão.	115
Fig. 5.27 – Lote completo – Norma NF B52-001:2007: gráficos força – deslocamento.	115
Fig. 5.28 – Lote aprovadas – Método <i>Amorim Faria</i> : resistência à flexão.	117
Fig. 5.29 – Lote aprovadas – Método <i>Amorim Faria</i> : gráficos força – deslocamento.	118
Fig. 5.30 – Lote aprovadas – Norma NF B52-001:2007: resistência à flexão.	120
Fig. 5.31 – Lote aprovadas – Norma NF B52-001:2007: gráficos força – deslocamento.	120
Fig. 5.32 – Lote completo – Método <i>Amorim Faria</i> : módulo de elasticidade.	124
Fig. 5.33 – Lote completo – Norma NF B52-001:2007: módulo de elasticidade.	125
Fig. 5.34 – Lote aprovadas – Método <i>Amorim Faria</i> : módulo de elasticidade.	127
Fig. 5.35 – Lote aprovadas – Norma NF B52-001:2007: módulo de elasticidade.	128

ÍNDICE DE QUADROS

CAPÍTULO 2

Quadro 2.1 – Causas da progressiva diminuição dos povoamentos de Carvalho português.....	7
Quadro 2.2 – Dimensões das fibras e dos vasos que constituem o Carvalho português – Valores médios. (Adaptado de Sousa <i>et al.</i> , 2009b).....	17

CAPÍTULO 3

Quadro 3.1 – Normas de classificação visual, classes de qualidade e espécies florestais.	23
Quadro 3.2 – Propriedades físicas e mecânicas de madeira para estruturas: resinosas e choupo (EN 338:2009).	27
Quadro 3.3 – Propriedades físicas e mecânicas de madeira para estruturas: folhosas (EN 338:2009).....	28
Quadro 3.4 – Relação entre classes de qualidade e classes de resistência (EN 1912:2004).	29
Quadro 3.5 – Método <i>Amorim Faria</i> : proposta de classificação visual <i>in situ</i> – Pinho (Franco, 2008).	32
Quadro 3.6 – Método <i>Amorim Faria</i> : proposta de classificação visual <i>in situ</i> – Carvalho/Castanho (Franco, 2008).	32
Quadro 3.7 – Método <i>Amorim Faria</i> : valores de cálculo atribuídos a madeira antiga por inspecção visual <i>in situ</i> (adaptado de Franco, 2008).	33
Quadro 3.8 – Síntese dos valores obtidos nas campanhas experimentais realizadas por Sónia Franco (2008), Samuel Pereira (2009) e Albino Ramos (2010).	34
Quadro 3.9 – Escolha da técnica/equipamento não destrutivo em função do objectivo de inspecção (Botelho, 2006; Machado, 2003).	35
Quadro 3.10 – Classificação de madeiras por meio de ultra-sons (Arriaga <i>et al.</i> , 2002)	38
Quadro 3.11 – Correlações conhecidas entre o valor obtido por meio de ultra-sons ($E_{Dinâmico}$) e as propriedades mecânicas de elementos estruturais de madeira (Botelho, 2006).	39
Quadro 3.12 – Expressões de correlação entre o $VR_{médio}$ e algumas das principais propriedades mecânicas de elementos de madeira (Botelho, 2006).	42
Quadro 3.13 – Classes de resistência a usar no cálculo de estruturas de madeira portuguesa existentes (madeira antiga sem defeitos importantes).	47
Quadro 3.14 – Casos de aplicação de métodos mistos na avaliação de elementos estruturais de madeira (adaptado de Machado, 2003).	48

CAPÍTULO 4

Quadro 4.1 – Propriedades físicas e mecânicas atribuídas pela NF B52-001:2007 à madeira de Carvalho português para utilização em estruturas.....	53
Quadro 4.2 – Valores presentes na norma italiana UNI 11119:2004 ($H = 12\%$).....	54
Quadro 4.3 – Campanha experimental de 2008 – Síntese de resultados (Franco, 2008).	58

Quadro 4.4 – Identificação e caracterização dos lotes ensaiados.....	62
Quadro 4.5 – Campanha experimental de 2009 – Síntese de resultados para o lote G (Pereira, 2009).65	
Quadro 4.6 – Campanha experimental de 2009 – Síntese de resultados para o lote Ac (Pereira, 2009).....	68
Quadro 4.7 – Campanha experimental de 2010 – Síntese de resultados (Ramos, 2010).	73

CAPÍTULO 5

Quadro 5.1 – Massa volúmica	87
Quadro 5.2 – Massa volúmica – Valores estatísticos.	88
Quadro 5.3 – Alterações na norma francesa NF B52-001 de 1998 para 2007.....	90
Quadro 5.4 – Regras de medição de defeitos.....	92
Quadro 5.5 – Classificação visual e correspondentes propriedades mecânicas.....	95
Quadro 5.6 – Análise dos mecanismos de rotura.	101
Quadro 5.7 – Lote completo: resistência à flexão.	111
Quadro 5.8 – Lote completo: resistência à flexão – Valores estatísticos.....	112
Quadro 5.9 – Lote aprovadas – Método <i>Amorim Faria</i> : resistência à flexão.	116
Quadro 5.10 – Lote aprovadas – Método <i>Amorim Faria</i> : resistência à flexão – Valores estatísticos.	116
Quadro 5.11 – Lote aprovadas – Norma NF B52-001:2007: resistência à flexão.	119
Quadro 5.12 – Lote aprovadas – Norma NF B52-001:2007: resistência à flexão – Valores estatísticos.	119
Quadro 5.13 – Lote completo: módulo de elasticidade.	122
Quadro 5.14 – Lote completo: módulo de elasticidade – Valores estatísticos.....	123
Quadro 5.15 – Lote aprovadas – Método <i>Amorim Faria</i> : módulo de elasticidade.	126
Quadro 5.16 – Lote aprovadas – Método <i>Amorim Faria</i> : módulo de elasticidade – Valores estatísticos.	126
Quadro 5.17 – Lote aprovadas – Norma NF B52-001:2007: módulo de elasticidade.	127
Quadro 5.18 – Lote aprovadas – Norma NF B52-001:2007: módulo de elasticidade – Valores estatísticos.	128
Quadro 5.19 – Campanha experimental de 2011 – Síntese de resultados.	129

CAPÍTULO 6

Quadro 6.1 – Método <i>Amorim Faria</i> : classificação visual <i>in situ</i> – Carvalho.	133
--	-----

SÍMBOLOS

PROPRIEDADES DA MADEIRA

E_0 – Módulo de elasticidade paralelo ao fio

$E_{0,05}$ – Valor característico do módulo de elasticidade paralelo ao fio

$E_{0,máx}$ – Valor máximo do módulo de elasticidade paralelo ao fio

$E_{0,mean}$ – Valor médio do módulo de elasticidade paralelo ao fio

$E_{0,mín}$ – Valor mínimo do módulo de elasticidade paralelo ao fio

$E_{90,mean}$ – Valor médio do módulo de elasticidade perpendicular ao fio

$E_{c,0}$ – Módulo de elasticidade em compressão paralela ao fio

$E_{c,0,mean}$ – Valor médio do módulo de elasticidade em compressão paralela ao fio

$E_{m,g}$ – Módulo de elasticidade global em flexão

$f_{c,0}$ – Resistência à compressão paralela ao fio

$f_{c,0,k}$ – Valor característico da resistência à compressão paralela ao fio

$f_{c,90}$ – Resistência à compressão perpendicular ao fio

$f_{c,90,k}$ – Valor característico da resistência à compressão perpendicular ao fio

f_m – Resistência à flexão

$f_{m,k}$ – Valor característico da resistência à flexão

$f_{m,máx}$ – Valor máximo da resistência à flexão

$f_{m,mín}$ – Valor mínimo de resistência à flexão

$f_{t,0}$ – Resistência à tracção paralela ao fio

$f_{t,0,k}$ – Valor característico da resistência à tracção paralela ao fio

$f_{t,90,k}$ – Valor característico da resistência à tracção perpendicular ao fio

f_v – Resistência ao corte paralela ao fio

$f_{v,k}$ – Valor característico da resistência ao corte paralela ao fio

G_{mean} – Valor médio do módulo de distorção

H – Teor de água

M – Massa

M_H – Massa de um provete para o teor de água H

V – Volume

V_H – Volume de um provete para o teor de água H

ρ – Massa volúmica

ρ_k – Valor característico da massa volúmica

$\rho_{m\acute{a}x}$ – Valor máximo da massa volúmica

ρ_{mean} – Valor médio da massa volúmica

$\rho_{mín}$ – Valor mínimo da massa volúmica

ENSAIO MECÂNICO À FLEXÃO

a – Distância entre o apoio e a força aplicada no ensaio à flexão

F – Força aplicada

$F_{m\acute{a}x}$ – Força máxima aplicada

W – Módulo de flexão da secção

w – Deformação

ESTATÍSTICA

CV – Coeficiente de Variação

R^2 – Coeficiente de determinação

σ – Desvio padrão

DIMENSÕES E PARÂMETROS DE AFERIÇÃO DE DEFEITOS DA MADEIRA

b – Largura da peça/provete (menor dimensão transversal)

d – Descaio

f – Profundidade da fenda

h – Altura da peça/provete (maior dimensão transversal)

i – Inclinação do fio

L – Comprimento da peça/provete

L_d – Comprimento do descaio

L_f – Comprimento da fenda

$L_{mín}$ – Comprimento mínimo da peça/provete

I – Vão em flexão

p – Desnível considerado na face da peça para determinação do parâmetro i

r – Distância entre fendas

u – Desenvolvimento considerado no canto da peça para determinação do parâmetro i

y – Desnível considerado no canto da peça para determinação do parâmetro i

x – Distância entre nós

z – Desenvolvimento considerado na face da peça para determinação do parâmetro i

$\varnothing$ – Diâmetro dos nós

PARÂMETROS AFFECTOS À UTILIZAÇÃO DE EQUIPAMENTOS NÃO DESTRUTIVOS

$E_{Dinâmico}$ – Módulo de elasticidade dinâmico

$E_{Estático}$ – Módulo de elasticidade estático

K – Constante de proporcionalidade (função da espécie de madeira)

Ri – Resistência à perfuração com o Resistógrafo

$VR_{médio}$ – Valor do Resistógrafo

v – Velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas

ABREVIATURAS

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

LESE – Laboratório de Engenharia Sísmica e Estrutural

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

LSC – Laboratório de Sistemas e Componentes

LVDT – Linear Variable Differential Transformer

PECA – Programa de Ensaio e Controlo de Actuadores

PSF – Ponto de Saturação da Fibras

1

INTRODUÇÃO

1.1. ÂMBITO E OBJECTIVO DA DISSERTAÇÃO

A madeira é produzida a partir da árvore, sujeitando-se ao longo do seu processo de formação a vários factores de origem natural que influenciam e personalizam a sua constituição. Efectivamente, as suas condições de “fabricao” não são idênticas e não podem ser controladas, justificando assim o seu carácter heterogéneo que, em conjunto com a acentuada anisotropia, confere a este material um estatuto especial.

Apesar de a madeira evidenciar características singulares que, em alguns casos, são limitadoras, as excelentes características mecânicas e de durabilidade, assim como a sua abundância na natureza, tornaram o seu uso bastante apetecível. Reconhecida como o primeiro material estrutural, a madeira tem sido utilizada desde sempre pelo Homem como matéria-prima na construção de obras excepcionais, algumas das quais perduraram até aos nossos dias em bom estado de conservação.

Naturalmente que a sua forma de utilização sofreu uma evolução que foi particularmente vincada com a descoberta dos metais (3000 a 1000 a.C.), permitindo, por um lado, produzir ferramentas para serrar a madeira e, por outro, desenvolver ligações mais eficazes. Os progressos referidos e o acumular de experiência na utilização deste material contribuiu para o desenvolvimento de sistemas estruturais sucessivamente mais arrojados.

Em Portugal, a utilização da madeira como elemento estrutural foi sendo, mais recentemente, progressivamente substituída por outros materiais, cujas propriedades eram praticamente controladas pela mão humana. Na segunda metade do século XIX, a utilização do ferro e do vidro permitiram a construção em altura bem como a cobertura de grandes espaços, sendo o ideal para o tipo de construções utilitárias, tais como fábricas, armazéns, estações ferroviárias, entre outras. A arquitectura do ferro durou até ao início do século XX, época caracterizada por um desenvolvimento extraordinário na utilização e compreensão do funcionamento do betão armado. As potencialidades deste material foram desde logo reconhecidas, tendo sido a fiabilidade das propriedades mecânicas e a capacidade de ganhar forma os principais atributos explorados por engenheiros e arquitectos, respectivamente.

Até ao aparecimento do betão armado, exceptuando a gaiola pombalina e os palheiros do litoral central português, o parque habitacional era fundamentalmente constituído por edifícios cujos elementos resistentes eram paredes de pedra, nas quais apoiavam as escadas, os pavimentos e as coberturas em madeira. Actualmente, alguns desses edifícios encontram-se num estado avançado de degradação e, por isso, carecem de uma intervenção que permita a sua adaptação às necessidades actuais dos utentes. Deste modo, o mercado da reabilitação tem crescido nos últimos anos, conduzindo ao aumento da

utilização de madeira para reforço/substituição de parte ou da totalidade dos seus elementos estruturais.

Embora seja apontada como um material estrutural com elevada resistência, sobretudo se tivermos em conta o seu peso, as particularidades da madeira (defeitos) sempre induziram receio e insegurança aos projectistas. Assim, para que este obstáculo fosse ultrapassado, foi necessário criar um esquema de controlo de qualidade que garantisse total segurança na utilização de peças estruturais de madeira. Este procedimento é actualmente designado por classificação e pode ser executado visualmente ou mecanicamente, resultando numa determinada classe de qualidade que está interligada a uma classe de resistência, à qual correspondem propriedades físicas e mecânicas. Todo este processo está devidamente normalizado e apenas se aplica a madeira nova, sendo a avaliação da capacidade resistente de peças *in situ* bastante complexa e, em alguns casos, ultrapassada com recurso a técnicas não destrutivas.

Com o objectivo de contornar e ultrapassar esta dificuldade, Sónia Franco (2008) desenvolveu uma metodologia de aplicação prática em obra, designada por método *Amorim Faria*, que permitia atribuir propriedades mecânicas através da inspecção visual dos elementos estruturais de madeira antiga. Porém, as campanhas experimentais realizadas por Samuel Pereira (2009) e Albino Ramos (2010) não validaram o método proposto, revelando que a aplicação do mesmo era imprudente e poderia conduzir ao reaproveitamento de peças com uma capacidade resistente bastante sobrestimada.

Perante o exposto, a presente dissertação com o tema *Comportamento Mecânico de Madeira de Carvalho Português* pretende avaliar a aplicabilidade do método *Amorim Faria* na classificação visual de madeira nova. Paralelamente ao referido estudo, que ganha importância pelo facto de em Portugal apenas existir uma norma de classificação visual para madeira nova de Pinho bravo português (*Pinus pinaster* Ait.), o presente trabalho também pretende validar (ou não) os valores propostos na norma francesa NF B52-001:2007 e verificar a sua aplicabilidade às espécies de Carvalho existentes em Portugal. Além de tirar conclusões acerca das duas vias de classificação visual referidas, pretende-se ainda reflectir sobre quais as classes de resistência adequadas à madeira de Carvalho existente no nosso país.

O cumprimento dos objectivos propostos tem por base a análise dos resultados obtidos na campanha experimental executada no âmbito da presente tese, permitindo também incrementar o conhecimento sobre a madeira em geral e, particularmente, sobre o género Carvalho, designadamente nos seguintes domínios:

- Propriedades físicas e mecânicas;
- Mecanismos de rotura;
- Comportamento à solicitação.

Resumidamente, com os objectivos supracitados, procurou-se impulsionar o conhecimento sobre a madeira de Carvalho como material estrutural e propor ferramentas que auxiliem a classificação visual de peças novas de madeira serrada de Carvalho a incorporar em construções novas ou em processos de reabilitação.

1.2. BASES DO TRABALHO DESENVOLVIDO

A necessidade de atribuir valores resistentes (classificar) a madeira antiga em processos de reabilitação conduziu ao desenvolvimento de uma ferramenta que auxiliasse esse procedimento, sendo necessário validar/reprovar essa via de classificação. A investigação referida foi transversal a três

campanhas experimentais realizadas no âmbito de anteriores dissertações de Mestrado que ocorreram na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) com os seguintes temas:

- *Proposta de Atribuição de Propriedades Mecânicas a Elementos Estruturais de Madeira por Inspecção Visual in situ* (Franco, 2008);
- *Avaliação Experimental das Principais Propriedades Mecânicas de Peças Estruturais em Madeira Antiga* (Pereira, 2009);
- *Avaliação do Comportamento Mecânico de Madeira Antiga* (Ramos, 2010).

A elaboração do presente trabalho teve como principal base as conclusões que resultaram dos estudos supracitados, pretendendo assim dar continuidade à investigação já executada e tirar conclusões de síntese sobre o assunto.

Além dos documentos referidos, no sentido de dar resposta aos objectivos propostos, o trabalho experimental seguiu as especificações normativas nacionais e europeias, estas últimas definidas pelo Comité Europeu de Normalização (CEN). As normas que suportaram o trabalho experimental podem dividir-se em dois grandes grupos:

- Normas de classificação de madeiras, nomeadamente a norma francesa NF B52-001:2007 utilizada na classificação visual das peças de Carvalho ensaiadas e as normas que estiveram na base da proposta de avaliação de propriedades mecânicas desenvolvida por Sónia Franco (2008), correntemente designada nas dissertações atrás referidas por método *Amorim Faria*;
- Normas que especificam as condições de ensaio, nomeadamente as que regulam a avaliação das propriedades físicas e mecânicas. A determinação da massa volúmica seguiu as disposições da NP 616:1973 e a determinação da resistência à flexão e do módulo de elasticidade teve como suporte a norma EN 408:2003.

Foram ainda consultados diversos documentos que, embora num patamar inferior, tiveram uma importância significativa na exposição de alguns conceitos de carácter florestal e estrutural sobre madeira e, em particular, sobre o Carvalho português. Todos os trabalhos consultados e que apoiaram a elaboração da presente dissertação são definidos, ao longo da dissertação, através de referências bibliográficas detalhadas.

1.3. ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

De forma a atingir os objectivos propostos, a presente tese foi dividida em vários capítulos, apresentando um encadeamento lógico que pretende permitir uma fácil interpretação das sucessivas fases do estudo desenvolvido. No sentido de facilitar a consulta ou leitura do presente trabalho, apresenta-se uma descrição sumária do conteúdo de cada um dos capítulos:

- No capítulo 1 definem-se os objectivos do trabalho e a sua estrutura e organização;
- No capítulo 2 descrevem-se as particularidades do Carvalho português (*Quercus faginea*), espécie florestal estudada no âmbito do presente trabalho, fazendo-se referência à sua distribuição geográfica e a vários aspectos da sua história. Enquanto madeira serrada, evidenciam-se algumas das suas características anatómicas sob vários níveis de observação, salientando-se as suas potencialidades de aplicação;
- No capítulo 3 a madeira é tratada como um material estrutural, descrevendo-se os procedimentos que permitem avaliar as propriedades físicas e mecânicas tanto de madeira nova como de madeira antiga. No primeiro caso detalha-se o processo de classificação de madeiras (visual e mecânica) e a relação entre classes de qualidade e classes de resistência,

no segundo caso dá-se particular relevo à descrição das técnicas/equipamentos não destrutivos e do método *Amorim Faria*, fazendo-se algumas considerações acerca da sua fiabilidade e aplicabilidade;

- O capítulo 4 constitui uma síntese de valores das propriedades físicas e mecânicas da madeira de Carvalho a nível normativo ou que tenham resultado de trabalhos de investigação realizados em Portugal. Destacam-se as campanhas experimentais executadas na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) da autoria de Sónia Franco (2008), Samuel Pereira (2009) e Albino Ramos (2010);
- O capítulo 5 é, porventura, o mais importante do presente trabalho, representando um contributo importante no conhecimento existente. É efectuada uma descrição detalhada de toda a campanha experimental, nomeadamente a caracterização completa das amostras, a pormenorização dos ensaios mecânicos realizados, a interpretação dos mecanismos de rotura e, por fim, o tratamento estatístico completo dos resultados obtidos para a resistência à flexão e para o módulo de elasticidade;
- Finalmente, no capítulo 6 referem-se todas as conclusões que resultaram do trabalho experimental, dando resposta aos objectivos inicialmente propostos, além de se proporem desenvolvimentos futuros que complementem o estudo efectuado e que permitam contribuir de modo significativo para o aumento da utilização do Carvalho como elemento estrutural.

No que diz respeito à autoria de citações e figuras, faz-se uma referência específica identificando claramente as fontes. Na exposição de conhecimentos gerais que sofreram uma interpretação do autor não é feita qualquer referência, assim como nas figuras por aquele elaboradas.

2

CARVALHO PORTUGUÊS – ÁRVORE E MADEIRA

2.1. INTRODUÇÃO

Carvalho português, Carvalho cerquinho, ou simplesmente Cerquinho são as várias designações dadas à mesma árvore, cujo nome científico propriamente dito é *Quercus faginea*, designação proposta pelo francês Jean-Baptiste Lamarck em 1785 (Silva, 2007b). Constitui uma das Angiospérmicas (plantas com flor) pertencentes à família das Fagáceas e tem por parentes próximos a Faia (*Fagus sylvatica*) e o Castanheiro (*Castanea sativa*).

Apesar de não ser consensualmente aceite por todos os botânicos, é importante referir que o *Quercus faginea* se pode dividir em três subespécies: *alpestris*, *faginea* e *broteroi*, as quais se diferenciam por diferenças ténues nas suas folhas. É neste último grupo que o Cerquinho se inclui e, por isso, muitos defendem que se deveria chamar *Quercus broteroi*. Porém, dado que não existe conformidade de opiniões, optou-se no presente trabalho por apenas dar importância à espécie e não às subespécies, até porque em quase tudo são idênticas e, por isso, difíceis de diferenciar.

Os Cercas, designação dada aos povoamentos de Cerquinho, representam paisagens extraordinárias. São escassos os povoamentos puros de Carvalho português, aparecendo associados com outras espécies do género *Quercus*, tais como o Sobreiro (*Quercus suber*), a Azinheira (*Quercus ilex*) e o Carvalho negral (*Quercus pyrenaica*). A sua área potencial de desenvolvimento concentra-se na Península Ibérica e no Norte de África, cujas matas têm vindo a ser exploradas de forma insustentável, contribuindo para a redução acentuada da área do coberto vegetal ocupada pelo Cerquinho.

Trata-se de uma árvore de crescimento lento, muitas vezes substituída por outras espécies por essa mesma razão, evidenciando um porte mediano e uma copa ampla. A sua madeira é reconhecida pelas boas características físicas e mecânicas que afluem, sendo essa uma das razões que conduziu à desflorestação de parte dos seus bosques autóctones. Desde a construção naval à construção civil, tem vindo a ser utilizada com os mais diversos fins consoante as necessidades da época.

Tendo em conta que a presente dissertação se debruça sobre o comportamento mecânico de madeira de Carvalho português em particular, o presente capítulo pretende fazer a ponte entre a área florestal e estrutural. Desde modo, os aspectos atrás mencionados relacionados com o Cerquinho, enquanto árvore e madeira, são de seguida devidamente desenvolvidos e aprofundados.

2.2. DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DA ESPÉCIE

Os Cercas constituem ecossistemas que evidenciam uma grande biodiversidade e, por essa razão, constituíram desde sempre um recurso importante para o Homem. A riqueza destes povoamentos foi sendo sucessivamente destruída pela sua insustentável exploração, verificando-se a substituição de alguns Carvalhais por matas “industriais” constituídas por árvores da mesma espécie e com a mesma idade. Deste modo, em função da crescente destruição, interessa sobretudo aqui abordar não só os povoamentos actuais de Cerquinho como também a sua evolução, nomeadamente no nosso país.

2.2.1. O CARVALHO NO MUNDO

O Carvalho português aparece espontaneamente no continente europeu e africano. O limite da sua área de distribuição é a linha que envolve todo o conjunto de condições do meio onde a árvore se desenvolve, em particular o clima. Grande parte das áreas de Carvalhal ocorre em climas Mediterrânicos, no entanto, podem surgir em zonas também influenciadas pelo clima Atlântico. Refira-se que ambos os climas mencionados são temperados, ou seja, conhecem uma estação fria (Inverno) e uma estação quente (Verão).

Na Europa, o Cerquinho constitui uma fatia importante do coberto vegetal da Península Ibérica, à excepção do litoral do Levante, dos vales dos rios Ebro e Guadiana e da zona constituída pela Galiza, Astúrias, Cantábria e País Basco (Silva, 2007b). Por outras palavras, exceptuando a zona Norte, Este e parte da zona Sul, o Cerquinho está presente por toda a Península. Embora em menor escala, também podem ser encontrados pequenos povoamentos desta espécie florestal no Sul de França.

Em África, o Carvalho português está presente na zona Noroeste, conhecida por África menor na época do Império Romano e actualmente designada por Grande Magreb. Esta região africana é constituída por vários países, porém, a espécie florestal em apreço apenas se encontra em Marrocos, Argélia e Tunísia.

2.2.2. O CARVALHO EM PORTUGAL

Há cerca de 8 mil anos, Portugal evidenciava uma paisagem vegetal notável formada por bosques autóctones (Silva, 2007b), ou seja, áreas constituídas por árvores originárias do próprio território onde se desenvolveram. A Norte, na Região do Minho, predominavam os prados sempre verdes com árvores que perdem as suas folhas na época fria, as quais se designam por árvores de folha caduca. A Sul, em particular no Alentejo e no Algarve, os prados secam no Verão, mas neste caso as árvores conservam as suas folhas intactas ao longo de todo o ano e, por isso, chamam-se árvores de folha perene. Porém, em Trás-os-Montes e nas Beiras, observavam-se bosques constituídos por árvores de folha marcescente, ou seja, a sua folhagem seca e apenas cai tardiamente, muitas vezes perto da Primavera. É neste tipo de ambiente que predominava o Carvalho português.

Ora, a distribuição da vegetação está intimamente relacionada com o clima, sendo esse aspecto bastante notório no nosso país. É sabido que em Portugal existem duas grandes regiões climáticas, a Atlântica e a Mediterrânica, que se diferenciam pelas diferenças entre precipitação e temperatura. Na primeira chove com alguma abundância durante todo o ano e a temperatura regista valores reduzidos, na segunda verifica-se exactamente o contrário, conduzindo à secagem da vegetação. A fronteira entre elas abrange Trás-os-Montes e as Beiras, áreas que são influenciadas pelos dois climas. Na figura 2.1 é possível observar os aspectos atrás mencionados e distinguir intuitivamente as duas zonas climáticas referidas, embora os seus limites não sejam claramente definidos.

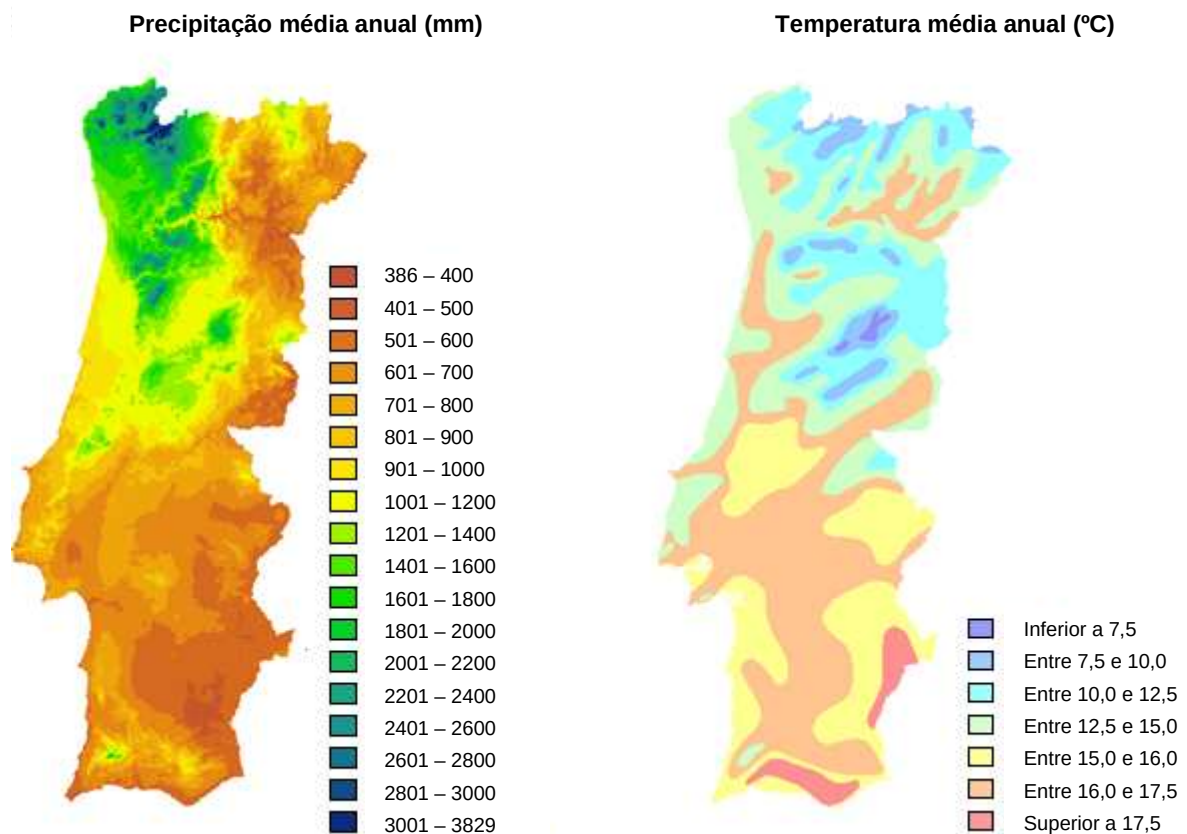


Fig. 2.1 - Dados climáticos: precipitação e temperatura – Valores médios anuais (fonte: <http://snirh.pt>).

De facto, Portugal era detentor de um coberto vegetal repleto de bosques autóctones sustentados pela enorme capacidade ecológica do território português. Nessa altura, o povo primitivo vivia da floresta que lhes oferecia lenho, plantas medicinais, caça, peixe e frutas, que no caso do Cerquinho era a bolota, usada para fazer farinha para o pão, dado que ainda não se conhecia o trigo. Porém, a crescente exploração dos povoamentos de Carvalho português, fruto do desenvolvimento do Homem, conduziu à sua decadência. O quadro 2.1 sintetiza os eventos históricos que acentuaram a tendência referida.

Quadro 2.1 - Causas da progressiva diminuição dos povoamentos de Carvalho português.

Data (Anos atrás)	Evento histórico
5600	Implementação da agricultura.
3300	Alargamento da área afectada à actividade agrícola que, por esta altura, também se destinava à pastorícia.
880	Crescimento do cultivo de cereais motivado pelo aumento da população.
500	Necessidade de madeira para a construção naval desencadeada pelo início da expansão marítima portuguesa (Descobrimentos).
155	Construção de vias-férreas

Já no século XX, existiram outros tantos motivos que precipitaram fortes desarborizações. As necessidades de combustível motivadas pelas Grandes Guerras, as sucessivas políticas que conduziram à substituição dos Cercais por árvores de crescimento rápido como o Pinheiro bravo (*Pinus pinaster*) e o Eucalipto (*Eucalyptus globulus*), a mecanização da agricultura e, mais recentemente, a incidência de incêndios constituíram as principais causas da queda abrupta dos bosques de Carvalho. Naturalmente que todas estas causas se estendem às outras espécies de Carvalho que também viram os seus povoamentos enfraquecidos.

Actualmente existem menos de 1200 ha (Catry *et al.*, 2007) destes bosques que se encontram dispersos não só na zona fronteira entre os climas Atlântico e Mediterrânico, como também em áreas onde outrora não existiram. Este facto deriva de plantações posteriores e da enorme capacidade de adaptação e desenvolvimento que o Carvalho português aufere, contribuindo para a ocorrência de povoações isoladas em algumas zonas do país.

Perante o exposto, pode dizer-se que o Cerquinho é já considerado uma espécie florestal em vias de extinção e, apesar de ainda estarmos a tempo de inverter esta tendência, importa salientar que caso se tivessem tomado as devidas políticas que regulassem o abate controlado desta espécie autóctone, a actual área de Cercais seria certamente superior.

2.3. HISTÓRIA NATURAL DO CARVALHO PORTUGUÊS

Se quisermos apontar às origens do Carvalho português teremos que recuar 90 Milhões de anos (Ma), nomeadamente à Era Mesozóica (desde 250 até 65 Ma atrás) (Silva, 2007b). Nessa época surgiram as Fagáceas, família à qual o Cerquinho pertence e que naturalmente se enquadra no grupo das Angiospérmicas (plantas com flor). Importa referir que por essa altura já reinavam há largos milhões de anos as espécies sem flor, ou seja, as Gimnospérmicas.

Em termos vegetativos, verificaram-se bastantes alterações na Era que se seguiu, designada por Cenozóica (desde 65 Ma atrás até ao presente) e na qual ainda nos encontramos. As alterações climáticas dos últimos 7 Ma induziram fortes mudanças nas florestas da Península Ibérica, área onde predomina o Cerquinho a nível europeu. Nessa altura o clima aí sentido era subtropical, caracterizado por temperaturas médias anuais altas e precipitações moderadas, predominando áreas verdes constituídas essencialmente por Loureiros que perduraram até há cerca de 3 Ma atrás. Estima-se que esse foi precisamente o momento em que o Carvalho português se diferenciou da Fagácea, sofrendo as alterações climáticas que se seguiram e que conduziram ao clima dos nossos dias

De acordo com Silva (2007b), só no início do período Holocénico (desde 10000 anos atrás até ao presente) é que se verificou uma expansão e estabelecimento dos Carvalhais, em particular do *Quercus faginea*. Essa foi, porventura, a altura em que a área de Cercais atingiu o seu máximo e, desde então, tem-se vindo a assistir a uma diminuição progressiva desses bosques. A redução dos povoamentos de Carvalho português foi provocada pelo Homem e, tal como se mencionou anteriormente, é particularmente acentuada em determinadas épocas.

O aparecimento e as principais fases do desenvolvimento das áreas verdes, em particular dos povoamentos de Carvalho português, estão devidamente marcados na escala temporal evidenciada na figura 2.2.

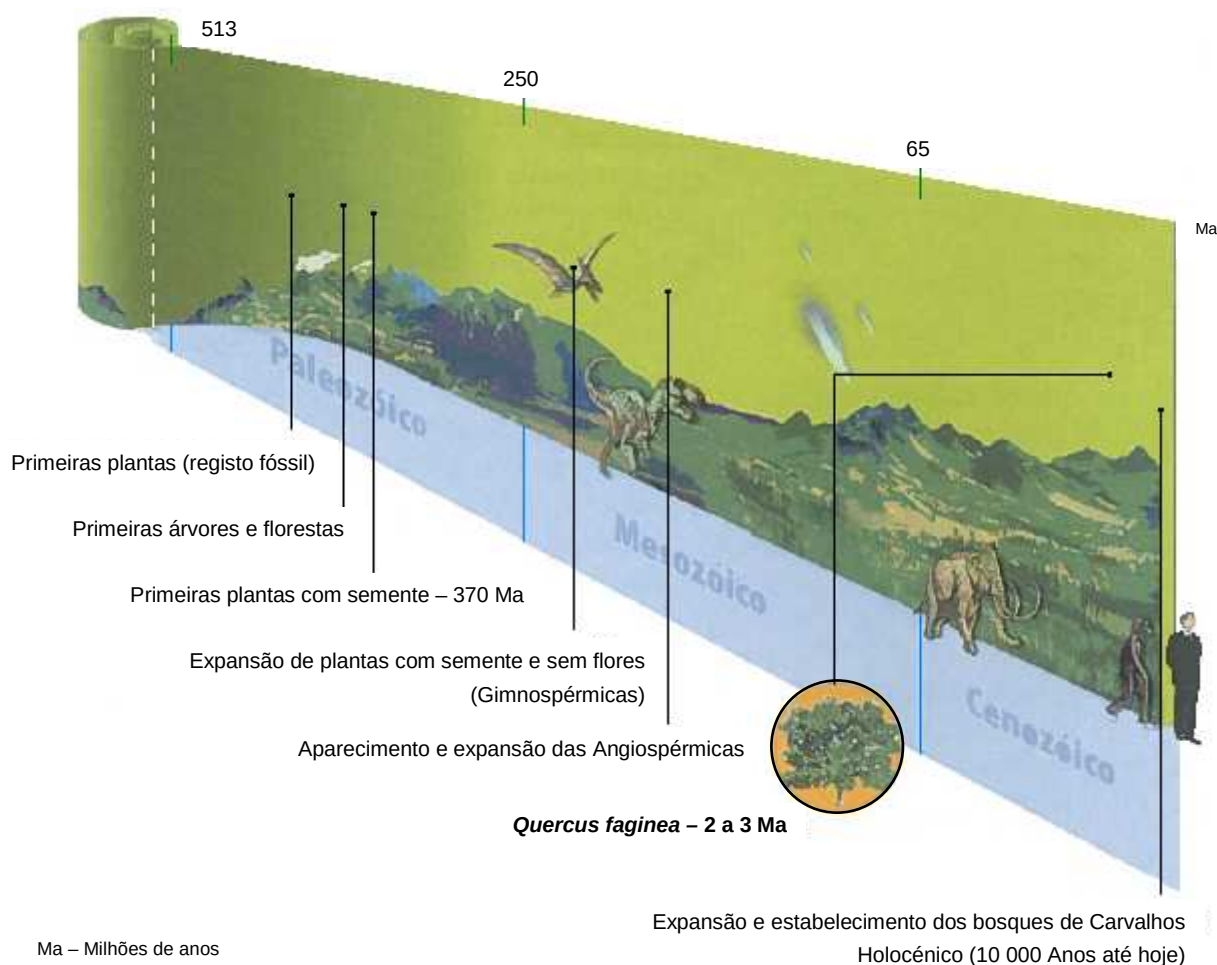


Fig. 2.2 - Eras Geológicas (adaptado de Silva, 2007b).

2.4. DESCRIÇÃO GERAL DA ESPÉCIE

O Carvalho português constitui uma árvore de crescimento lento e com uma longevidade na ordem dos 300 anos, apesar de existirem exemplares com 400 anos (Ramos, 2009). Normalmente apresenta-se em bosques mais ou menos densos, surgindo com frequência em povoamentos mistos associados a outras espécies, no entanto, também podem ocorrer isolados em relvados ou campos e até alinhados em caminhos. A sua presença é o resultado da Natureza ou do trabalho do Homem (Clémence e Perón, 1995).

2.4.1. COMPONENTES

Apesar de apresentarem arquitecturas diferentes, a estrutura das árvores é semelhante e divide-se em três componentes: raiz, caule e copa, cada uma das quais com funções específicas. Embora não seja uma característica particular do Carvalho português, a noção da sua constituição e a designação atribuída a cada uma das suas partes é importante no momento da descrição do seu aspecto (ver 2.4.2) e para que se perceba a sua aplicação final. Por exemplo, como material de construção, apenas se utiliza a madeira do caule, também designado por tronco (ver figura 2.3).

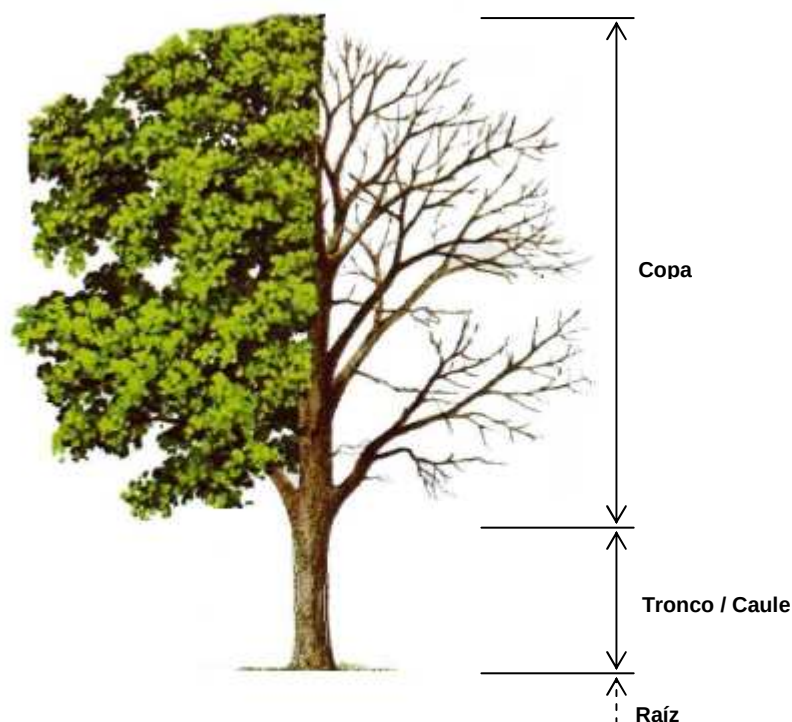


Fig. 2.3 - Estrutura do Carvalho português (adaptado de Martins, 2009).

A raiz tem a função de fixar a árvore ao solo e de absorver nutrientes essenciais ao seu desenvolvimento. À medida que o tronco e a copa crescem, para cumprir eficazmente essas funções, a raiz expande-se para, por um lado, garantir maior estabilidade à árvore em função da sua maior exposição a ventos fortes e, por outro, procurar alimento em zonas ainda não exploradas de modo a dar resposta ao aumento do consumo (Martins, 2009). Em termos de forma, no caso do Cerquinho, a raiz é constituída por uma zona central à qual se ligam várias ramificações.

Das três componentes que constituem a estrutura da árvore, apenas o caule e a copa são visíveis à superfície. O caule constitui o prolongamento da raiz acima do solo e, ao contrário daquela, é praticamente isento de ramificações. Tem a função de suportar a árvore, transmitindo à componente inferior os esforços provenientes do peso próprio e de eventuais acções exteriores, além de dar continuidade à condução das substâncias nutritivas até às folhas. A copa é constituída por ramos e folhas, tendo como principal função a realização da fotossíntese, processo essencial na produção de oxigénio e hidratos de carbono necessários à sobrevivência e desenvolvimento da árvore.

2.4.2. ASPECTO

A arquitectura do Carvalho português pode ser definida pelo seu próprio “carácter”, caso se encontre isolada, ou pela competição que trava com as árvores vizinhas na procura de uma posição ao sol (ver figura 2.4). No primeiro caso, as árvores situam-se em relvados citadinos e apresentam um tronco baixo com uma copa densa enquanto, no segundo caso, se localizam em áreas florestais e exibem troncos altos com copas pouco volumosas (Clémence e Péron, 1995). De qualquer forma, a espécie florestal em apreço raramente atinge os 20 m de altura, apesar de existirem registos de exemplares que ultrapassaram os 25 m (Silva, 2007b).



Fig. 2.4 – Arquitectura do Carvalho português. Esquerda: árvore isolada (fonte: <http://arvoresdeportugal.free.fr>); Direita: árvore em ambiente florestal.

Na generalidade dos casos, o tronco apresenta-se esbelto, bem apumado e bastante ramificado, sendo recoberto por uma casca acinzentada. É coroado por uma copa arredondada, mais ou menos regular, que ostenta ramos com folhas caducas, ou mais concretamente, folhas marcescentes. Chegando o Outono, este tipo de folhas seca e apenas se desprende na Primavera seguinte, quando a nova folhada rebenta. Assim, durante o Inverno, o Cerquinho preenche a paisagem de um tom dourado que é fruto das suas copas ressequidas (ver figura 2.5 - esquerda). Por esse mesmo motivo, esta espécie florestal é muitas vezes considerada a transição entre os Carvalhos de folha caduca e os Carvalhos de folha persistente.

Em termos de forma, o Carvalho português exibe dois tipos de folha que apenas se distinguem pela largura que apresentam, as mais largas designam-se por vernais, às mais estreitas chamam-se estivais (Ramos, 2009). Ambas apresentam um comprimento situado entre 5 e 15 cm (Silva, 2007a) com um pecíolo de 5 a 20 mm (Pedro, 1989), sendo bastante dentadas e evidenciando várias nervuras salientes e, por isso, bem definidas. Os frutos do Cerquinho são bolotas cilíndricas que se suspendem através de pedúnculos com cerca de 25 mm de comprimento (Silva, 2007b). Amadurecem por volta de Setembro a Outubro e, muitas vezes, são usadas como alimento para o gado em períodos de maior carência de pastos. O aspecto de ambos os órgãos vegetais mencionados pode ser visualizado na figura 2.5 – direita.



Fig. 2.5 – Especificidades do Carvalho português. Esquerda: copa ressequida no Inverno (fonte: <http://flickr.com>); Direita: folha e fruto no Verão (fonte: <http://florestar.net>).

2.4.3. HABITAT

De todas as espécies com folha marcescente, o Carvalho português é a que apresenta maiores variabilidades no que diz respeito às preferências de habitat. Conforme adiante se verá, esta espécie florestal é pouco exigente, particularmente no que diz respeito aos solos onde se desenvolve e às condições climáticas a que está sujeito.

Quanto ao tipo de solo, ao contrário do Sobreiro (*Quercus suber*) e do Pinheiro bravo (*Pinus pinaster*), o Cerquinho adequa-se melhor a substratos calcários, aluviões e arenitos (solos alcalinos e neutros). Porém, também pode ocorrer noutro tipo de litologias (solos ácidos) e, por isso, frequentemente surge acompanhado por várias espécies em função do tipo de substrato onde se desenvolve. O Carvalho negral (*Quercus pyrenaica*) constitui um bom exemplo dessa coexistência, formando povoamentos mistos onde ambas as espécies referidas se misturam.

O Carvalho português ocorre desde o nível do mar até, no máximo, 1000 m de altitude, tolerando bem os climas continentais com grandes amplitudes térmicas e de humidade. Necessita de uma temperatura média anual compreendida entre 15 e 26 °C no Verão e -4 e 8 °C no Inverno, embora suporte mínimas de -25 °C e máximas de 45 °C, ocorrendo em zonas onde a precipitação média anual se situa entre 350 e 2000 mm (Ramos, 2009). A sua sobrevivência em condições hídricas desfavoráveis é justificada pelo facto das suas folhas serem reduzidas e, por isso, induzirem menores perdas por transpiração.

2.5. CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA

A madeira é produzida pelas árvores e, por isso, a sua estrutura resulta das necessidades daquele organismo vivo, nomeadamente suporte, alimentação e protecção. Constitui um material com uma estrutura única caracterizada por uma enorme heterogeneidade, que induz variabilidades até dentro do mesmo tronco, e por uma forte anisotropia, que provoca diferentes comportamentos consoante cada uma das direcções espaciais, geralmente divididas em tangencial, radial e axial, tal como se ilustra na figura 2.6.

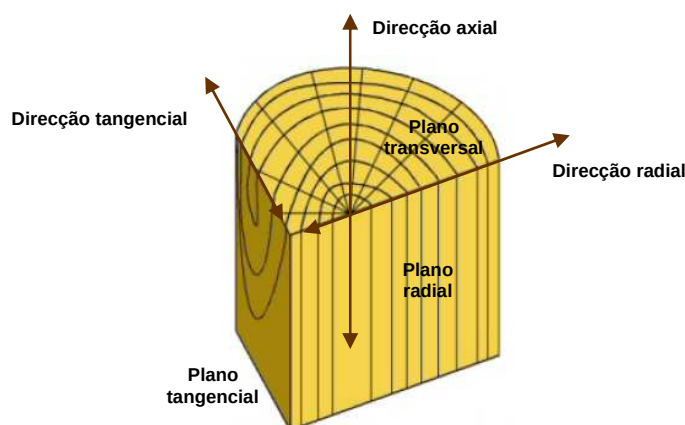


Fig. 2.6 – Direcções fundamentais da madeira (adaptado de Quoirin, 2004).

A análise da figura 2.6 permite ainda identificar três planos de corte que seguem as direcções fundamentais e que são importantes no estudo da arquitectura anatómica, designadamente:

- Plano transversal – perpendicular à direcção axial;

- Plano tangencial – paralelo ao eixo axial e tangente a um qualquer anel de crescimento;
- Plano radial – perpendicular aos anéis de crescimento, passando (teoricamente) pelo centro do tronco.

Ora, em caso de diferendo, o estudo dos três planos referidos facilita a identificação rigorosa do grupo e espécie botânica a que a madeira pertence e a análise da estrutura anatómica do lenho a diferentes níveis. O corte transversal permite observar macroscopicamente (a olho nu ou com aumentos na ordem das 10 vezes) todas as camadas que constituem a árvore, no entanto, existem determinados aspectos, como a inclinação do fio, que só os planos longitudinais (tangencial e radial) permitem visualizar. Em termos microscópicos (aumentos na ordem das 500 vezes), só analisando os três cortes em simultâneo é possível uma correcta avaliação da estrutura anatómica.

Uma vez descritos os conceitos principais que permitem a caracterização correcta e completa da madeira enquanto elemento estrutural, importa recordar que o presente capítulo se debruça apenas sobre uma espécie florestal, o Carvalho português.

2.5.1. CLASSIFICAÇÃO BOTÂNICA

A análise da estrutura anatómica da madeira permite diferenciar dois grandes grupos botânicos: as Gimnospérmicas, correntemente designadas por coníferas, resinosas ou madeiras brandas, e as Angiospérmicas, usualmente chamadas por dicotiledóneas, folhosas ou madeiras duras. As suas estruturas são substancialmente diferentes, verificando-se que a variedade e diversidade de células é manifestamente superior no segundo caso.

As diferenças entre os grupos botânicos referidos estendem-se à arquitectura da árvore e até mesmo a alguns dos seus órgãos vegetais. Enquanto as resinosas apresentam folhas estreitas e frutos com forma de cone, as folhosas exibem folhas planas com uma rede de finas nervuras e frutos com grande diversidade de forma e cor (Cachim, 2007). Na figura 2.7 é possível constatar as diferenças mencionadas entre duas espécies pertencentes a grupos diferentes.



Fig. 2.7 - Grupos botânicos. Esquerda: folhosa – Carvalho português; Direita: resinosa – Pinheiro.
(Adaptado de Martins, 2009).

Tendo em conta a figura 2.7, facilmente se percebe que o Carvalho português, espécie florestal alvo de estudo no presente trabalho, evidencia características de uma folhosa. A referência aos dois grandes grupos botânicos tem por objectivo realçar as principais diferenças entre ambos e assim auxiliar a identificação visual do Cerquinho.

2.5.2. ESTRUTURA ANATÓMICA DA MADEIRA

2.5.2.1. Estrutura macroscópica

O corte transversal de uma árvore tem aproximadamente uma secção circular onde, à partida, é possível distinguir macroscopicamente algumas das suas camadas constituintes. Embora não garanta um conhecimento total, este tipo de análise permite observar muitas das características estruturais da madeira, conforme evidencia a figura 2.8. Refira-se que, das várias camadas que constituem o tronco, apenas o borne e o cerne possuem características que permitem a sua utilização na construção civil, nomeadamente sob a forma de peças estruturais de madeira maciça.

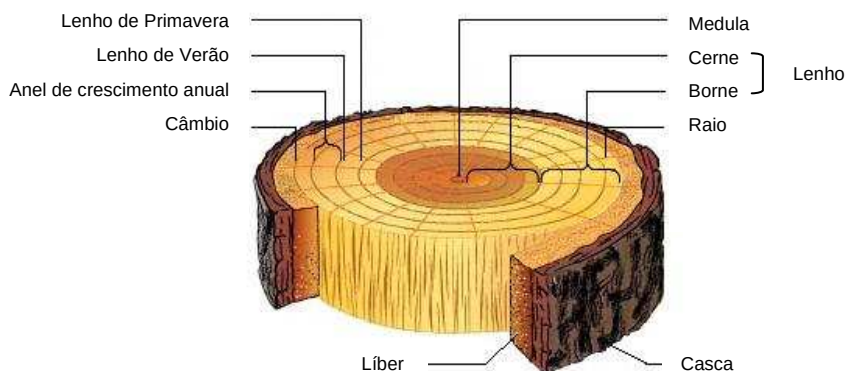


Fig. 2.8 - Corte transversal de um tronco de árvore (fonte: <http://timberridgewoodworks.com>).

A casca é a parte exterior, mais escura e de contorno irregular, responsável pela protecção do tronco. Entre esta camada e o lenho existe o câmbio, tecido apenas visível ao microscópio, cuja função é engrossar o tronco, produzindo lenho para o interior e casca para o exterior. O conjunto de células produzidas para a periferia designa-se por líber ou floema e tem a responsabilidade de conduzir a seiva elaborada, produto da fotossíntese, para as zonas em crescimento.

O lenho constitui o suporte fundamental da árvore e divide-se em duas zonas com diferentes tonalidades, a mais clara é o borne e a mais escura o cerne. O borne é a camada exterior e corresponde à madeira mais jovem constituída por células vivas que garantem a condução de água e sais minerais desde a raiz até às folhas, assim como o armazenamento dos produtos elaborados. O cerne é a camada interior constituída por células mortas sem qualquer tipo de função circulatória e, por isso, é considerada de melhor qualidade. É sabido que esta camada vai progressivamente diminuindo desde a base até ao topo, ou seja, forma um cone interior no tronco das árvores.

Em toda a área transversal do lenho são visíveis os anéis de crescimento, cujo processo de formação não é uniforme ao longo de todo o ano, ocorrendo a paragem ou abrandamento durante o Inverno e a sua retoma ou aceleração durante a Primavera. As diferenças de velocidade referidas na formação

de novas células induzem o aparecimento de duas camadas por cada anel de crescimento, as quais são designadas por anel de Verão e de Primavera, respectivamente. No primeiro caso o lenho formado adquire reduzida espessura, tonalidade escura e densidade elevada, no segundo caso acontece precisamente o contrário.

Além da casca e do lenho com os respectivos anéis de crescimento, a medula também é facilmente diferenciável. Constitui o centro do tronco e é formada por um tecido macio em torno do qual se verifica o crescimento de novos ramos. Este elemento celular é ligado à periferia do tronco por raios medulares constituídos por células dispostas na direcção radial que servem de contraventamento às fibras longitudinais e que transportam transversalmente substâncias nutritivas.

2.5.2.2. Estrutura microscópica

Ao nível microscópico é possível observar um conjunto de células (tecidos) que têm uma função vital no crescimento e desenvolvimento da árvore, em particular o transporte de substâncias nutritivas e de água e também o seu próprio suporte. O Carvalho português, como folhosa que é, apresenta uma estrutura microscópica complexa, cuja constituição se evidencia na figura 2.9.

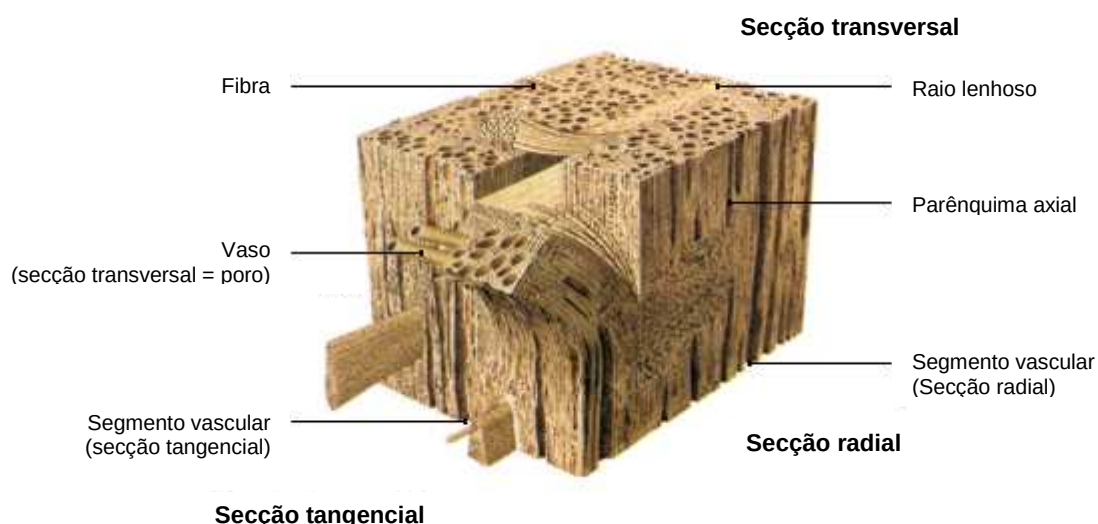


Fig. 2.9 - Estrutura microscópica do Carvalho português (adaptado de Rosa, 2007).

Na estrutura das folhosas há um predomínio de dois tipos fundamentais de elementos histológicos dispostos longitudinalmente: os vasos e as fibras, cujo tecido formado por ambos se designa por prosênquima. Os vasos participam no processo de alimentação da árvore, garantindo a condução da água absorvida pela raiz até às folhas sob a forma de seiva bruta. Funcionam como tubos abertos nas extremidades e são formados por células justapostas. As fibras, habitualmente designadas por traqueídeos, constituem células que apresentam extremidades afiladas e diâmetro variável e reduzido (Coutinho, 1999). São responsáveis pela sustentação da árvore e influenciam directamente as características mecânicas da madeira produzida, que são função da compactidade, textura e disposição do tecido fibroso.

Além dos vasos e das fibras, reconhecem-se ainda na estrutura microscópica das folhosas outro tipo de células, nomeadamente as que constituem o parênquima. Têm a função de distribuir e armazenar nutrientes, são de reduzida dimensão e evidenciam paredes pouco espessas. Podem dispor-se longitudinalmente, aparecendo dispersas no seio do prosênquima, ou transversalmente, fazendo parte da constituição dos raios medulares que podem atingir 5 cm de altura e 400 μm de largura (Carvalho, 1996). Estes garantem um travamento das fibras no sentido radial, melhorando a resistência mecânica nesta direcção.

A combinação das células atrás mencionadas define a anatomia da madeira e consequentemente as suas propriedades físicas e mecânicas. Para que se perceba a estrutura da sua parede celular é necessário observar a um nível sub-microscópico (aumentos na ordem das 3000 vezes). Este estudo foi desenvolvido por diversos investigadores com resultados ligeiramente diferentes, porém, de acordo com Carvalho (1996), o modelo comumente aceite é o proposto por Wardrop e Bland, cuja constituição se evidencia na figura 2.10.

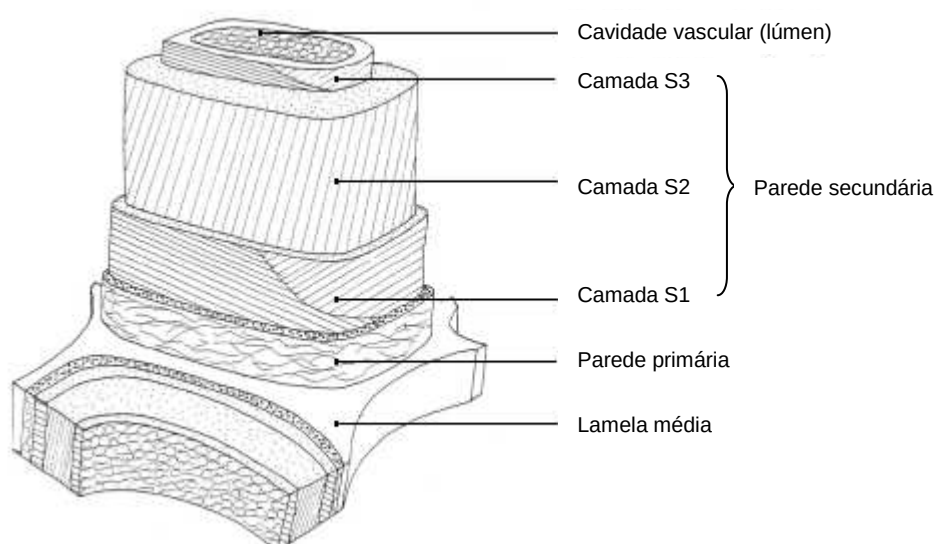


Fig. 2.10 - Estrutura da parede celular (adaptado de Martins, 2009).

De acordo com o modelo referido, a parede celular é constituída pela parede primária e pela parede secundária, ambas formadas essencialmente por elementos celulósicos, correntemente designados por microfibrilas. A primeira é responsável por separar a célula do meio que a envolve e pela sua protecção, enquanto a segunda se subdivide em três camadas que conferem resistência mecânica. A camada S_2 , cujas microfibrilas são paralelas e praticamente dispostas longitudinalmente, resiste aos esforços nessa direcção, sendo o seu travamento efectuado pelas camadas S_1 e S_3 . A sua maior capacidade resistente está associada não só ao factor referido, mas também à sua espessura uma vez que, conforme evidencia esquematicamente a figura 2.10, a camada S_2 é notoriamente a mais robusta, podendo atingir os 10 μm de espessura (Martins, 2009). A ligação entre as paredes de células adjacentes é efectuada pela lamela média que praticamente não contém compostos celulósicos na sua formação.

Uma vez descrita a constituição microscópica e sub-microscópica da madeira de Carvalho português, interessa agora realçar algumas das suas particularidades. Quando se efectua um corte transversal,

verifica-se que os vasos, designados por poros em corte, apresentam uma porosidade em anel, ou seja, os maiores diâmetros situam-se no início do anel de crescimento. Uma outra característica que a espécie em apreço evidencia, embora seja extensível a outros Carvalhos, diz respeito aos seus notáveis raios largos que conferem à madeira um desenho característico (Silva, 2007b). Os aspectos referidos, assim como toda a estrutura microscópica do Cerquinho, podem ser visualizados na figura 2.11.

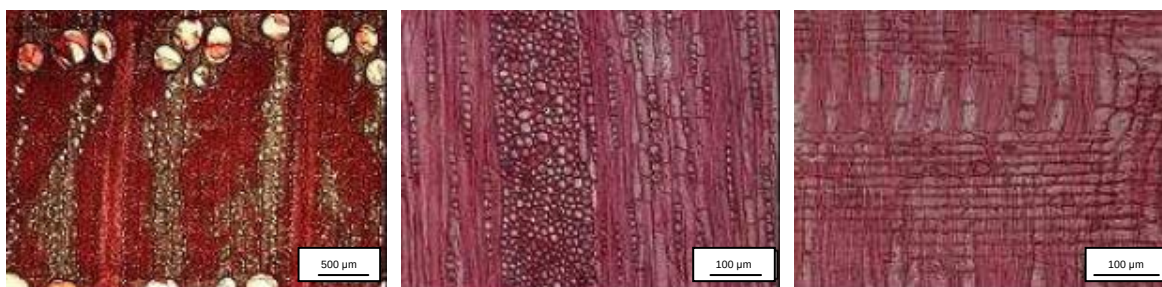


Fig. 2.11 - Estrutura microscópica do Carvalho português. Esquerda: corte transversal - porosidade em anel; Centro: corte tangencial – parênquima transversal; Direita: corte radial - fibras longitudinais (Sousa *et al.*, 2009b).

Complementarmente à descrição da função e disposição das células que constituem a estrutura do lenho do Carvalho português, estudos efectuados por Sousa *et al.* (2009b) sobre um total de 10 árvores de *Quercus faginea* permitiram verificar tendências e avaliar dimensões. Verificou-se que, radialmente, o comprimento e o diâmetro das fibras e dos vasos aumentavam da medula para a periferia, sendo os valores médios apresentados no quadro 2.2.

Quadro 2 2 - Dimensões das fibras e dos vasos que constituem o Carvalho português - Valores médios.
(Adaptado de Sousa *et al.*, 2009b).

Dimensões	Fibras	Vasos
Comprimento (µm)	1129	459
Diâmetro (µm)	19	205

2.5.2.3. Composição química

É sabido que os elementos químicos que constituem a madeira são o carbono (50%), o oxigénio (43%), o hidrogénio (6%), o azoto (1%) e as cinzas (silício, fósforo, potássio e cálcio) (Santos, 2007). Quando estes se atraem mutuamente originam moléculas electricamente neutras que por sua vez estabelecem ligações entre si formando polímeros, ou mais concretamente, a celulose, a hemicelulose e a lenhina. Estas substâncias compõem as células da madeira e têm a fotossíntese na sua génese, processo responsável pela transformação de matéria mineral em matéria orgânica.

A celulose está presente em cerca de 40 a 45 % da composição química da madeira (Ramos, 2009). É um polímero tridimensional que resulta da associação de moléculas de glucose (açúcar simples), assumindo a forma de cadeias unidas por pontes de hidrogénio e ligações químicas do tipo Van der Waals (Negrão e Faria, 2009). Em termos físicos, toma o aspecto de microfibrilas dispostas de forma paralela, garantindo elevada resistência mecânica, nomeadamente à tracção. Esta substância é responsável pelo carácter higroscópico da madeira na medida em que atrai quimicamente a água.

A hemicelulose compõe cerca de 15 a 35 % da composição química da madeira de folhosas (Ramos, 2009). Constitui um polímero tridimensional amorfo, com peso molecular reduzido, sendo formado por diferentes açúcares que unem as fibras da celulose e não influenciam as suas características mecânicas. O seu carácter aglutinante é responsável pela elasticidade da madeira.

Tal como a celulose e a hemicelulose, a lenhina também adquire uma grande importância na constituição da madeira. Nas folhosas esta substância atinge 17 a 25 % da sua composição química (Ramos, 2009). Constitui uma malha tridimensional complexa composta por moléculas fenólicas que, em simultâneo com a hemicelulose, aglutina a celulose e garante à madeira a integridade estrutural das fibras, nomeadamente no sentido transversal. Porém, esta substância não cristaliza, o que justifica a reduzida resistência da madeira na direcção referida.

Além dos componentes principais atrás mencionados, a madeira apresenta na sua constituição outras substâncias que podem atingir e até mesmo ultrapassar os 10 % da sua composição química (Ramos, 2009). Essas substâncias depositam-se essencialmente no cerne e são designadas por extractivos, ou seja, material que pode ser extraído pela água ou por dissolventes, tais como o álcool ou o éter. Embora em reduzida quantidade, podem influenciar algumas propriedades da madeira, tais como a dureza, a cor e até o próprio cheiro.

No que diz respeito à madeira de Carvalho português em particular, a informação existente sobre a sua composição química é bastante escassa. Ainda assim, um estudo experimental realizado por Sousa *et al* (2009a) sobre um conjunto de 10 árvores de *Quercus faginea* apresentou a seguinte composição química: cinzas 0,8 %, extractivos 14,5 % e lenhina 24,5 %. Além disso, permitiu averiguar ainda que a hemicelulose era fundamentalmente constituída por glucose e xilose. Em relação aos extractivos, cujo valor obtido foi elevado, saliente-se que o cerne acumulou praticamente o dobro do que o borne, tendo sido o etanol o solvente mais eficaz na sua extracção.

2.5.2.4. Síntese

Conforme se demonstrou, a estrutura anatómica da madeira é bastante complexa, sendo definida pela natureza e arquitectura dos seus elementos constitutivos. Apesar do Carvalho português apresentar características próprias, a formação do lenho assenta nos mesmos princípios e tem os mesmos elementos químicos na sua génese. Com o objectivo de sintetizar os aspectos atrás referidos, a figura 2.12 decompõe em vários níveis de observação a constituição da madeira.

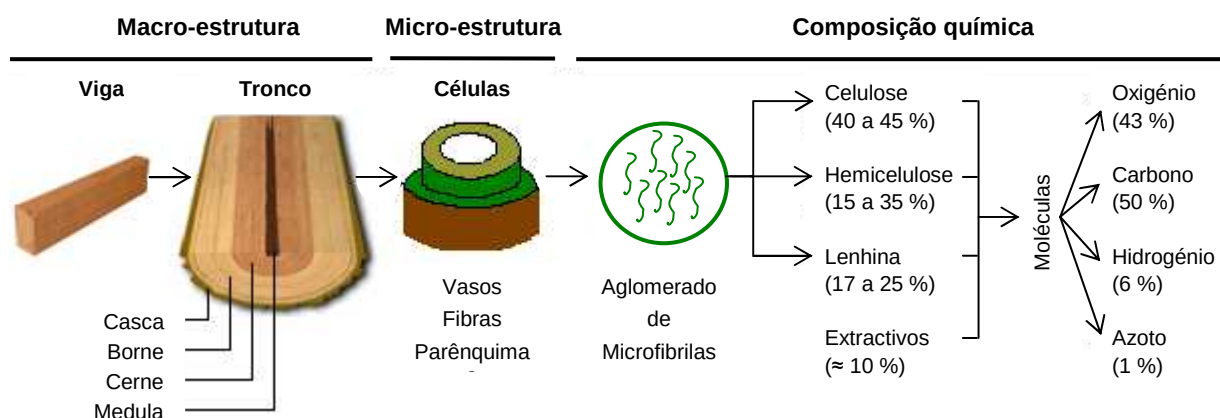


Fig. 2.12 - Decomposição da estrutura anatómica da madeira de Carvalho português.

No caso do Cerquinho, é sobretudo ao nível microscópico que este apresenta características particulares, nomeadamente a sua porosidade em anel, a largura dos seus raios lenhosos e as variações radiais das dimensões dos seus vasos e fibras. Porém, refira-se que estas singularidades do Carvalho português podem variar entre árvores e até mesmo dentro da mesma árvore, em virtude da idade e das suas condições de crescimento.

2.6. POTENCIALIDADES DA MADEIRA DE CARVALHO PORTUGUÊS

A qualidade da madeira de Carvalho português é reconhecida desde sempre, porém, só a partir dos séculos XV e XVI é que a sua utilização adquiriu maior dimensão (Silva, 2007b). Nessa altura, os Descobrimentos, conjunto de viagens e explorações marítimas realizadas pelos portugueses, impulsionaram a construção naval. A necessidade de desenvolver embarcações capazes de navegar com segurança em mar aberto conduziu à utilização massiva do Cerquinho na construção de naus e caravelas, sobretudo pela sua elevada densidade, dureza e resistência à imersão.

O contributo do Carvalho português na expansão portuguesa fez dele uma espécie florestal bastante estimada pelo povo. Porém, no início do século XX, as propriedades que outrora lhe deram sucesso já não eram tão apreciadas e, por isso, a utilização deste tipo de madeira não assumia a mesma importância, restringindo-se à construção de carros de bois e portas (Pedro, 1989). Esta ideia prevaleceu durante algumas décadas e em meados do mesmo século, a madeira de Carvalho português voltou a ganhar reputação. O bom aspecto estético, a receptividade a vernizes e a elevada resistência mecânica potencializou a sua utilização em soalhos, materiais compósitos e mobiliário (Carvalho, 1996), diminuindo assim a importação de espécies tropicais.

Actualmente, em virtude da experiência e do bom comportamento oferecido pela madeira de Carvalho português, verifica-se que a sua aplicação na construção civil é corrente em revestimentos de piso sob a forma de painéis (ver figura 2.13 - direita). Paralelamente, esta espécie florestal também tem sido utilizada como elemento estrutural em construções novas e sobretudo em reabilitações, nomeadamente sob a forma de vigas. Porém, neste caso, a vulnerabilidade do borne e do cerne aos agentes bióticos constitui um ponto fraco, induzindo a necessidade de inspecções periódicas que garantam a integridade da estrutura e a consequente segurança dos utentes.

Refira-se que, transversalmente a várias épocas, a madeira de Carvalho cerquinho também tem sido usada como fonte de combustível, em travessas de caminho de ferro (ver figura 2.13 - esquerda) e na produção de carvão para uso doméstico, principalmente a partir da Revolução Industrial do século XIX.



Fig. 2.13 - Aplicações da madeira de Carvalho português. Esquerda: travessas de caminhos-de-ferro (fonte: <http://oje.pt>); Direita: soalho (fonte: <http://flooring-manufacturers.com>).

Apesar das suas características evidenciarem um enorme potencial, não tem sido feita uma exploração sistemática e eficaz da madeira de Carvalho português. A sua utilização em produtos de maior valor aumentaria o rendimento dos proprietários, fomentaria o sector da transformação e estimularia a conservação e renovação dos povoamentos desta espécie florestal.

2.7. INTERESSE DA PRODUÇÃO DE CARVALHO PORTUGUÊS PARA ESTRUTURAS

Os Cercais são ecossistemas com uma enorme biodiversidade e, por isso, constituem verdadeiros “museus” naturais. Desde sempre assumiram grande importância para o Homem, sendo este o principal responsável pela sua exploração insustentável e irracional que conduziu à diminuição progressiva dos seus bosques.

Em termos ambientais, os povoamentos de Carvalho cerquinho são importantes por proporcionarem abrigo e alimento a diversas espécies, por amenizarem a acção dos agentes erosivos (vento e chuva) e por removerem poluentes da atmosfera. Ao nível social, os Cercais são imprescindíveis por potenciarem a caça e propiciarem um perfeito deleite visual pela forma e cor que conferem à paisagem, além de terem um enorme valor patrimonial e serem bastante admirados pelo povo.

Contudo, as vertentes ambiental e social sempre foram ultrapassadas pelo plano económico, facto que conduziu à desflorestação massiva de parte dos bosques constituídos por Carvalho português. As excelentes propriedades da sua madeira potenciaram o abate de árvores que integravam florestas autóctones e a reflorestação não tem sido uma prioridade por parte das entidades públicas, dado que se tratam de espécies de crescimento lento que só proporcionam retornos económicos a longo prazo (demoram aproximadamente 65 anos a poder ser considerados aptos para abate).

Perante o exposto, é necessário valorizar e incentivar a regeneração dos povoamentos de Carvalho português e definir políticas que permitam a sua exploração sustentada. As excelentes propriedades mecânicas justificam a sua aplicação em estruturas, nomeadamente no reforço/substituição de elementos estruturais existentes. Este poderá mesmo constituir o primeiro passo no sentido de reduzir a importação de madeiras para fins estruturais, ajudando a devolver a tradição perdida de produção e transformação ao nosso país.

Deste modo, a presente dissertação pretende dar um pequeno contributo na valorização do Cerquinho e das restantes espécies de Carvalho existentes em Portugal, nomeadamente o Carvalho negral e o Carvalho roble.

3

**AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE
RESISTENTE DE MADEIRA DE
CARVALHO PORTUGUÊS****3.1. INTRODUÇÃO**

A madeira é reconhecidamente um material que exhibe boas propriedades físicas e mecânicas, tornando apetecível o seu uso como elemento estrutural, no entanto, existem aspectos da sua constituição que sempre induziram receio e insegurança aos projectistas. De facto, sendo um material influenciado por diversos factores naturais, a madeira possui uma heterogeneidade mais ou menos vincada que se reflecte na sua capacidade resistente e que torna imprevisível o seu comportamento à solicitação.

Tendo em conta as especificidades referidas, o uso da madeira como material estrutural pressupõe um controlo eficaz da sua qualidade que permita a utilização de peças na construção de estruturas com total segurança para os utentes. O procedimento referido designa-se por classificação de madeira e consiste na atribuição de uma classe de qualidade a uma peça nova, à qual está associada uma determinada classe de resistência. No entanto, em Portugal, esta via de classificação não tem qualquer suporte normativo quando se trata de madeira de Carvalho e, por isso, a atribuição de valores resistentes está, desde logo, dificultada.

O processo de classificação visual apenas se aplica a madeira proveniente da serração. Porém, com o emergente mercado de reabilitação, é imperativo avaliar as estruturas de madeira existentes e tomar decisões que conduzam a uma intervenção objectiva e simultaneamente económica. Este é, sem dúvida, um trabalho árduo e complexo que carece de ferramentas que auxiliem a inspecção *in situ* e que conduza a um diagnóstico correcto e eficaz.

A avaliação da capacidade resistente de peças de madeira a usar em estruturas é um processo indispensável para que se garanta um determinado patamar de segurança na sua utilização. Os instrumentos usados no referido processo são diferentes, consoante se trate de madeira proveniente da serração, ou madeira integrada em estruturas existentes e, por isso, o presente capítulo é dividido em duas grandes partes: determinação das propriedades mecânicas de madeira nova e determinação das propriedades mecânicas de madeira antiga. A primeira descreve detalhadamente o processo de classificação visual com a devida referência à relação entre classes de qualidade e classes de resistência; a segunda detalha as técnicas/equipamentos não destrutivos correntemente usados, fazendo-se ainda algumas considerações acerca da fiabilidade do método de avaliação por inspecção visual, habitualmente designado por método *Amorim Faria*. Além de se descrever os instrumentos referidos, evidenciam-se as limitações de cada um, em particular, no que ao Carvalho diz respeito.

3.2. DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MADEIRA NOVA

3.2.1. CLASSES DE QUALIDADE

A madeira é proveniente da árvore, as quais são constituídas por raiz, caule e copa. As peças estruturais de madeira resultam de um aproveitamento da secção útil do caule ou tronco, evidenciando-se duas zonas bem contrastadas, o cerne e o borne, designadas por lenho (ver 2.5.2.1).

As características do lenho são condicionadas pela informação genética, pela acção dos factores climáticos nas fases de diferenciação celular e de crescimento da árvore e por factores ligados às características da própria árvore, como seja a maior ou menor proximidade da copa. A conjugação de todos estes factores induz uma elevada variabilidade na madeira no que diz respeito à sua organização interna e às suas propriedades físicas e mecânicas.

A todas estas causas de variabilidade apontadas é necessário acrescentar a eventual presença de defeitos, cuja ocorrência afecta principalmente as propriedades mecânicas. Os defeitos que assumem maior importância e que devem ser limitados em peças com fins estruturais são:

- O número e localização dos nós;
- O desvio do fio de madeira em relação ao eixo da peça;
- O descaio (“cantos truncados nas peças”);
- Os empenos;
- As fendas.

A origem biológica da madeira implica que não seja possível evitar a presença de defeitos em elementos de madeira maciça de dimensão estrutural. Deste modo, para que a madeira possa ser usada como um material estrutural fiável e seguro, é crucial definir um esquema de controlo da sua qualidade que garanta que os elementos aplicados em obra pelos construtores possuem características físicas e mecânicas conformes com as especificações de projecto.

O controlo da qualidade que permite limitar a variabilidade devida à presença de defeitos consiste no que genericamente se designa por classificação de madeiras. O procedimento referido permite definir os principais parâmetros definidores das características físicas e de resistência das peças estruturais de madeira, constituindo uma metodologia essencial de credenciação do processo construtivo.

Existem dois tipos de sistemas de classificação de madeira para estruturas, a classificação visual e a classificação mecânica/automática. Ambos os sistemas têm por objectivo a separação do material lenhoso em classes de qualidade, permitindo agrupar lotes de madeira mais homogénea e menos variável em termos de propriedades mecânicas.

A classificação visual requer a apreciação dos defeitos da madeira, das imperfeições geométricas de secção e das alterações que sejam visíveis a olho nu. A medição dos defeitos deverá ser de acordo com a norma EN 1310:1997, sendo os resultados obtidos confrontados com as normas de classificação visual correspondentes à espécie da madeira em vias de classificação. A classificação por máquina é um processo no qual a madeira é classificada por um sensor de uma máquina, onde são determinadas uma ou mais propriedades (normalmente o módulo de elasticidade), não sendo necessário recorrer à inspecção visual. Em ambos os casos é atribuída uma determinada classe à madeira em causa, à qual podem ser ligados valores característicos de resistência, rigidez e massa volúmica, entre outros.

As regras gerais de classificação de madeiras, visual ou por máquina, baseiam-se em quatro normas da série EN 14081, designadamente:

- EN 14081-1:2005 – Timber Structures – Strength graded structural timber with rectangular cross section – Part 1: General requirements;

- EN 14081-2:2010 – Timber Structures – Strength graded structural timber with rectangular cross section – Part 2: Machine grading; additional requirements for initial type testing;
- EN 14081-3:2005 – Timber Structures – Strength graded structural timber with rectangular cross section – Part 3: Machine grading; additional requirements for factory production control;
- EN 14081-4:2009 – Timber Structures – Strength graded structural timber with rectangular cross section – Part 4: Machine grading – Grading machine settings for machine controlled systems.

3.2.1.1. Classificação visual

De acordo com Machado (2003), a necessidade de implementar sistemas de classificação visual é já referida em 1800, como forma de alcançar algum controlo sobre a qualidade da madeira para estruturas. Para fazer face às necessidades de controlo referidas, em 1833, surge um primeiro sistema de classificação nos Estados Unidos da América, embora sem qualquer suporte experimental. Só em 1902 se inicia um estudo sistemático para associar valores de resistência mecânica às classes de qualidade derivadas da classificação visual.

Na Europa, só a partir de 1930 começaram a surgir as primeiras normas de classificação visual que associam classes de qualidade a propriedades mecânicas (Machado, 2003). A actividade iniciada, em 1989, ao nível do Comité Europeu de Normalização (CEN) desencadeou, entre outras acções, o processo de criação de normas europeias de classificação visual.

A classificação visual consiste na atribuição de uma classe para cada peça de madeira a partir da identificação visual de certas características de crescimento associadas à sua composição macroscópica e microscópica. Tendo em conta que algumas dessas características afectam negativamente o comportamento estrutural da peça, torna-se importante proceder à sua identificação e avaliação. No entanto, é na medição que surgem os maiores problemas.

Alguns países europeus desenvolveram normas nacionais de classificação visual da madeira, definindo classes de qualidade associadas à limitação de defeitos, com aplicação a um conjunto reduzido de espécies usadas em estruturas. O quadro 3.1 mostra, de forma resumida, algumas das normas referidas, as correspondentes classes de qualidade e espécies florestais aplicáveis.

Quadro 3.1 - Normas de classificação visual, classes de qualidade e espécies florestais.

Normas de classificação visual	Classes de qualidade	Espécie florestal
Alemanha: DIN 4074-1:2008	S7, S10, S13	Pinho, Espruce, Abeto e Cipreste
Espanha: UNE 56544:2003	ME-1, ME-2	Várias espécies de Pinho
França: NF B52-001:2007	ST-I, ST-II, ST-III	Carvalho
Países Nórdicos: INSTA 142:2009	T0, T1, T2, T3	Pinho, Espruce, Abeto e Cipreste
Portugal: NP 4305:1995	E, EE	Pinho bravo português

Como se pode constatar, existe uma grande diversidade de normas nacionais de classificação visual, o que torna difícil definir normas europeias que possam ser usadas em toda a Europa, atendendo à grande diversidade climática e florestas existentes. Para que se possam manter as classificações visuais

normalizadas em cada um dos países membros, é necessário que cada norma nacional cumpra os requisitos da EN 14081-1:2005. A cláusula 5.2 do documento referido remete para o seu Anexo A, onde são definidas exigências de desempenho gerais relacionadas com defeitos, a serem pormenorizadas nas normas específicas de classificação visual publicadas em cada país, e onde são indicadas limitações nos seguintes domínios:

- Características que reduzem a resistência – Nós, desvio do fio, densidade e fendas;
- Características geométricas – Descaio e empenos;
- Características biológicas – Madeira de reacção e outros critérios.

Adicionalmente às limitações supracitadas, indispensáveis na classificação visual, ficará ao critério de cada país acrescentar outros parâmetros que considerem relevantes. Os critérios de medição de defeitos devem cumprir as indicações presentes na norma EN 1310:1997.

As normas de classificação visual referidas no quadro 3.1 aplicam-se a madeira serrada, ou seja, madeira de borne ou cerne obtida directamente do tronco da árvore. Em Portugal, facilmente se constata que só existe norma de classificação visual para a madeira de Pinho bravo português, surgindo problemas quando as peças estruturais não são da espécie florestal referida, tal como acontece com o Carvalho português.

Além das normas nacionais de classificação visual já referenciadas, existem normas europeias igualmente aplicáveis a madeira serrada, tais como a EN 975-1:2009 e a EN 975-2:2004 para folhosas (Carvalho, Faia e Choupo) e a EN 1611-1:1999 para resinosas (Espruce, Abeto, Pinho e Pseudotsuga).

Naturalmente que a técnica de classificação visual, como qualquer outro método, apresenta vantagens e inconvenientes na sua aplicação, designadamente:

- Constitui uma técnica simples, de fácil compreensão e não necessita de perícia especial;
- Não exige a utilização de equipamentos caros e robustos. No entanto, como a observação é feita peça a peça deverá ser rápida para ser economicamente viável;
- Depende fortemente do factor humano e, por isso, carece de falta de objectividade e rigor;
- Subestima a capacidade resistente da madeira, constituindo uma garantia de segurança para o utilizador, mas para o produtor pode ser considerada uma perda económica significativa;
- A análise não é susceptível à presença de defeitos internos, o que pode influenciar muito a qualidade do processo.

Como é perceptível, existe um grande conjunto de normas de classificação visual de madeiras avulsas nos mais diversos países. Essas normas resultaram, em geral, de campanhas experimentais bastante exaustivas e representativas da realidade de cada espécie, considerando a essência da madeira e a sua origem geográfica. O desenvolvimento de normas aplicáveis a todas as espécies com interesse para usos estruturais reveste-se assim de uma enorme dificuldade e muito elevado custo.

3.2.1.2. Classificação por máquina

A classificação mecânica (*Machine Strength Rating*) começou a ser desenvolvida por volta de 1960 (Machado, 2003), sendo de uso corrente nos países onde a utilização da madeira como material estrutural é vulgar, nomeadamente nos países do Norte e Centro da Europa, Estados Unidos da América, Canadá, Austrália e Japão.

Este sistema de classificação subdivide-se em dois subsistemas usualmente designados por classificação controlada pelo produto (*output controlled*) e classificação controlada pela máquina (*machine controlled*).

No sistema controlado pelo produto, paralelamente ao processo automático de classificação, é necessário realizar ensaios mecânicos de controlo em peças escolhidas aleatoriamente dos lotes classificados, seguindo a norma EN 408:2003. Deste modo, 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. Os resultados dos referidos ensaios são usados, numa fase posterior, para afinar os controlos da máquina com vista à correcta classificação em cada classe.

O sistema controlado pela máquina apenas avalia o módulo de elasticidade na direcção do fio (E_0), dispensando, em princípio, a realização de testes reais de controlo. O processo referido é executado através da introdução de uma força constante, sendo medida a deformação do elemento que é confrontada com deformações limite, previamente definidas na máquina, para cada classe. A fiabilidade do processo é assegurada por um esforço contínuo de investigação por parte dos fabricantes, permitindo afinar continuamente a máquina para cada processo de classificação.

Basicamente, os sistemas de classificação mecânica consistem na determinação expedita da rigidez de uma peça de madeira e na sua correlação com a tensão de rotura à flexão, por isso, o sucesso deste tipo de classificação depende da espécie florestal em questão. A medição da rigidez é executada sobre vãos com 90 cm de comprimento, identificando o troço onde aquele parâmetro é menor e a rigidez média. A atribuição das classes de qualidade é feita em função do primeiro ou de ambos os valores obtidos.

Uma das máquinas mais comuns na Europa e que classifica a madeira segundo o princípio exposto anteriormente (impondo uma carga constante) é a *Computermatic*, cuja constituição se ilustra esquematicamente na figura 3.1.

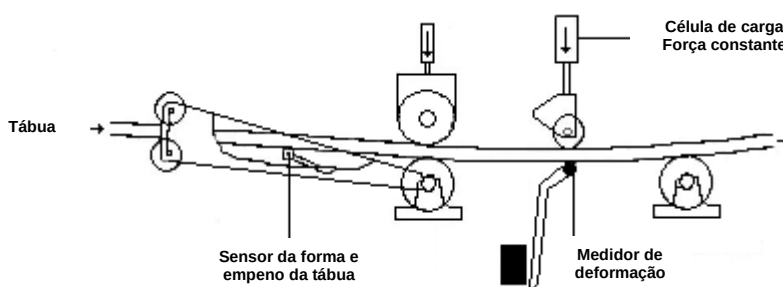


Fig. 3.1 - Pormenor da máquina de classificação mecânica: *Computermatic* (adaptado de Machado, 2003).

O funcionamento deste tipo de máquina é bastante simples. Inicialmente, a peça estrutural de madeira (tábua) é colocada na máquina e numa primeira fase são avaliadas as imperfeições geométricas existentes através de um sensor. De seguida, a peça é conduzida para o interior da máquina por intermédio de dois cilindros de alimentação, percorrendo toda a máquina até atingir o cilindro de carga. É neste momento que a célula de carga é activada, sujeitando a peça a uma deformação que é avaliada por um dispositivo de medição. Os deslocamentos provocados pela força são medidos em secções afastadas de 15 cm, sendo posteriormente enviados a um computador para calcular o módulo de elasticidade na direcção do fio. Por sua vez, o computador fornece informação à máquina que pinta um código de cores em cada secção analisada, imprimindo no final uma faixa correspondente ao módulo de elasticidade médio ($E_{0,mean}$), valor que está na base da atribuição da classe à peça estrutural de madeira.

É também usual encontrar nos países europeus outra máquina de classificação de madeiras designada por *Cook-Bolinder*. Ao contrário da *Computermatic*, esta máquina mede a força necessária para atingir

uma determinada deformação, ainda assim, o processo de atribuição da classe é em tudo semelhante. A figura 3.2 detalha esquematicamente a constituição da máquina referida.

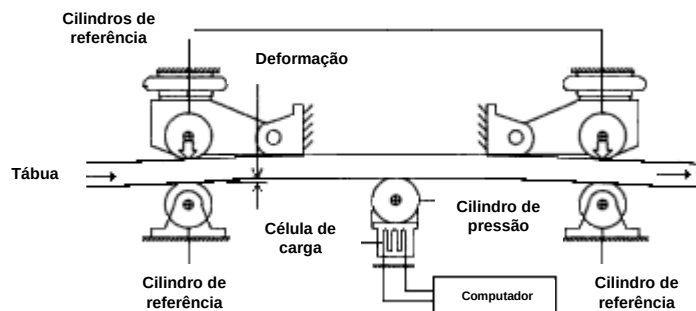


Fig. 3.2 - Pormenor da máquina de classificação mecânica: *Cook-Bolinder* (Machado, 2003).

Uma das grandes virtudes da classificação mecânica é a sua elevada produtividade. De acordo com a norma EN 14081-4:2009, é viável atingir velocidades de classificação na ordem dos 105 m/min para a *Computermatic* e dos 100 m/min para a *Cook-bolinder*.

Quando comparada com a classificação visual, a classificação por máquina é considerada mais precisa, uma vez que tem em conta os defeitos interiores não visíveis. Ainda assim, exige uma inspecção visual ligeira para detectar defeitos com uma importância considerável na resistência mecânica e que a máquina não consegue detectar. Deste modo, é necessário que os operadores tenham conhecimentos mínimos de classificação visual de modo a afastarem completamente peças com defeitos críticos que façam diminuir substancialmente a sua capacidade resistente.

3.2.2. CLASSES DE RESISTÊNCIA

O princípio das classes de resistência é o da atribuição das principais propriedades físicas e mecânicas a uma determinada população de madeiras para estruturas, tendo como objectivo facilitar a sua aplicação em trabalhos concretos.

Este processo apresenta vantagens para vários intervenientes na construção. Por um lado, os projectistas apenas têm que especificar a classe de resistência usada no dimensionamento da estrutura, permitindo a selecção das propriedades mecânicas do material a utilizar sem que para isso seja necessário ter conhecimento das madeiras disponíveis no mercado. Por outro lado, os empreiteiros e fiscalização passam a ser responsáveis por garantir que as madeiras aplicadas em obra sofreram um processo de classificação em classes de qualidade que validam a sua inclusão na classe de resistência especificada pelo projectista, validando ou não a sua utilização e desfazendo assim as suas responsabilidades por eventuais falhas estruturais que possam ocorrer.

A norma EN 338:2009 pretende tratar a madeira para estruturas exactamente da mesma forma que o betão e o aço, introduzindo um factor de segurança adicional que tem em conta a variabilidade das propriedades mecânicas da madeira no dimensionamento estrutural pelo Eurocódigo 5, principal regulamento de aplicação corrente em Portugal para esse efeito. A norma referida propõe um conjunto de classes de resistência aplicáveis a todas as madeiras, tanto para folhosas como para resinosas, às quais estão associados valores numéricos das principais propriedades físicas e mecânicas dos elementos de madeira com interesse estrutural.

As classes de resistência são definidas por uma sigla que identifica a espécie em causa, através de uma letra, e a resistência à flexão na direcção do fio (f_m), através de um valor numérico. Os quadros 3.2 e 3.3 evidenciam as classes de resistência definidas na norma EN 338:2009 para resinosas e folhosas, respectivamente. A separação das madeiras nestes dois grupos reside no facto de as folhosas, comparativamente às resinosas, poderem apresentar valores superiores de massa volúmica sem que a tal facto correspondam sempre valores superiores de resistência. O Choupo é a única folhosa que tem relações densidade – resistência similares às resinosas, sendo incluída nesse grupo.

Quadro 3.2 - Propriedades físicas e mecânicas de madeira para estruturas: resinosas e choupo (EN 338:2009).

		Classes de resistência											
		C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50
Propriedades resistentes em N/mm² (MPa)													
Flexão	$f_{m,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50
Tracção paralela ao fio	$f_{t,0,k}$	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30
Tracção perpendicular ao fio	$f_{t,90,k}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Compressão paralela ao fio	$f_{c,0,k}$	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	29
Compressão perpendicular ao fio	$f_{c,90,k}$	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2
Corte	$f_{v,k}$	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
Propriedades de rigidez em KN/mm² (GPa)													
Módulo de elasticidade paralelo ao fio (valor médio)	$E_{0,mean}$	7	8	9	9,5	10	11	11,5	12	13	14	15	16
Módulo de elasticidade paralelo ao fio (valor característico)	$E_{0,05}$	4,7	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	7,7	8,0	8,7	9,4	10,0	10,7
Módulo de elasticidade perpendicular ao fio (valor médio)	$E_{90,mean}$	0,23	0,27	0,30	0,32	0,33	0,37	0,38	0,40	0,43	0,47	0,50	0,53
Módulo de distorção (valor médio)	G_{mean}	0,44	0,50	0,56	0,59	0,63	0,69	0,72	0,75	0,81	0,88	0,94	1,00
Massa volúmica em kg/m³													
Valor característico	ρ_k	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460
Valor médio	ρ_{mean}	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550

Notas:

- Os valores indicados para a resistência à tracção, 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 do Anexo A da norma EN 338:2009;
- 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 %;
- Madeira das classes C45 e C50 podem não estar disponível de imediato.

Quadro 3.3 - Propriedades físicas e mecânicas de madeira para estruturas: folhosas (EN 338:2009).

		Classes de resistência							
		D18	D24	D30	D35	D40	D50	D60	D70
Propriedades resistentes em N/mm² (MPa)									
Flexão	$f_{m,k}$	18	24	30	35	40	50	60	70
Tracção paralela ao fio	$f_{t,0,k}$	11	14	18	21	24	30	36	42
Tracção perpendicular ao fio	$f_{t,90,k}$	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Compressão paralela ao fio	$f_{c,0,k}$	18	21	23	25	26	29	32	34
Compressão perpendicular ao fio	$f_{c,90,k}$	7,5	7,8	8,0	8,1	8,3	9,3	10,5	13,5
Corte	$f_{v,k}$	3,4	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,5	5,0
Propriedades de rigidez em KN/mm² (GPa)									
Módulo de elasticidade paralelo ao fio (valor médio)	$E_{0,mean}$	9,5	10	11	12	13	14	17	20
Módulo de elasticidade paralelo ao fio (valor característico)	$E_{0,05}$	8	8,5	9,2	10,1	10,9	11,8	14,3	16,8
Módulo de elasticidade perpendicular ao fio (valor médio)	$E_{90,mean}$	0,63	0,67	0,73	0,80	0,86	0,93	1,13	1,33
Módulo de distorção (valor médio)	G_{mean}	0,59	0,62	0,69	0,75	0,81	0,88	1,06	1,25
Massa volúmica em kg/m³									
Valor característico	ρ_k	475	485	530	540	550	620	700	900
Valor médio	ρ_{mean}	570	580	640	650	660	750	840	1080
Nota: aplicam-se as mesmas notas explicitadas no quadro 3.2.									

A letra C provém da palavra inglesa *Coniferous* que significa resinosas (ver quadro 3.2) e a letra D deriva da palavra *Deciduous* que quer dizer folhosas (ver quadro 3.3). Assim, para especificar a utilização de uma madeira maciça resinosa, o projectista não necessita de definir com rigor a espécie florestal, bastando-lhe referir que a madeira a utilizar será da classe C18 – madeira resinosa com um valor característico de resistência à flexão na direcção do fio de 18,0 MPa. Embora a norma EN 338:2009 considere doze classes de resistência para resinosas e oito para folhosas, o autor do projecto deverá ter em conta os produtos disponíveis no mercado onde se insere. Em Portugal, por exemplo, existem resinosas com classes de resistência compreendidas entre C18 e C24 e folhosas com classe de resistência D30.

Os valores da resistência à flexão na direcção do fio ($f_{m,k}$), do módulo de elasticidade ($E_{0,mean}$) e da massa volúmica (ρ_k) presentes nos quadros 3.2 e 3.3 foram obtidos através de campanhas exaustivas de ensaios. As restantes propriedades resultaram de relações numéricas obtidas por extrapolação estatística dos valores dos ensaios, ou seja, como resultado da utilização de relações numéricas simples

a partir dos valores obtidos experimentalmente. As relações referidas podem ser consultadas no Anexo A da norma EN 338:2009.

3.2.3. RELAÇÃO CLASSES DE QUALIDADE – CLASSES DE RESISTÊNCIA

Conforme já foi referido, a atribuição das classes de qualidade às peças estruturais de madeira pode ser executada visualmente ou por máquina. Na Europa, a correspondência entre classes de qualidade e classes de resistência é efectuada pela norma EN 1912:2004, que apresenta uma listagem relativamente longa de classes de resistência e correspondentes classes de qualidade. Segundo este documento normativo, a madeira classificada mecanicamente pode ser classificada directamente em classes de resistência e marcada em conformidade. A correspondência entre classes de qualidade e classes de resistência apenas se aplica a peças de madeira cuja classe de qualidade tenha sido atribuída visualmente de acordo com normas nacionais aceites pela norma europeia EN 1912:2004.

O controlo da qualidade das peças estruturais de madeira é assegurado pela atribuição de uma classe de qualidade à qual corresponde uma classe de resistência. Como se referiu, essa relação é efectuada pela norma EN 1912:2004, que relaciona a madeira de diversas espécies com os diversos sistemas nacionais de classificação em classes de qualidade e a correspondente classificação em classes de resistência. No quadro 3.4 são apresentadas, a título de exemplo, algumas dessas correspondências.

Quadro 3.4 - Relação entre classes de qualidade e classes de resistência (EN 1912:2004).

Designação comercial	Espécie de madeira	Classe de qualidade	Classe de resistência
Pinho bravo	<i>Pinus pinaster</i>	E (NP 4305)	C18
Casquinha	<i>Pinus silvestris</i>	SS (BS 4978)	C24
		GS (BS 4978)	C16
Espruce europeu	<i>Picea abies</i>	S13 (DIN 4074)	C30
		S10 (DIN 4074)	C24
		S7 (DIN 4074)	C16
Abeto branco	<i>Abies alba</i>	S13 (DIN 4074)	C30
		S10 (DIN 4074)	C24
		S7 (DIN 4074)	C16
Pseudotsuga	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	ST-II (B52-001)	C24
		ST-III (B52-001)	C18

Em Portugal, a única norma de classificação visual é a NP 4305:1995, aplicável à madeira de Pinho bravo (*Pinus pinaster*). Esta norma permite atribuir duas classes de qualidade, E e EE, a que correspondem as classes de resistência C18 e C35, respectivamente. Pela análise do quadro 3.4, verifica-se que a classe EE (Especial Estruturas) não é considerada, o que significa que não é reconhecida como C35 para efeitos de certificação.

No que diz respeito à madeira de Carvalho português, tal como foi referido em 3.2.1.1, não existe norma de classificação visual, pelo que não é possível atribuir uma classe de resistência. Esta espécie florestal não é considerada na norma EN 1912:2004, logo a atribuição das propriedades de resistência mecânica constitui um problema a resolver.

A variabilidade da resistência mecânica das peças estruturais de madeira é função da maior ou menor presença de defeitos, o que implica a atribuição de uma determinada classe de qualidade à qual corresponde uma classe de resistência. Verifica-se, por isso, que é da maior importância a correcta classificação das peças de madeira a serem usadas em estruturas.

Uma vez que a classificação visual da madeira é um processo que depende do factor humano, o que justifica a passagem negligente de peças com defeito, recomenda-se que todos os intervenientes no processo de recepção e montagem de estruturas de madeira tenham conhecimentos mínimos de classificação visual. Deste modo, garante-se a rejeição de peças defeituosas presentes em obra e assegura-se que os elementos de madeira aplicados têm resistência adequada à solicitação a que estarão expostos.

3.3. DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MADEIRA ANTIGA

As normas de classificação de madeira estrutural são aplicáveis a madeira nova proveniente da serração, o que significa que a classificação das peças de madeira em classes de qualidade, às quais correspondem classes de resistência, deve ser executada antes da sua montagem em obra. No entanto, frequentemente surge a necessidade de avaliar as propriedades mecânicas de peças estruturais que integram estruturas existentes, processo que se reveste de uma enorme complexidade e importância uma vez que está em causa a segurança dos utilizadores.

Para que se possa estimar a capacidade resistente das peças de madeira antiga é necessário efectuar uma inspecção que não implique a desmontagem da estrutura e respeite a integridade física do edifício, principalmente se este tiver um elevado valor patrimonial. Assim, é necessário recorrer a métodos não destrutivos, ou seja, métodos baseados em técnicas que, provocando ou não danos mecânicos nos elementos inspeccionados, não condicionam a sua capacidade resistente. Contudo, a aplicação dos métodos não destrutivos na avaliação das propriedades mecânicas de peças estruturais de madeira *in situ* requer determinadas condições, designadamente:

- Acessibilidade – Resulta da distância física e da existência de elementos construtivos que dificultam o contacto e visualização das peças de madeira a inspeccionar. A presença de andaimes/escadas garante o acesso a qualquer peça estrutural, sendo, por vezes, necessária a remoção de soalhos ou de estuques;
- Limpeza – Deve ser possível examinar a superfície externa dos elementos inspeccionados e a sua estrutura macroscópica, observando aspectos como a cor, os nós e as fendas. Em edifícios antigos é corrente que a madeira possua uma camada de sujidade com alguns milímetros de profundidade, que deve ser previamente limpa;
- Luminosidade – Uma boa observação visual das peças em análise só é possível se esta estiver iluminada. Caso a luz natural seja insuficiente, devem garantir-se meios que permitam a iluminação artificial dos elementos de madeira a inspeccionar.

A ausência de uma destas condições poderá limitar a qualidade da inspecção efectuada ou mesmo inviabilizá-la. Os métodos não destrutivos utilizados na determinação das propriedades mecânicas da madeira antiga são descritos nos pontos seguintes.

3.3.1. MÉTODO DE AVALIAÇÃO POR INSPECÇÃO VISUAL

As normas nacionais e europeias de classificação visual aplicam-se a madeira nova, com excepção da norma italiana UNI 11119:2004, elaborada para a avaliação de estruturas de madeira por observação *in situ*. Actualmente, verifica-se uma crescente necessidade de avaliar as características mecânicas de peças de madeira integradas em estruturas de edifícios existentes. Contudo, este processo não tem qualquer suporte normativo, facto que dificulta a inspecção e avaliação dos elementos estruturais em madeira antiga. Com o objectivo de colmatar essa lacuna, foi desenvolvido um método de classificação de elementos de madeira antiga, apresentado pela primeira vez na dissertação de Mestrado de Sónia Franco (2008), que inicialmente se designou por método *Amorim Faria*.

Pretende-se abordar sucintamente as bases de desenvolvimento do método referido e, posteriormente, avaliar os resultados obtidos em campanhas experimentais precedentes, interpretando a fiabilidade da sua aplicação. Para uma descrição detalhada das diferentes fases de evolução e das regras de medição de defeitos, o autor sugere a consulta do documento supracitado que esteve na sua origem.

O método desenvolvido baseou-se numa análise comparativa entre a norma italiana já referenciada e três normas de classificação visual aplicadas a diferentes espécies de madeira nova, designadamente:

- NP 4305:1995 – Aplicável a madeira de Pinho bravo português;
- UNE 56544:2003 – Aplicável a diversas espécies de Pinho espanhol;
- NF B52-001:1998 – Aplicável a várias espécies de resinosas e a uma espécie de folhosas, o Carvalho.

Uma vez que a o método proposto se aplica a estruturas de madeira *in situ*, a classificação visual orientou-se para a limitação dos defeitos observáveis, nomeadamente os nós, o descaio, as fendas de secagem e a inclinação do fio. Para as folhosas, foram ainda incluídos os ataques biológicos, uma vez que se tratam de espécies florestais consideradas mais susceptíveis a este tipo de defeito. Naturalmente que as normas base utilizadas divergem entre si na limitação dos referidos defeitos e, em alguns casos, no método de medição.

Após se ter estabelecido quais os defeitos a limitar, foi necessário definir quais os métodos de medição dos mesmos. Deste modo, estabeleceu-se que os defeitos presentes nas peças de madeira integradas em sistemas estruturais seriam medidos de acordo com as regras definidas na norma portuguesa NP 4305:1995, que são de uso generalizado noutras normas de classificação visual. No caso particular dos nós, devido à complexidade e subjectividade da aplicação da norma portuguesa referida, entendeu-se que seria mais simples fazer a sua medição de acordo com a norma EN 1310:1997.

As principais espécies florestais utilizadas em sistemas estruturais em Portugal são o Pinho (resinosa), o Carvalho e o Castanho (folhosas). Por este motivo, e ao contrário do que acontece na norma italiana que é aplicável a qualquer espécie, a proposta de classificação apresentada aplica-se unicamente às espécies referidas. Assim, foram realizadas duas análises comparativas, uma referente às normas aplicáveis a resinosas e a outra relativa às normas base que regem as folhosas. Do exercício referido resultaram dois quadros finais de limitação de defeitos, o quadro 3.5 para o Pinho e o quadro 3.6 simultaneamente para o Carvalho e o Castanho.

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

Defeitos	Categoria em obra – <i>Aprovada</i>	
Nós	Isolados	$\varnothing > 10 \text{ mm}$ e $\varnothing \leq \frac{1}{2} (b \text{ ou } h)$
	Agrupados	$\varnothing \leq \frac{3}{4} (b \text{ ou } h)$
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	$f \leq 3/5 (b \text{ ou } h)$
	Repasadas	$r \geq \max (f_1, f_2)$ e/ou $(f_1 + f_2) \leq 2/3 b$

Legenda (sugere-se a consulta simultânea do quadro 5.4):

b – Largura da peça	$\varnothing$ – Diâmetro dos nós	L_f – Comprimento das fendas
h – Altura da peça	d – Descaio	f – Profundidade das fendas
L – Comprimento da peça	i – Inclinação do fio	r – Distância entre fendas

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

Defeitos	Categoria em obra – <i>Aprovada</i>	
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	$r \geq \max (f_1, f_2)$ e/ou $(f_1 + f_2) \leq 2/3 b$
Alterações biológicas	Caruncho – Admissível (se activo)	
	Fungos podridão – Admissíveis (se inactivos)	
Massa volúmica a 12 % (kg/m^3)	Carvalho ≥ 640	Castanho ≥ 540

Legenda (sugere-se a consulta simultânea do quadro 5.4):

b – Largura da peça	$\varnothing$ – Diâmetro dos nós	L_f – Comprimento das fendas
h – Altura da peça	L_d – Comprimento do descaio	f – Profundidade das fendas
L – Comprimento da peça	i – Inclinação do fio	r – Distância entre fendas

Como se pode constatar pelos quadros apresentados, contrariamente ao que se verifica em algumas normas nacionais de países europeus, a classificação visual proposta para peças de madeira antiga assenta apenas em duas classes de qualidade. Quando são cumpridos os valores limite especificados no quadro correspondente à espécie avaliada, a peça de madeira é classificada como *aprovada*, caso contrário é *rejeitada*.

Refira-se que, à semelhança do que acontece na norma italiana UNI 11119:2004, considerou-se sensato atribuir apenas valores resistentes mínimos às peças de madeira inspeccionadas. As propriedades mecânicas consideradas foram:

- Módulo de elasticidade médio paralelo ao fio – $E_{0,mean}$;
- Resistência característica à flexão – $f_{m,k}$;
- Resistência característica à compressão paralela ao fio – $f_{c,0,k}$;
- Resistência característica à tracção paralela ao fio – $f_{t,0,k}$.

Os valores presentes no quadro 3.7 resultaram da aplicação de coeficientes redutores dos valores característicos apresentados na norma EN 338:2009 para as classes de resistência C18 (resinosas) e D30 (folhosas).

Quadro 3.7 - Método *Amorim Faria*: valores de cálculo atribuídos a madeira antiga por inspecção visual *in situ* (adaptado de Franco, 2008).

Valores de cálculo - Vigas aprovadas <i>in situ</i>			
Propriedades mecânicas		Pinho	Carvalho/Castanho
$E_{0,mean}$	Módulo de elasticidade médio	7,2 GPa	8,0 GPa
$f_{m,k}$	Resistência característica à flexão	14,4 MPa	21,0 MPa
$f_{c,0,k}$	Resistência característica à compressão paralela ao fio	16,2 MPa	20,7 MPa
$f_{t,0,k}$	Resistência característica à tracção paralela ao fio	8,8 MPa	14,4 MPa

A título de exemplo, se uma determinada peça de madeira de Carvalho for aprovada de acordo com o quadro 3.6, significa que lhes estão associados os valores mínimos constantes no quadro 3.7, na coluna referente à madeira de Carvalho.

O método descrito anteriormente foi aplicado por Sónia Franco (2008), Samuel Pereira (2009) e Albino Ramos (2010), com conclusões distintas. Foram realizadas campanhas experimentais sobre madeira antiga de Carvalho e Castanho para validar o método *Amorim Faria*, o que implicava que os resultados obtidos nos ensaios para as peças aprovadas fossem superiores ou iguais aos valores constantes no quadro 3.7, na coluna referente à madeira em apreço, para cada uma das propriedades. A comparação referida permitiu tirar conclusões acerca da aplicabilidade do método. O quadro 3.8 sintetiza os valores obtidos nas campanhas experimentais realizadas por cada um dos autores citados, as quais são detalhadas com rigor no capítulo 4 da presente dissertação.

Quadro 3.8 - Síntese dos valores obtidos nas campanhas experimentais realizadas por Sónia Franco (2008), Samuel Pereira (2009) e Albino Ramos (2010).

Ref.	Espécie florestal	N.º Peças	ρ_k (kg/m ³)	$f_{c,0,k}$ (MPa)	$f_{m,k}$ (MPa)	$E_{0,mean}$ (GPa)	$E_{c,0,mean}$ (GPa)	Valida
Sónia Franco (2008)								
1	Carvalho	8	598,8	21,0	23,0	-	-	Sim
2	Castanho	17	493,3	25,0	24,1	-	-	Sim
Samuel Pereira (2009)								
3	Castanho – Lote <i>D</i>	27	472,2	-	20,5	11,2	-	Não
4	Castanho – Lote <i>Dc</i>	28	547,5	28,8	-	-	9,0	Sim
5	Carvalho – Lote <i>Ac</i>	51	525,1	24,6	-	-	7,8	Sim
6	Carvalho – Lote <i>G</i>	52	673,5	-	22,8	9,9	-	Sim
Albino Ramos (2010)								
7	Castanho – Lote <i>D</i>	13	486,4	-	7,5	11,8	-	Não
8	Carvalho/Castanho	50	490,6	-	6,3	9,5	-	Não
9		33	490,1	-	13,2	9,8	-	Não
Método Amorim Faria		-	-	20,7	21,0	8,0	-	

Notas:

- As amostras dos ensaios referenciados com os números 5 e 6 são provenientes de incêndio;
- O tratamento estatístico dos ensaios referenciados com os números 7 e 9 apenas incidiram sobre amostras aprovadas, que neste caso foram 13 e 33, respectivamente. Nos restantes casos, os cálculos estatísticos recaíram sobre a totalidade das amostras (aprovadas e rejeitadas).

Pela análise do quadro 3.8, facilmente se conclui que a aplicação automática do método *Amorim Faria* não é fiável, tal como os resultados obtidos por Albino Ramos (2010) evidenciam, nomeadamente pela reduzida resistência à flexão. Repare-se, no entanto, que os valores do módulo de elasticidade ($E_{0,mean}$) obtidos superam em todos os ensaios o valor proposto pelo método referido. Assim, a sua utilização reveste-se de uma grande subjectividade que deverá ser ultrapassada com recurso a outras técnicas complementares que permitam averiguar as propriedades mecânicas da madeira antiga. A utilização de equipamentos não destrutivos constitui uma boa base de apoio à classificação visual *in situ*, ainda que a sua aplicação seja limitada a algumas espécies, como a seguir veremos.

3.3.2. UTILIZAÇÃO DE TÉCNICAS/EQUIPAMENTOS NÃO DESTRUTIVOS

As técnicas/equipamentos não destrutivos são utilizados para avaliar a qualidade, o estado de conservação e a resistência mecânica do material lenhoso que se encontra ainda na árvore, em forma de madeira serrada ou em elementos estruturais *in situ*. É nesta última aplicação que se enquadra o âmbito do presente subcapítulo.

O recurso às técnicas/equipamentos não destrutivos assume especial importância na avaliação das propriedades mecânicas de peças de madeira incorporadas em estruturas antigas, além de ajudar a validar os resultados obtidos por intermédio de métodos não destrutivos, como o exposto em 3.3.1.

O quadro 3.9 reúne as técnicas/equipamentos mais divulgados, pretendendo auxiliar o classificador na selecção da ferramenta apropriada ao objectivo da inspecção.

Quadro 3.9 - Escolha da técnica/equipamento não destrutivo em função do objectivo de inspecção (Botelho, 2006; Machado, 2003).

Objectivo de inspecção	Técnica/Equipamento										
	Não destrutivo										
	Acústica ^T	Dendrocronologia ^T	Georradar ^E	Humidímetro ^E	Metriguard ^E	Obs. Visual ^T	Pylodin ^E	Raios – X ^T	Resistógrafo ^E	Sylvatest ^E	
Identificar espécie de madeira						X ⁽¹⁾					
Identificar tipo de degradação biológica	X					X					
Datação das madeiras		X									
Detectar extensão da degradação biológica			X		X			X	X	X	
Detectar defeitos localizados			X		X			X	X	X	
Determinar teor de água			X ⁽²⁾	X							
Determinar massa volúmica								X	X		
Determinar módulo de elasticidade					X				X	X	
Determinar densidade superficial							X				
Classes de qualidade			X			X		X		X	
Legenda: T – Técnica; E – Equipamento; (1) – Análise de difícil execução; (2) – Avaliação de forma indirecta.											

Todos os equipamentos não destrutivos se baseiam em determinadas técnicas, como por exemplo os ultra-sons no caso do *Sylvatest*. O quadro 3.9 mistura técnicas com equipamentos pelo facto de não existirem aparelhos com especial destaque no campo da acústica ou da radiografia, como acontece com os ultra-sons.

Apesar de já se ter abordado em 3.3.1 a avaliação por inspecção visual, considerou-se pertinente a sua inclusão no quadro 3.9. Embora todas as técnicas/equipamentos expostos sejam importantes, apenas serão descritos com maior detalhe o *Sylvatest*, o *Resistógrafo* e o *Pilodyn*.

3.3.2.1. Sylvatest

O *Sylvatest* foi especialmente concebido para a inspecção de estruturas de madeira e baseia-se na técnica de ultra-sons que, resumidamente, consiste na estimação do módulo de elasticidade dinâmico

com base na relação entre a velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas (frequência entre 0,02 e 100 MHz) e as propriedades elásticas da madeira.

É sabido que a análise da propagação de ondas sonoras pode ser realizada por vários métodos. De acordo com Arriaga *et al.* (2002), o método de transmissão, pelo facto de usar ondas de baixa frequência, tem a capacidade de tornar os defeitos e, por isso, é o mais adequado a materiais heterogéneos como é o caso da madeira.

O *Sylvatest* opera com frequências na gama dos 20 KHz (Machado, 2003) e baseia-se na técnica referida, avaliando as alterações sofridas pelo feixe de ondas ultra-sónicas enquanto atravessam a madeira. A quebra da sua amplitude e o aumento do tempo de propagação evidenciam que a onda sofreu uma refacção, geralmente associada à presença de defeitos. A qualidade e as propriedades mecânicas da peça de madeira analisada são estabelecidas por comparação com os resultados de ensaios realizados sobre elementos livres de defeitos (Botelho, 2006). Tal como esquematiza a figura 3.3, este método necessita de duas sondas, uma emissora e outra receptora, colocadas em duas superfícies opostas e em contacto com a madeira por intermédio de um acoplante que pode ser água, gel ou massas lubrificantes.

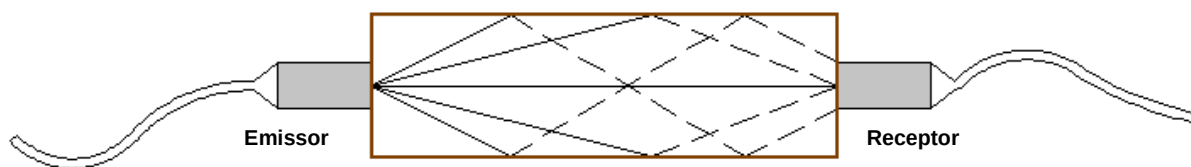


Fig. 3.3 - Método de transmissão em ultra-sons.

Além das duas sondas já referidas, o *Sylvatest* é constituído por dois aparelhos (ver figura 3.4) que geram a emissão de ondas ultra-sónicas e tratam a informação recolhida pelas sondas. Porém, refira-se que o ensaio pode ser realizado apenas com o uso do *Sylvatest duo*, sendo o procedimento seguido ligeiramente diferente.



Fig. 3.4 – Componentes do equipamento *Sylvatest* (adaptado de Candian, 2007).

Os ensaios realizados *in situ* impõem ao operador determinadas condições que limitam a sua execução, nomeadamente questões relacionadas com acessos às peças a inspeccionar. Assim,

consoante a posição das sondas, as medições podem ser directas, indirectas ou radiais, garantindo sempre que as medidas são realizadas na sua totalidade de acordo com a mesma metodologia.

Quando as sondas são colocadas de modo a que emissão e a recepção das ondas se encontrem no mesmo alinhamento longitudinal estamos perante uma medição directa, quando tal facto não acontece diz-se que a medição é indirecta. A figura 3.5 pretende ilustrar o referido.

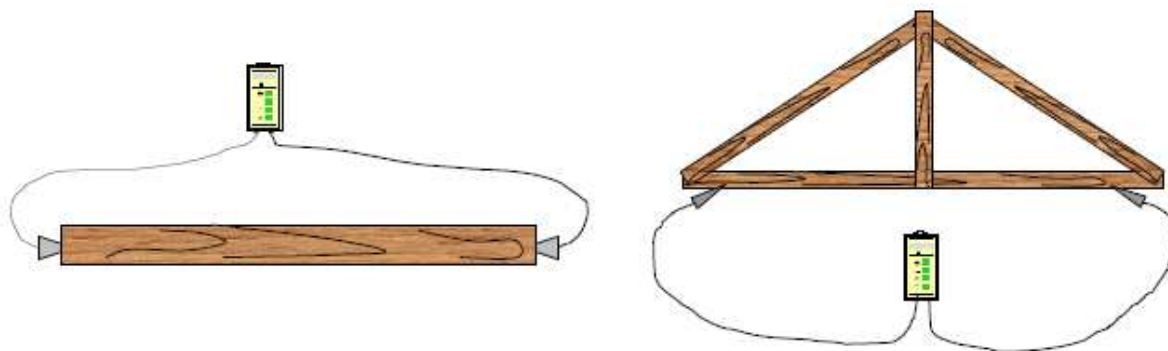


Fig. 3.5 - Tipos de medição. Esquerda: medição directa; Direita: medição indirecta. (Fonte: <http://sylvatest.com>).

As metodologias ilustradas podem ser aplicadas a peças de secção constante, como no caso da figura 3.5, ou a elementos com secção variável, sendo o *Sylvion* a fazer esta distinção. Além da medição directa e indirecta, existe a medição radial que se diferencia das outras pelo facto de emitir e receber ondas perpendicularmente à direcção do fio.

Antes da execução do ensaio é necessário definir a distância entre sondas, dado que será importante na determinação da velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas (v), cujo cálculo é feito automaticamente pelo aparelho. Uma vez obtido aquele valor, é calculado o módulo de elasticidade dinâmico ($E_{\text{Dinâmico}}$) e consequentemente o módulo de elasticidade estático ($E_{\text{Estático}}$), aplicando a seguinte expressão:

$$E_{\text{Estático}} = K \cdot E_{\text{Dinâmico}} = K \cdot v^2 \cdot \rho \quad (3.1)$$

em que, $E_{\text{Estático}}$ – Módulo de elasticidade estático (kg/m.s^2);

K – Constante de proporcionalidade que depende da espécie de madeira;

$E_{\text{Dinâmico}}$ – Módulo de elasticidade dinâmico (kg/m.s^2);

v – Velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas (m/s);

ρ – Massa volúmica (kg/m^3).

Pelo facto de não ser possível realizar ensaios destrutivos em estruturas de madeira existentes, a aplicação da expressão 3.1 é o único meio razoável e prático para calcular o módulo de elasticidade estático, também designado por módulo de elasticidade paralelo ao fio (E_0). Uma outra forma de determinar o valor desta propriedade mecânica é recorrer a ensaios de carga medindo a deformação provocada. No entanto, este método é descartado por implicar elevados encargos financeiros.

Embora se pense que seja de fácil aplicação, a utilização da expressão referida levanta uma nova problemática, ou seja, a determinação da massa volúmica (ρ) da espécie de madeira inspeccionada. Esta dificuldade pode ser ultrapassada por uma das seguintes vias:

- Utilizando, em simultâneo com o *Sylvatest*, o *Resistógrafo* que permite obter o valor da massa volúmica por intermédio de correlações existentes com coeficientes de determinação aceitáveis, cujas expressões constam no quadro 3.12;
- Identificando a espécie de madeira em causa e recorrendo a valores tabelados para a massa volúmica na bibliografia da especialidade (ver quadro 3.13).

Contudo, as vias supracitadas para determinar a massa volúmica revestem-se de grandes limitações. Por um lado, o uso simultâneo de dois equipamentos pressupõe um maior investimento em termos económicos e não é aplicável a espécies que não possuam correlações razoáveis, como é o caso do Carvalho português. Por outro lado, a identificação de espécies florestais é complexa e os valores tabelados para a massa volúmica são indicativos, não correspondendo à realidade em muitos casos. Uma outra forma, mais segura e fiável, de determinar a massa volúmica consiste em extrair por carotagem uma amostra do elemento inspeccionado para análise em laboratório. No entanto, este método não é o mais indicado em termos estéticos e principalmente em termos estruturais.

Para dar resposta às dificuldades evidenciadas na determinação do módulo de elasticidade estático e permitir a avaliação de outras propriedades mecânicas *in situ*, nomeadamente a resistência à flexão, alguns autores têm desenvolvido estudos experimentais propondo classes de resistência em função da velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas. Com o objectivo de classificar a madeira por meio de ultra-sons, Arriaga *et al.* (2002) propôs os intervalos de valores constantes no quadro 3.10.

Quadro 3.10 - Classificação de madeiras por meio de ultra-sons (Arriaga *et al.*, 2002).

	Velocidade (m/s)	Classe de resistência
V_{baixa}	4100 a 4600	C14 a C16
$V_{média}$	4600 a 5100	C18
V_{alta}	5100 a 5400	C22

Os intervalos propostos por Arriaga *et al.* (2002) são bastante seguros, o que é compreensível quando se pretende avaliar a capacidade resistente de estruturas de madeira *in situ* com a eventual presença de defeitos localizados, degradação biológica e teores de água diferenciais dos elementos ensaiados. Esta afirmação foi confirmada por Botelho (2006) que realizou ensaios experimentais em madeira antiga de *Pinus nigra Arn.* de Cuenca, Espanha. Assim, o método proposto pelo autor citado constitui uma ferramenta conservadora que, de forma aproximada e directa, permite avaliar *in situ* a capacidade resistente dos elementos estruturais, sem que para isso seja necessário identificar a espécie analisada.

Paralelamente ao método referido, existem expressões de correlação para algumas espécies que permitem correlacionar os valores obtidos por ensaios de ultra-sons ($E_{Dinâmico}$ ou simplesmente v) e algumas propriedades mecânicas de elementos estruturais de madeira. O quadro 3.11 evidencia as correlações referidas, algumas das quais continuam a depender do conhecimento da massa volúmica de forma indirecta.

Quadro 3.11 - Correlações conhecidas entre o valor obtido por meio de ultra-sons ($E_{Dinâmico}$) e as propriedades mecânicas de elementos estruturais de madeira (Botelho, 2006).

Expressão	R^2	Espécie	N.º Peças	Autor
$E_{c,0} = 0,004 \times E_{Dinâmico} + 3,0$	70,0%	<i>Castanea sativa</i>	47	Feio et al. (2005)
$f_{c,0} = 0,019 \times E_{Dinâmico} + 18,2$	67,0%	<i>Mill. (novo)</i>		
$E_{c,0} = 0,005 \times E_{Dinâmico} + 1,7$	65,0%	<i>Castanea sativa</i>		
$f_{c,0} = 0,043 \times E_{Dinâmico} - 17,1$	62,0%	<i>Mill. (antigo)</i>		
$E_{Dinâmico} = 1183,87 + 1,14502 \times E_{Estático}$	68,0%	<i>Pinus nigra Arn.</i>	325	Díez et al. (2003)
$E_{Estático} = (-23,0676 + 0,0254737 \times v)^2$	53,0%	<i>Pinus sylvestris</i>	735	
$E_{Estático} = -11303,39 + 0,000500587 \times v^2$	51,0%	<i>Pinus nigra Arn.</i>	735	
$E_{Estático} = 1415,2 + 0,55 \times E_{Dinâmico}$	17,0%	<i>Pinus pinaster Ait.</i>	550	Machado (2003)
$E_{Dinâmico} = 2430,73 + 1,09086 \times E_{Estático}$	78,1%	<i>Pinus radiata</i>	300	Botelho (2006)

Além das limitações já referidas, a utilização desta metodologia como meio para determinar as propriedades mecânicas de peças estruturais de madeira implica que exista algum estudo prévio, ou seja, requer a existência de expressões de correlação para a espécie de madeira em questão. Analisando o quadro 3.11, facilmente se verifica que as espécies para as quais existem correlações são reduzidas, facto que condiciona a utilização do *Sylvatest*. A aplicação deste método à madeira de Carvalho português não tem assim qualquer tipo de fundamento.

3.3.2.2. Resistógrafo

Desde o ano de 1985 (Dias, 2008), quando foi fabricado na Alemanha, o *Resistógrafo* tem sido usado com a finalidade de inspeccionar a degradação biológica das árvores, postes, pontes e estruturas de madeira de edifícios antigos. Consiste num aparelho que relaciona a energia dispendida na penetração de uma agulha com a resistência da madeira à perfuração, permitindo detectar a eventual existência de defeitos internos, as variações de densidade ao longo dos elementos de madeira e estimar a massa volúmica. As penetrações referidas são quase imperceptíveis e não têm qualquer influência na resistência mecânica da peça inspeccionada, facto que torna a sua utilização apetecível, principalmente para estruturas com elevado valor patrimonial.

É constituído por um tubo telescópico que contém uma agulha flexível em tungsténio e dois motores eléctricos internos: um acciona o avanço da agulha a velocidade constante e o outro garante a sua rotação permanente. Por sua vez, o tubo telescópico é ligado a um dispositivo de recolha e armazenamento de dados que inclui as baterias e a impressora, donde sai o registo gráfico do ensaio em papel. Existe também a possibilidade da ligação a um computador para transferência automática dos gráficos. A figura 3.6 evidencia o equipamento em apreço e esquematiza ambas as situações referidas em simultâneo.

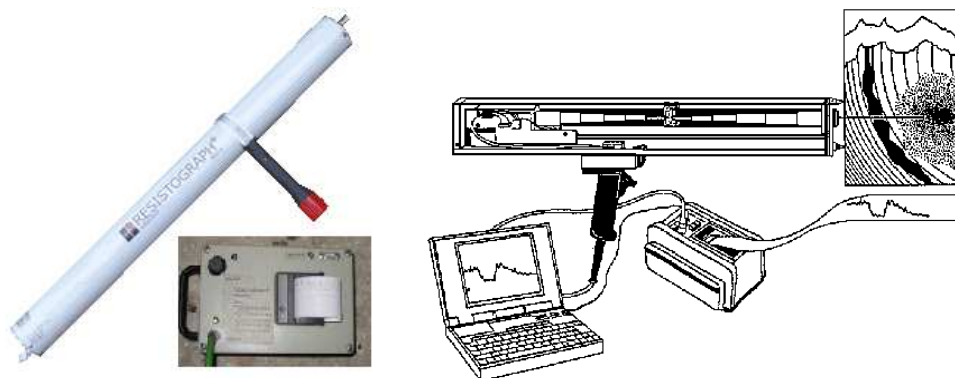


Fig. 3.6 – Resistógrafo. Esquerda: equipamento (adaptado de Dias, 2008); Direita: funcionamento e sistema de aquisição de dados (fonte: <http://bam.de>).

O comprimento da agulha depende do tipo de *Resistógrafo* podendo atingir, no máximo, 950 mm. Tem 1,5 mm de diâmetro em todo seu comprimento, à excepção da ponta onde se verifica um alargamento até 3 mm, tal como mostra a figura 3.7. A forma da ponta da agulha permite reduzir o efeito do atrito na perfuração, não interferindo no esforço dos motores do aparelho.



Fig. 3.7 – Agulha de perfuração do *Resistógrafo* (fonte: <http://imldistribution.com>).

A resistência oferecida pela madeira à penetração da agulha relaciona-se com a sua densidade, sendo medida de acordo com o consumo de potência exigida ao motor durante o ensaio. Uma perfuração ao longo da secção radial permite distinguir as diferenças de densidade entre as duas camadas que constituem cada anel de crescimento (anéis de Verão e Primavera), assim como identificar a existência de eventuais vazios. No entanto, pelo facto da agulha perfurar a peça de madeira no sentido transversal, o *Resistógrafo* também pode efectuar medições tangenciais. Na inspecção de estruturas em serviço, geralmente, não é possível observar a secção transversal, pelo que não se sabe qual o tipo de medição realizada, sendo considerado um valor médio. Segundo Botelho (2006), não existe uma diferença relevante entre os valores radiais e tangenciais fornecidos pelo *Resistógrafo*.

O resultado deste tipo de ensaio é um perfil de fácil interpretação onde ao eixo das abcissas (xx) corresponde a profundidade de penetração e ao eixo das ordenadas (yy) corresponde a resistência à penetração oferecida pela madeira. Na figura 3.8 pode-se observar um exemplo de perfil resistográfico.

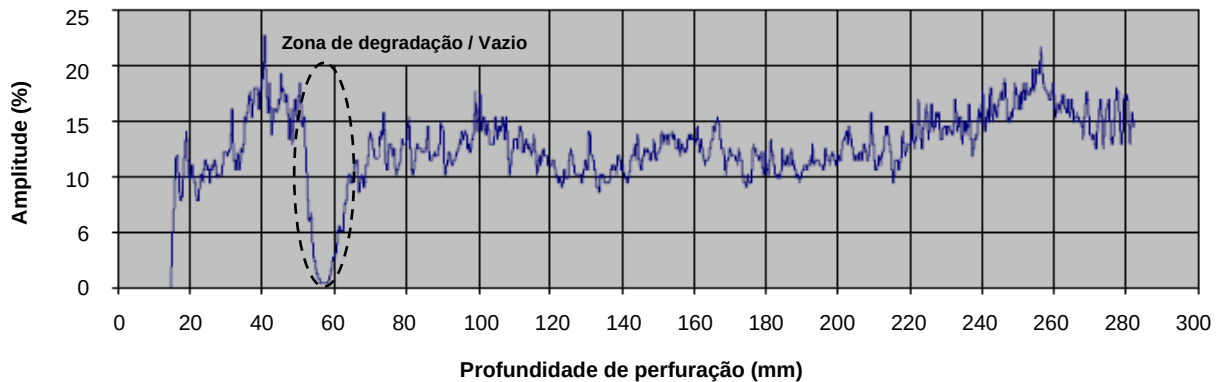


Fig. 3.8 - Exemplo de perfil resistográfico de uma viga de madeira (adaptado de Botelho, 2006).

A análise da figura 3.8 permite concluir que a viga apresenta uma zona com uma degradação acentuada ou um vazio, à qual corresponde uma densidade mínima traduzida por valores reduzidos de resistência. Por outro lado, os picos do gráfico correspondem a zonas pontuais onde a densidade é mais elevada. Contudo, a informação fornecida pelo perfil resistográfico é qualitativa, sendo necessário efectuar um tratamento estatístico dos dados recolhidos para obter valores concretos de propriedades mecânicas das peças sujeitas a inspecção.

Como foi referido, o dispositivo de recolha e armazenamento de dados pode ser ligado directamente a um computador, transferindo automaticamente os gráficos que resultam dos ensaios. Este facto facilita a determinação do valor médio, designado por Valor de Resistógrafo ($VR_{médio}$), que pode ser correlacionado com as propriedades mecânicas por intermédio de expressões propostas por diversos autores. Na figura 3.9 é possível visualizar a sua representação gráfica.

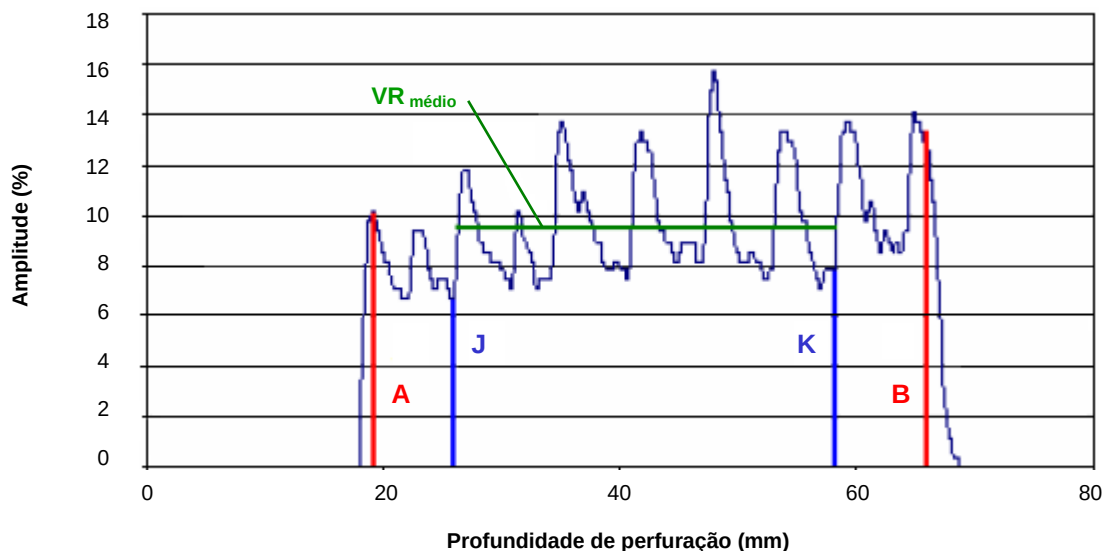


Fig. 3.9 - Representação gráfica do $VR_{médio}$ (adaptado de Botelho, 2006).

Para um melhor acompanhamento das fases do tratamento estatístico que a seguir se enumera, sugere-se a visualização atenta da figura 3.9. Os passos a ter em conta no cálculo do $VR_{médio}$ são os seguintes:

1. Diminuir o intervalo de análise entre as abcissas correspondentes ao primeiro e último picos do gráfico, garantindo-se os verdadeiros valores representativos do valor global de resistência (pontos A e B);
2. Delimitar o intervalo compreendido entre J e K, tendo em conta que os segmentos AJ e KB são iguais a 1/6 de AB (AJ=KB=1/6.AB). Refira-se que se estivermos perante peças atacadas biologicamente, em vez de se eliminarem os sextos iniciais e finais, deverá considerar-se apenas a zona sã, interpretando-a como secção útil;
3. Calcular o valor médio ($VR_{médio}$) compreendido entre J e K, de acordo com a seguinte expressão:

$$VR_{médio} = \frac{0,04 \times \sum_{i=1}^N Ri}{K - J} \quad (3.2)$$

em que Ri corresponde à resistência à perfuração para cada um dos pontos do gráfico, medida com afastamentos de 0,04 mm.

Obtido o valor do $VR_{médio}$ da forma indicada, para conhecer valores das propriedades mecânicas é necessário utilizar expressões de correlação desenvolvidas para a espécie em causa. Como é sabido, existe uma enorme variedade de espécies florestais o que implica que existam correlações entre o valor referido e as propriedades de cada uma, apuradas por ensaios destrutivos. O quadro 3.12 evidencia algumas expressões de correlação propostas por diferentes autores.

Quadro 3.12 - Expressões de correlação entre o $VR_{médio}$ e algumas das principais propriedades mecânicas de elementos de madeira (Botelho, 2006).

Expressão	R^2	Espécie	N.º Peças	Autor
$f_m = -41,62 + 8,86 \times VR_{médio}$	26,6 %	<i>Pinus nigra</i>	122	Capuz (2003)
$VR_{médio} = 2,07 \times \rho - 1005,2$	71,0 %	<i>Castanea sativa</i> Mill (novo)	47	Feio et al. (2005)
$VR_{médio} = 13,94 \times E_{c,0} + 216,2$	60,0 %			
$VR_{médio} = 2,6 \times f_{c,0} + 212,1$	59,0 %			
$VR_{médio} = 1,59 \times \rho - 666,9$	68,0 %			
$VR_{médio} = 16,82 \times E_{c,0} + 126,0$	64,0 %	<i>Castanea sativa</i> Mill (antigo)	47	
$VR_{médio} = 1,81 \times f_{c,0} - 188,2$	64,0 %			
$\rho^2 = 1242214,93 \times VR_{médio}^{0,1} - 2020664,3$	91,0 %	23 espécies chinesas	23	Pin-Hui Tsai et al. (2004)
$E_0 = 28122,195 - 2206,53 \times VR_{médio}^{0,5} + 0,101 \times \rho^2$	80,6 %			
$E_0 = -18319,6 + 11087,7 \times VR_{médio}^{0,1} + 0,0228 \times \rho^2$	75,0 %			
$E_0 = -11245,5 + 6962,5 \times VR_{médio}^{0,1} + 0,0159 \times \rho^2$	86,6 %	26 espécies chinesas		
$\rho = 166,51 + 37,076 \times VR_{médio}$	70,1 %	<i>Pinus radiata</i>	300	Botelho (2006)

Os estudos experimentais de onde resultaram as expressões do quadro 3.12 apenas se aplicam a um número limitado de espécies e nem todas as correlações entre os resultados obtidos e as características da madeira são aceitáveis, o que constitui uma grande limitação ao uso do *Resistógrafo*. Botelho (2006) chegou a coeficientes de determinação bastante baixos entre $VR_{médio}$ e f_m ($R^2 = 23,6 \%$) e entre $VR_{médio}$ e E_0 ($R^2 = 46,8 \%$) para a espécie de *Pinus radiata*, permitindo constatar que o uso isolado do *Resistógrafo* para a obtenção daquelas propriedades mecânicas é pouco prudente para esta espécie. Note-se que, de acordo com o quadro 3.12, não existem expressões fiáveis para nenhuma espécie no que diz respeito à resistência à flexão.

Na ausência de expressões de correlação fiáveis para a espécie inspeccionada, recomenda-se que a utilização do *Resistógrafo* na determinação de propriedades mecânicas da madeira deve ser complementada por outras técnicas não destrutivas, como o *Georradar* e os raios-X, dado que os resultados obtidos com aquele equipamento são pouco sensíveis à existência de certos defeitos localizados, como por exemplo nós.

3.3.2.3. Pilodyn

O *Pilodyn* foi desenvolvido na Suíça com a finalidade de avaliar a degradação superficial em postes de apoio a telecomunicações, no entanto, a utilização prática deste equipamento permitiu a expansão da sua aplicação a vários domínios, designadamente:

- Na determinação prévia do aparecimento de doenças através de medições periódicas;
- No estabelecimento de classes e categorias de resistência entre diversas espécies florestais, auxiliando a indústria da madeira na classificação de troncos segundo classes, de acordo com diferentes densidades estimadas pelo aparelho;
- Na definição de parâmetros de qualidade relativamente à densidade da madeira.

O princípio de funcionamento do *Pilodyn* caracteriza-se pela penetração na superfície da madeira de uma agulha metálica com 2,65 mm de diâmetro, registando-se a profundidade de perfuração. O registo é efectuado enquanto o equipamento ainda se encontra pressionado contra as peças e é lido em milímetros (0 - 40 mm, sem decimais) na escala do instrumento. O movimento da agulha tem origem na libertação de uma mola que transforma a energia potencial elástica numa energia de impacto, cujo valor é função do modelo utilizado. Existem vários modelos comercializados e que podem ser usados em inspecções, tais como: *Pilodyn 6J*, *Pilodyn 12J*, *Pilodyn 18J* e o *Pilodyn 4JR* (com tiro repetido).

Conforme esquematiza a figura 3.10, os dois pernos de metal devem encostar na superfície do elemento a inspeccionar e os disparos devem ser realizados num ângulo de 90° entre a direcção de penetração e a tangente ao crescimento dos anéis anuais. Como já se referiu, a profundidade máxima de penetração é de 40 mm, logo os resultados traduzem as características superficiais e, por isso, não permitem detectar uma eventual degradação interior.

O *Pilodyn* permite determinar a massa volúmica a partir de correlações com a dureza superficial, ou seja, com a resistência à penetração da madeira medida através da leitura da profundidade alcançada pela agulha do aparelho. Segundo diversos autores, a medição poderá ser influenciada pelo teor de água da madeira, por outras palavras, quanto maior for aquele parâmetro físico maior será a penetração. Este fenómeno é explicado pelo ligeiro enfraquecimento da estrutura celular da madeira na presença de água, justificando a necessidade de avaliar correctamente o teor em água na altura das leituras.

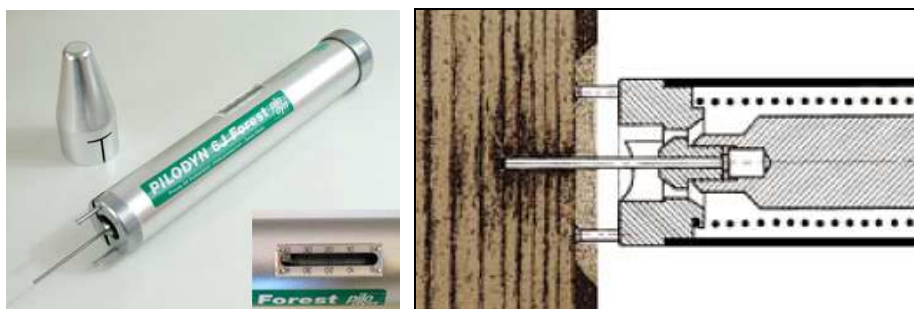


Fig. 3.10 – *Pilodyn*. Esquerda: equipamento (fonte: <http://gisup.com>); Direita: funcionamento (Dias, 2008).

De acordo com Dias (2008), a resistência à penetração superficial avaliada com o *Pilodyn* apenas se correlaciona aceitavelmente com a massa volúmica, atingindo nestes casos coeficientes de determinação superiores a 74,0 %. Pelo contrário, as correlações com propriedades mecânicas são baixas, não aconselhando a utilização deste equipamento para esse fim. Assim, facilmente se constata que o *Pilodyn* apenas tem aplicação na determinação do parâmetro físico citado, o que não significa que se obtenham correlações aceitáveis para todas as espécies, conforme concluiu Louzada *et al.* (2005) para a madeira de *Eucalyptus nitens*. As limitações ao uso do *Pilodyn* são motivadas não só pela ausência de correlações aplicáveis a determinado tipo de espécies, como também pelo uso de técnicas convencionais na caracterização superficial das peça de madeira, nomeadamente o martelo.

3.3.2.4. Outras técnicas/equipamentos não destrutivos

Adicionalmente às técnicas/equipamentos anteriormente descritos de forma detalhada, existem outros que também são usados correntemente e que são seleccionados em função do objectivo da inspecção (ver quadro 3.9). A sua abordagem é feita no presente ponto de uma forma breve e sucinta.

Se o objectivo da inspecção for avaliar o teor de humidade e detectar heterogeneidades, como a extensão da degradação biológica ou a presença de defeitos, pode utilizar-se o *Georradar*, aparelho que analisa a propagação de ondas electromagnéticas (100 MHz a 1,5 GHz). Estas ondas são emitidas por impulsos de curta duração que, em função das variações do meio, sofrem fenómenos de reflexão, refacção e difracção, sendo posteriormente captadas por receptores (antenas). O resultado da sua aplicação é um radargrama que, em termos genéricos, consiste num perfil que traduz o percurso das ondas e que é influenciado pela temperatura, densidade e, sobretudo, pelo teor em água, parâmetro ao qual está normalmente associada a degradação. A figura 3.11 evidencia o equipamento referido e um exemplo de radargrama de uma viga de madeira.

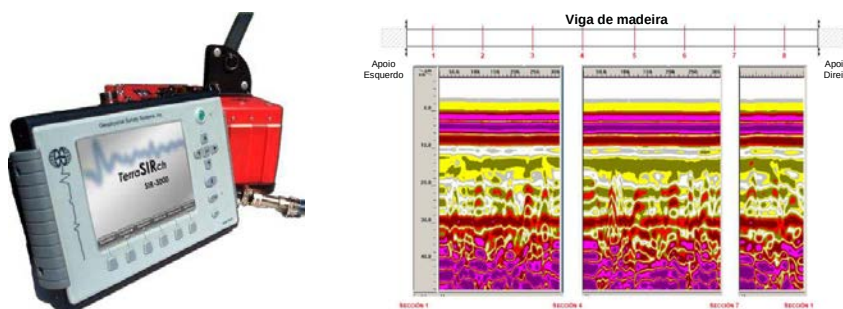


Fig. 3.11 - *Georradar*. Esquerda: equipamento (fonte: <http://cflhd.gov>); Direita: radargrama (Botelho, 2009).

Além do *Georadar*, naturalmente que existem outras ferramentas que permitem localizar determinado tipo de heterogeneidades como é o caso do *Metriguard*. Este equipamento baseia-se no método das vibrações induzidas, podendo constituir um bom indicador das propriedades mecânicas de uma determinada peça estrutural. Consiste num aparelho que mede a velocidade de propagação das ondas de choque e, tendo presente que aquele parâmetro é maior em madeira livre de defeitos, é possível detectar variações de densidade ao longo da peça inspeccionada. Na figura 3.12 é possível visualizar o equipamento referido e o esquema de funcionamento do ensaio.



Fig. 3.12 – *Metriguard*. Esquerda: equipamento; Direita: funcionamento. (Fonte: <http://metriguard.com>).

Ao contrário dos equipamentos supracitados que se baseiam na medição de ondas, existem outras técnicas que permitem determinar heterogeneidades, como é o caso dos raios-X. Trata-se de um método que se baseia na transmissão de energia radiográfica através do material a inspeccionar, resultando um esquema bidimensional de variação de densidade do elemento atravessado (ver figura 3.13). Permite detectar vazios, defeitos e degradações do elemento inspeccionado, no entanto, a perigosidade das radiações e o seu elevado custo tem contribuído para que esta técnica tenha vindo a ser substituída pela utilização de raios gama cuja aplicação, além de não ser tão prejudicial e ser mais económica, fornece uma imagem em tempo real.



Fig. 3.13 - Raios-X. Esquerda: equipamentos para aplicação da técnica (Botelho, 2006); Direita: funcionamento e resultado (fonte: <http://coste53.net>).

Além das técnicas/equipamentos referidos, existem outros que permitem auxiliar a inspecção e fornecer dados importantes como é o caso de aparelhos que detectam insectos xilófagos por meios acústicos e o método da dendrocronologia. Os primeiros captam e amplificam as ondas sonoras produzidas pelos agentes bióticos durante a sua actividade e, dependendo do volume do sinal sonoro, facilmente se estima a intensidade do ataque e o tipo de ser vivo responsável pela degradação. O

segundo consiste num método que permite apurar com grande precisão o tempo de vida da peça inspeccionada através da observação dos anéis de crescimento (ver figura 3.14) e do conhecimento da espécie em causa. No entanto, as impossibilidades de observação dos topos das peças em serviço obriga à extracção de carotes de pequena dimensão.

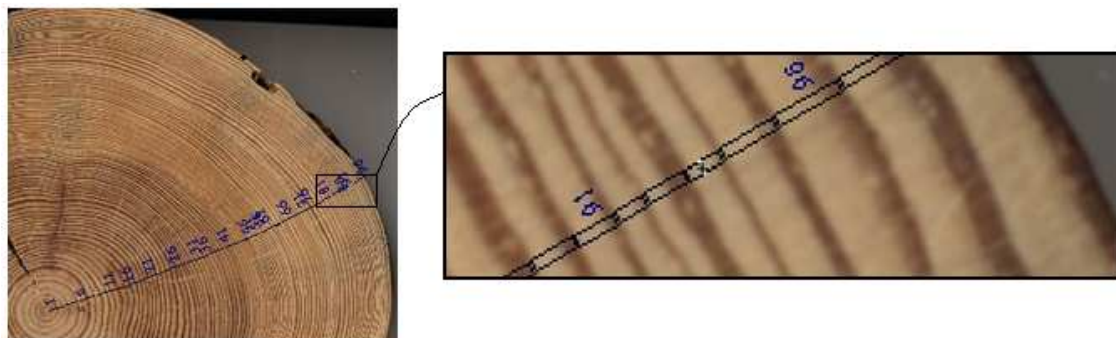


Fig. 3.14 - Dendrocronologia (fonte: <http://dendrotec.it>).

Saliente-se que algumas das técnicas referidas estão na base do desenvolvimento de equipamentos usados nos processos de classificação mecânica de peças novas, sendo exemplo disso a utilização dos raios-X.

3.3.3. MÉTODO SIMPLIFICADO BASEADO NA NORMA EUROPEIA EN 338:2009

A avaliação das propriedades mecânicas de peças estruturais antigas reveste-se de uma enorme complexidade. Apesar das normas de classificação existentes se aplicarem a madeira nova, extrapolando o que se refere no ponto 6.2.2 da norma europeia EN 338:2009, é possível atribuir uma classe de resistência à madeira antiga desde que se cumpram simultaneamente os seguintes requisitos:

1. Os valores característicos da resistência à flexão na direcção do fio ($f_{m,k}$) e da massa volúmica (ρ_k) têm que ser superiores ou iguais aos valores indicados para uma dada classe de resistência, de acordo com o quadro 3.2 (resinosas) ou 3.3 (folhosas);
2. O valor médio do módulo de elasticidade à flexão na direcção do fio ($E_{0,mean}$) tem que ser igual ou superior a 95 % do valor indicado para uma dada classe de resistência, de acordo com o quadro 3.2 (resinosas) ou 3.3 (folhosas);
3. Os valores característicos de resistência à flexão, do módulo de elasticidade médio e da massa volúmica da população de madeira considerada devem ser determinados de acordo com a norma EN 384:2010.

O cumprimento das exigências impostas conduzirá à atribuição de uma classe de resistência, às quais estão associados valores numéricos das propriedades físicas e mecânicas. Esta é uma via simplificada que a normalização europeia coloca à disposição do projectista. A figura 3.15 pretende esquematizar o processo referido.

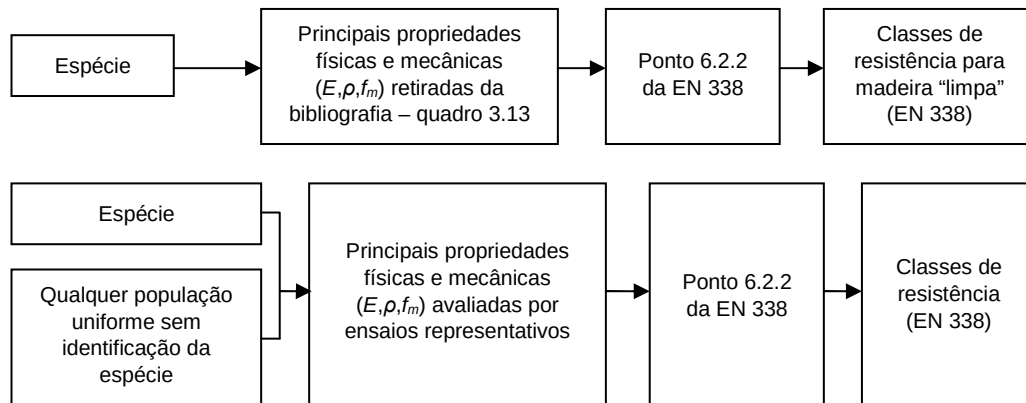


Fig. 3.15 - Processo de atribuição de classes de resistência à madeira em serviço (Negrão e Faria, 2009).

Para se seguir o procedimento indicado na figura 3.15 com vista à obtenção de uma determinada classe de resistência é fundamental identificar a espécie em causa, o que implica o conhecimento das características das várias espécies de madeira, tais como a cor, a largura dos veios, dureza superficial e diferenças na estrutura macroscópica. Ainda assim, por vezes recorre-se à extracção de amostras por carotagem com o objectivo de determinar a massa volúmica da madeira em causa e desfazer eventuais dúvidas de identificação.

Após a identificação da espécie florestal a classificar, é necessário conhecer os respectivos valores característicos de resistência à flexão, da massa volúmica e do módulo de elasticidade. Tendo em conta que se pretende aplicar o presente método à avaliação das propriedades físicas e mecânicas de peças de madeira incorporadas em estruturas antigas, a determinação das propriedades supracitadas é uma tarefa complexa. Para contornar este problema, geralmente adoptam-se os valores indicados no quadro 3.13 que são adaptados a partir da publicação *Madeiras Portuguesas* (Carvalho, 1996), à excepção do módulo de elasticidade que derivou de uma dedução conservadora da consulta do livro *Le guide des essences de bois* (Benoit, 1997). Este quadro engloba as principais madeiras nacionais aplicadas em estruturas, com excepção do Pinho bravo português que tem um documento normativo específico e que, por isso, lhe é atribuída a classe C18 pela norma EN 1912:2004.

Quadro 3.13 - Classes de resistência a usar no cálculo de estruturas de madeira portuguesa existentes (madeira antiga sem defeitos importantes).

Espécie	$f_{m,k}$ (MPa)	$E_{0,mean}$ (GPa)	ρ_k (kg/m ³)	Classe EN 338:2009
Castanho (<i>Castanea sativa</i>)	97	10	540	D30
Carvalho (<i>Quercus faginea</i>)	122	10	700	D30
Eucalipto (<i>Eucalyptus globulus</i>)	137	10	700	D30
Choupo branco (<i>Populus alba</i>)	80	10	420	C22

Nota: os valores constantes no presente quadro são para madeira limpa e sem defeitos.

Importa salientar que a atribuição da classe de resistência a cada uma das espécies presentes no quadro 3.13 resulta de uma análise comparativa entre os valores das três propriedades acima expostas e as indicadas nos quadros 3.2 (resinosas) e 3.3 (folhosas), cumprindo sempre as três condições já enunciadas. Verifica-se, na generalidade dos casos, que o módulo de elasticidade médio ($E_{0,mean}$) limita o valor da classe atribuída.

A utilização deste método simplificado é alvo de críticas por parte de vários especialistas devido à dificuldade de avaliar a resistência à flexão e o módulo de elasticidade, já que a massa volúmica pode ser determinada com relativa facilidade pela recolha de uma amostra no local por carotagem. Os valores propostos no quadro 3.13 são indicativos e poderão não corresponder à realidade, sobretudo pela enorme variabilidade entre espécies e dentro da mesma espécie. Ensaio realizado na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) sobre madeira antiga de Carvalho e Castanho conduziram a valores médios do módulo de elasticidade inferiores a 10,0 GPa, o que reforça a pouca fiabilidade do método (Ramos, 2010).

3.3.4. MÉTODOS MISTOS

A utilização simultânea da inspeção visual e de equipamentos não destrutivos é designada no presente trabalho por métodos mistos. Como se tem vindo a constatar, a utilização individual dos métodos expostos não é suficientemente esclarecedora da capacidade resistente das peças de madeira, por isso, entende-se que a utilização de métodos mistos constitui uma mais-valia na prossecução desse objectivo.

Estudos efectuados com vista à avaliação da madeira, nomeadamente na determinação da resistência residual dos elementos em serviço, têm recomendado a utilização conjunta de diferentes técnicas/equipamentos não destrutivos, como forma de tirar vantagem da complementaridade de informação sobre o estado de conservação e estimar com maior precisão a resistência residual dos elementos de madeira (Machado, 2003). O quadro 3.14 exemplifica alguns casos de aplicação de métodos mistos.

Quadro 3.14 - Casos de aplicação de métodos mistos na avaliação de elementos estruturais de madeira (adaptado de Machado, 2003).

Tipo de estrutura	Técnica/equipamento não destrutivo
Pilares de madeira de suporte da ponte <i>Queens Boulevard</i> (Nova Iorque, 1999)	Inspeção visual
	Sylvatest
	Resistógrafo
Vigas de madeira de um edifício do século XV	Inspeção visual
	Inspeção por meio de ondas de choque

A utilização dos equipamentos não destrutivos permite validar ou não os valores propostos no método Amorim Faria e facilita a determinação dos três parâmetros necessários à aplicação do método simplificado baseado na norma EN 338:2009. Deste modo, o uso de qualquer um dos métodos citados torna-se fiável devido à colaboração dos referidos equipamentos. Para que se possam usar os

equipamentos não destrutivos é necessária a existência de correlações aceitáveis para as espécies em causa, no entanto, isso não se verifica para todas as espécies.

Por um lado, existem espécies florestais com boas correlações e onde é possível estimar com algum rigor a capacidade resistente das peças estruturais de madeira, no entanto, para a maior parte delas não existem correlações desenvolvidas e a aplicação dos equipamentos não destrutivos não faz sentido, constituindo o Carvalho português um bom exemplo disso.

A utilização de métodos mistos é sem dúvida uma mais-valia quando aplicado a espécies estudadas, no entanto, a sua aplicação não pode ser generalizada a todas as espécies florestais, sob pena de se assumirem valores resistentes pouco representativos da realidade e, por isso, inadequados.

3.3.5. CONCLUSÃO

Pelo que se expõe no presente subcapítulo, conclui-se que não existe um método que avalie a capacidade resistente de peças de madeira antiga de qualquer espécie florestal. Todos os métodos referidos apresentam limitações, designadamente:

- Avaliação da capacidade resistente por inspecção visual - Reveste-se de uma grande subjectividade e, por isso, apenas poderá fornecer valores indicativos ao técnico que faz a inspecção;
- Utilização de equipamentos não destrutivos – Embora eficaz, a sua aplicabilidade é limitada às espécies florestais já estudadas e com correlações fiáveis;
- Método simplificado baseado na norma EN 338:2009 – Exige o conhecimento da massa volúmica (ρ_k), do módulo de elasticidade na direcção do fio ($E_{0,mean}$) e da resistência à flexão ($f_{m,k}$). Estas propriedades são difíceis de determinar com rigor, no entanto, a aplicação de equipamentos não destrutivos permite ultrapassar essa dificuldade para espécies com correlações desenvolvidas;
- Métodos mistos – Apesar de reunirem informação qualitativa e quantitativa determinante, o uso de equipamentos não destrutivos limitam a sua aplicabilidade.

Conclui-se que, se existirem correlações fiáveis para a espécie inspeccionada, a determinação da capacidade resistente representa um processo mais rápido e seguro. Caso contrário, as dúvidas e incertezas estarão presentes em maior ou menor número consoante o estado de conservação da peça estrutural e da experiência do técnico. Nestes casos, o autor sugere que se use a proposta apresentada por Arriaga *et al.* (2002), que permite atribuir uma classe de resistência em função da velocidade de propagação das ondas (*Sylvatest*) para qualquer espécie florestal. Como se referiu em 3.3.2.1, os intervalos propostos no quadro 3.10 são bastante seguros, tal como foi confirmado por Botelho (2006).

Em todo o caso, considera-se que o técnico responsável pela inspecção deverá ter conhecimentos estruturais consistentes que permitam identificar o tipo de esforços a que o elemento em causa está sujeito e relacioná-lo com os seus defeitos de modo a poder avaliar se estes são ou não críticos. Naturalmente que a existência de um nó não terá as mesmas repercussões caso a peça estrutural de madeira esteja solicitada à compressão ou flexão, ou seja, neste caso não será crítico a sua existência num pilar de madeira, podendo ser, por exemplo, numa viga de piso. Assim, a inspecção deverá identificar primeiramente o grau de deterioração da madeira, averiguar se as secções residuais ainda estão em condições de assegurar a estabilidade das estruturas onde estão aplicadas e verificar a eventual existência de fendas resultantes de esforços mecânicos, falhas pontuais de elementos estruturais ou nas ligações.

Da inspecção realizada, mesmo que não se consigam obter valores concretos de resistência, o técnico deverá tomar medidas correctivas que passarão por aprovar, rejeitar (substituir) ou reforçar cada um dos elementos inspeccionados. Refira-se que uma inspecção realizada correctamente faz reduzir os custos, ou seja, a correcta determinação da capacidade resistente das peças estruturais de madeira permite seleccionar aquelas que efectivamente devem ser substituídas ou reforçadas, permitindo recuperar a confiança na segurança das estruturas e ao mesmo tempo aproveitar o máximo possível os elementos existentes.

4

SÍNTESE DE RESULTADOS – RESISTÊNCIA MECÂNICA DE MADEIRA DE CARVALHO ANTIGA

4.1. INTRODUÇÃO

A qualidade da madeira de Carvalho português começou a ser reconhecida nos séculos XV e XVI, nomeadamente pela sua utilização na construção de naus e caravelas usadas nas explorações marítimas realizadas pelos portugueses (Descobrimentos). Desde então, a importância desta espécie florestal não tem sido uniforme, apesar de ser bastante estimada pelo povo.

A elevada densidade, dureza e resistência mecânica da madeira de Carvalho português propiciou a sua utilização em várias indústrias, das quais se destaca a construção civil. Ao nível estrutural, o Carvalho foi essencialmente utilizado em escadas, pavimentos simples ou duplos e em coberturas com as mais diversas formas.

Actualmente, vários edifícios antigos com estruturas em madeira de Carvalho português têm sido alvo de reabilitação, o que torna imperioso conhecer a capacidade resistente dos seus elementos estruturais. Contudo, esta avaliação nem sempre é feita, ficando ao critério do empreiteiro a substituição ou o reforço da estrutura. Assim, frequentemente verifica-se a demolição de sistemas estruturais que poderiam ser mantidos em serviço, ainda que tivessem de ser pontualmente intervencionados.

De modo a evitar demolições precoces, é necessário efectuar uma inspecção eficaz que permita tomar decisões no sentido de minimizar o desperdício de peças aptas aos usos previstos. No entanto, o conhecimento das propriedades mecânicas de madeira antiga é limitado e estende-se à madeira nova, como é o caso do Carvalho português que actualmente é utilizado, essencialmente, em revestimentos de piso sob a forma de painéis.

Com o objectivo de contribuir para o conhecimento das propriedades mecânicas da madeira de Carvalho português, o presente capítulo indica os valores normativos de referência, tanto para madeira nova como para madeira antiga, e sintetiza os valores obtidos através de campanhas experimentais realizadas em Portugal sobre madeira proveniente de edifícios existentes (madeira antiga).

Os valores adiante indicados para a madeira de Carvalho antiga deverão ser encarados com as devidas cautelas, tendo em conta que a verificação da segurança implica a compreensão do funcionamento da estrutura para poder julgar a importância das eventuais anomalias existentes.

4.2. VALORES NORMATIVOS DE REFERÊNCIA

Tal como foi referido em 3.2.3, existe uma correspondência entre classes de qualidade e classes de resistência para as peças estruturais de madeira. Essa correspondência é efectuada pela norma EN 1912:2004 que relaciona a madeira de várias espécies com os diversos sistemas nacionais de classificação visual. Em Portugal, a única norma que permite atribuir visualmente à madeira uma determinada classe de qualidade é a NP 4305:1995, que apenas se aplica para o Pinho. Já para a madeira de Carvalho, espécie em apreço na presente dissertação, tendo em conta que não existe norma nacional de classificação visual levanta-se uma problemática que urge resolver.

As normas de classificação visual aplicam-se apenas a madeira nova proveniente da serração. No entanto, em muitos casos práticos surge a necessidade de conhecer a resistência mecânica de peças que constituem estruturas antigas. Conforme se verificou no capítulo 3, este processo reveste-se de uma grande complexidade e não tem qualquer suporte normativo a nível nacional.

Efectivamente, é imperioso atribuir valores resistentes e seguros à madeira de Carvalho português quer seja nova ou antiga. Assim, com o objectivo de ultrapassar esta barreira e uma vez que em Portugal não existe apoio normativo relativo à espécie florestal mencionada, de seguida são apresentados valores referidos em normas nacionais de outros países europeus.

4.2.1. MADEIRA NOVA

A única norma de classificação visual disponível a nível europeu aplicável à madeira de Carvalho português é a NF B52-001:2007. A norma francesa citada atribui duas classes de qualidade às peças estruturais de madeira em função da limitação dos seus defeitos (ver quadro 5.3). Contudo, o documento normativo EN 1912:2004 não reconhece as classes de qualidade referidas quando são atribuídas ao Carvalho português, ou seja, não associa qualquer valor resistente a essa espécie florestal. Portanto, significa que o Carvalho português não é reconhecido como madeira estrutural para efeitos de certificação.

A norma francesa NF B52-001:2007 é bastante cautelosa e trata a madeira de Carvalho com uma enorme prudência, atribuindo as classes de resistência D18 e D24 às classes de qualidade 3 e 2, respectivamente. Refira-se que a classe de qualidade 1 ainda está por definir nesta versão da norma, pelo que ainda não lhe é atribuída qualquer classe de resistência.

Tendo em conta o que foi exposto, qualquer peça de madeira de Carvalho português que seja classificada pelo documento francês citado, receberá as propriedades físicas e mecânicas definidas pela norma EN 338:2009 e que estão presentes no quadro 4.1.

Quadro 4.1 - Propriedades físicas e mecânicas atribuídas pela NF B52-001:2007 à madeira de Carvalho português para utilização em estruturas.

Classe de qualidade – NF B52-001:2007		2	3
Classe de resistência		D24	D18
Propriedades resistentes em N/mm² (MPa)			
Flexão	$f_{m,k}$	24	18
Tracção paralela ao fio	$f_{t,0,k}$	14	11
Tracção perpendicular ao fio	$f_{t,90,k}$	0,6	0,6
Compressão paralela ao fio	$f_{c,0,k}$	21	18
Compressão perpendicular ao fio	$f_{c,90,k}$	7,8	7,5
Corte	$f_{v,k}$	4,0	3,4
Propriedades de rigidez em KN/mm² (GPa)			
Módulo de elasticidade paralelo ao fio (valor médio)	$E_{0,mean}$	10	9,5
Módulo de elasticidade paralelo ao fio (valor característico)	$E_{0,05}$	8,5	8,0
Módulo de elasticidade perpendicular ao fio (valor médio)	$E_{90,mean}$	0,67	0,63
Módulo de distorção (valor médio)	G_{mean}	0,62	0,59
Massa volúmica em kg/m³			
Valor característico	ρ_k	485	475
Valor médio	ρ_{mean}	580	570

4.2.2. MADEIRA ANTIGA

A determinação da capacidade resistente de estruturas de madeira *in situ* é um processo corrente, nomeadamente na reabilitação de edifícios. A sua avaliação por inspecção visual requer conhecimentos específicos e experiência e, por isso, são poucos ou quase nenhuns os documentos que arriscam atribuir propriedades mecânicas por mera limitação de defeitos.

No contexto europeu salienta-se apenas a norma italiana UNI 11119:2004, elaborada para a avaliação de estruturas de madeira por observação *in situ*. A norma referida serve de guião à inspecção, destacando os objectivos e os procedimentos a seguir. Refira-se que a inspecção visual deve ser estendida a todas as partes acessíveis do elemento, particularmente as mais solicitadas. Nas zonas onde não seja possível uma adequada inspecção visual, como por exemplo os topos de vigas encastradas em paredes de apoio, a norma prevê a execução de ensaios não destrutivos.

Os elementos estruturais classificados de acordo com o documento italiano supracitado podem receber três tipos de categorias (classes), às quais correspondem diferentes valores resistentes, conforme se ilustra no quadro 4.2.

Quadro 4.2 - Valores presentes na norma italiana UNI 11119:2004 ($H=12\%$).

Classe de qualidade – UNI 11119:2004		I	II	III
Propriedades resistentes em N/mm² (MPa)				
Flexão	f_m	13	11	8,5
Tracção paralela ao fio	$f_{t,0}$	12	10	7
Compressão paralela ao fio	$f_{c,0}$	12	10	7,5
Compressão perpendicular ao fio	$f_{c,90}$	3,0	2,5	2,2
Corte	f_v	1,2	1,0	0,9
Propriedades de rigidez em KN/mm² (GPa)				
Módulo de elasticidade paralelo ao fio	$E_{0,mean}$	13,5	12,5	11,5

Saliente-se que os valores presentes no quadro 4.2 são meramente indicativos e passíveis de utilização para situações correntes, não correspondendo a valores característicos.

4.3. CAMPANHAS EXPERIMENTAIS REALIZADAS NA FEUP

Tem-se vindo a verificar uma crescente necessidade de avaliar a capacidade resistente de peças de madeira que integram estruturas antigas. No entanto, apenas existem normas nacionais e europeias de classificação visual que permitem atribuir valores mecânicos de resistência a elementos estruturais novos. Para dar resposta a esta problemática, em 2008 foi desenvolvido o método *Amorim Faria* que permite atribuir valores resistentes a peças estruturais de madeira antiga através da limitação dos seus defeitos (ver 3.3.1).

Com o objectivo de validar os valores propostos pelo método supracitado realizaram-se três campanhas experimentais na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), que incidiram essencialmente sobre madeira antiga de Castanho e Carvalho. As referidas campanhas foram realizadas no âmbito das dissertações de Mestrado de Sónia Franco (2008), Samuel Pereira (2009) e Albino Ramos (2010) e, basicamente, consistiram na confrontação dos valores obtidos experimentalmente com os valores propostos no método de avaliação por inspecção visual proposto. Refira-se que o método *Amorim Faria* foi desenvolvido para ser aplicado a estruturas de madeira *in situ*, o que não aconteceu nos três trabalhos experimentais referidos já que a classificação visual foi executada em laboratório sobre as peças a ensaiar à flexão.

Conforme se mencionou, os ensaios mecânicos à compressão e flexão foram realizados na FEUP, nomeadamente no Laboratório de Sistemas e Componentes (LSC), no primeiro caso, e no Laboratório de Engenharia Sísmica e Estrutural (LESE), no segundo caso. No entanto, a campanha experimental realizada em 2008 constituiu uma excepção, uma vez que os ensaios mecânicos à flexão também foram executados no LSC. Apesar da particularidade referida, todos os ensaios foram realizados sob as mesmas condições, seguindo o mesmo procedimento e utilizando o mesmo esquema de ensaio.

A metodologia e descrição, assim como os resultados obtidos para cada uma das campanhas experimentais são a seguir expostos individualmente, realçando os aspectos mais importantes. Embora na metodologia e descrição se faça referência a todas as espécies botânicas ensaiadas, nos resultados apenas se referenciam os valores obtidos para a madeira de Carvalho.

Para que as três campanhas experimentais pudessem ser comparadas de uma forma eficaz e concisa, procurou-se uniformizar os aspectos referidos na metodologia e descrição, assim como nos resultados obtidos. Os dados informativos aqui descritos e a análise de cada campanha experimental limita-se à interpretação realizada por cada um dos autores.

Para uma descrição mais pormenorizada e detalhada da metodologia e dos resultados obtidos em cada uma das campanhas experimentais referidas, sugere-se a consulta dos documentos desenvolvimentos pelos autores anteriormente citados, nos quais a designação das amostras e/ou lote de amostras é idêntica à adoptada no presente trabalho.

4.3.1. CAMPANHA DE 2008 (FRANCO, 2008)

4.3.1.1. Metodologia e descrição

As amostras estudadas por Sónia Franco (2008) tiveram origem num edifício localizado na zona da Ribeira do Porto, mais concretamente na Rua do Infante D. Henrique, cuja construção data provavelmente de finais do século XVIII. Na altura, em fase de reabilitação, o estado degradado da estrutura de madeira do edifício conduziu à opção pela sua substituição total, o que permitiu a extracção de pontas de viga e o seu estudo em laboratório. A figura 4.1 permite verificar a forma irregular e o estado de conservação das vigas que serviram de base aos ensaios.



Fig. 4.1 – Forma irregular das vigas de madeira *in situ* (Franco, 2008).

Ao todo foram recolhidas e preparadas 26 amostras, das quais apenas 8 eram de madeira de Carvalho. Cada amostra era constituída por dois provetes, um a ensaiar á flexão e o outro a solicitar à compressão. Os primeiros tinham um metro de comprimento e secções rectangulares muito variáveis entre 15/18 x 20/24 cm², os segundos eram paralelepípedicos de pequena dimensão (30,0 cm de altura) e secções idênticas às peças ensaiadas à flexão.

O ataque biótico e a forma irregular das vigas evidenciou a necessidade de uma limpeza e um aplainamento prévio que tornasse as faces o mais paralelas possível. No entanto, mesmo após o referido tratamento, em alguns casos as irregularidades geométricas mantiveram-se. A preparação das amostras culminou com a sua numeração, permitindo uma eficaz identificação e diferenciação que auxilia a inspecção visual e a análise da relação rotura – defeitos. Na figura 4.2 é possível visualizar ambas as situações mencionadas.



Fig. 4.2 - Aspecto final dos provetes antes dos ensaios mecânicos. Esquerda: provetes ensaiados à flexão; Direita: provetes ensaiados à compressão e respectiva identificação. (Franco, 2008).

Antes de se proceder à classificação visual determinou-se a massa volúmica (ρ) e o teor de água (H) de cada uma das peças de madeira. Importa referir que, neste caso, a avaliação da primeira propriedade física citada teve um papel determinante na identificação da espécie botânica de cada um dos provetes.

A massa volúmica foi determinada pela divisão da massa (M) de cada uma das amostras pelo respectivo volume (V). A massa foi avaliada com recurso a uma balança digital, enquanto que o volume foi calculado pela multiplicação das três dimensões do provete que foram medidas com uma fita métrica. Este parâmetro físico foi avaliado para os provetes de menor dimensão (ensaiados à compressão) e, pelo facto de alguns deles serem irregulares, foi necessário fazer medições intermédias para se retirarem valores mais correctos. Embora as peças mencionadas não cumprissem integralmente as especificações da norma NP 616:1973, nomeadamente por razões geométricas e pela existência de defeitos, a determinação do parâmetro físico em apreço seguiu as suas recomendações.

O teor de água foi determinado para os provetes de maiores dimensões (ensaiados à flexão) de forma expedita e instantânea com recurso a um *Humidímetro* de agulha que permitiu efectuar um total de seis leituras, três na face (maior superfície) e três no canto (menor superfície), medidas nos extremos e no centro. A variação do teor de água ao longo da peça e entre a face e o canto impôs que se efectuassem várias medições que conduzissem a um valor médio. O processo referido está ilustrado na figura 4.3.



Fig. 4.3 - Avaliação do teor de água. Esquerda: *Humidímetro*; Direita: medição expedita. (Franco, 2008).

Após se terem avaliado as propriedades físicas referidas, procedeu-se à classificação visual dos provetes a ensaiar à flexão aplicando o método *Amorim Faria* (ver 3.3.1). Foram medidos e registados numa ficha tipo os defeitos de cada um dos provetes que, posteriormente, foram comparados com os valores limite para cada um deles, constantes no quadro 3.6. Das 26 peças inspeccionadas, apenas cinco não cumpriram os valores limite do quadro referido e, por isso, foram rejeitadas, tendo as restantes 21 sido aprovadas. Refira-se que, das 8 amostras de madeira de Carvalho existentes, apenas uma foi rejeitada.

Com o propósito de determinar diferentes propriedades resistentes, efectuaram-se ensaios mecânicos de flexão, usando os provetes com um metro de comprimento, e de compressão, usando os restantes provetes. A norma EN 408:2003 estabelece as disposições a obedecer na execução dos referidos ensaios. No entanto, em ambos os casos as suas especificações não foram cumpridas pelas razões que a seguir veremos.

Os ensaios à flexão foram realizados com o objectivo de obter o valor característico da resistência à flexão na direcção do fio ($f_{m,k}$) e o módulo de elasticidade médio ($E_{0,mean}$). Sucintamente, o esquema de ensaio preconizado na norma EN 408:2003 consiste na aplicação de duas cargas pontuais simétricas e aplicadas aos terços de um provete de madeira simplesmente apoiado e com um vão igual a 18 vezes a sua altura (h) (ver figura 5.16). Pelo facto do comprimento (L) dos provetes ser reduzido, não foi possível cumprir as condições referidas e, por isso, os resultados obtidos para o módulo de elasticidade foram inconclusivos, pelo que apenas se optou por determinar a resistência à flexão na direcção do fio.

Os ensaios à compressão paralela às fibras foram executados com vista à determinação do valor característico da resistência à compressão paralela ao fio ($f_{c,0,k}$). De acordo com a norma EN 408:2003, este tipo de ensaio é caracterizado pela transmissão de uma carga axial ao provete que deverá apresentar os topos paralelos e um comprimento mínimo igual a 6 vezes a menor dimensão da secção transversal. Ora, a dimensão dos provetes e a ausência de paralelismo entre os topos não cumpriram o exigido no documento normativo citado, sendo esta última razão o motivo da exclusão de um dos provetes de madeira de Carvalho.

Os ensaios mecânicos de flexão e de compressão, assim como as condições em que cada um deles foi executado, podem ser visualizados na figura 4.4.



Fig. 4.4 - Ensaios mecânicos. Esquerda: ensaio à compressão; Direita: ensaio à flexão. (Franco, 2008).

4.3.1.2. Resultados

Conforme já foi referido, os ensaios à flexão e compressão paralelo às fibras realizados por Sónia Franco (2008) não cumpriram as disposições presentes na norma EN 408:2003, nomeadamente no que diz respeito aos critérios geométricos definidos para os provetes. As peças ensaiadas à flexão não obedeciam à relação vão/altura e os elementos a ensaiar à compressão não tinham as dimensões correctas e não apresentavam topos paralelos. Embora os provetes não cumprissem o estipulado na norma citada, o facto de as peças terem um aspecto muito próximo do real em obra deram aos ensaios uma excelente representatividade ao nível do comportamento expectável para as peças em serviço.

Avaliaram-se as propriedades físicas e mecânicas das 8 amostras de madeira de Carvalho, cada uma constituída por dois provetes, cujos resultados se apresentam no quadro 4.3. Refira-se que os resultados presentes no quadro referido, para cada uma das propriedades determinadas, resultam de um tratamento estatístico efectuado sobre a totalidade dos provetes.

Quadro 4.3 – Campanha experimental de 2008 - Síntese de resultados (Franco, 2008).

Campanha 2008	Propriedades físicas		Propriedades mecânicas	
	H (%)	ρ (kg/m ³)	f_m (MPa)	$f_{c,0}$ (MPa)
Valor máximo	13,0	734,0	33,0	52,0
Valor mínimo	11,0	626,0	24,0	18,0
Valor médio	11,9	655,8	28,2	37,5
Desvio padrão	0,8	34,9	3,2	11,1
Coeficiente variação	7,0 %	5,3 %	11,3 %	29,6 %
Valor característico	10,5	598,5	22,9	19,3

Os valores obtidos para o teor de água e para a massa volúmica são coerentes, embora variem ligeiramente. O teor de água apresenta um valor médio de 11,9 % e um desvio padrão reduzido na ordem dos 0,8 %. No caso da massa volúmica, o valor médio é de 655,8 kg/m³ e o desvio padrão de apenas 34,9 kg/m³. Os reduzidos valores do desvio padrão conduzem a pequenos coeficientes de variação que espelham a uniformidade dos resultados obtidos para ambas as propriedades físicas.

No que se refere a resistência à flexão, obteve-se um valor médio de 28,2 MPa e um coeficiente de variação de 11,3 % que reflecte um pequeno desvio padrão. Ao contrário dos valores obtidos para a capacidade resistente à flexão, os resultados dos ensaios à compressão revelam uma enorme dispersão em torno do valor médio de 37,5 MPa, facto confirmado pelo peso que o desvio padrão tem na média que é cerca de 29,6 % daquele valor.

A variabilidade dos resultados é sobretudo acentuada nas propriedades mecânicas, particularmente na resistência à compressão (ver figura 4.5). Refira-se que as irregularidades geométricas apontadas anteriormente justificam que algumas amostras, constituídas por dois provetes, fossem ensaiadas à compressão e não à flexão ou vice-versa, tal como acontece nas amostras 20 e 22.

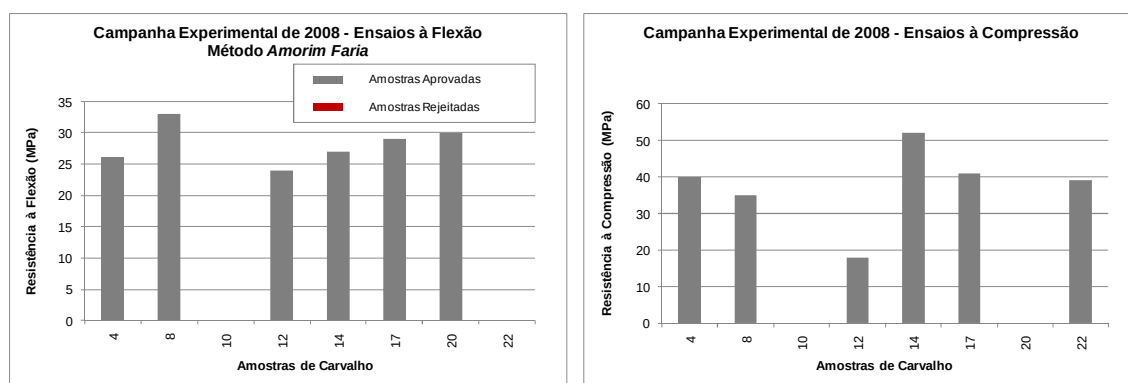


Fig. 4.5 – Propriedades mecânicas. Esquerda: resistência à flexão; Direita: resistência à compressão. (Adaptado de Franco, 2008).

Os resultados obtidos para a resistência à flexão são mais ou menos uniformes, variando entre 24 e 33 MPa, valores correspondentes aos provetes 12 e 8, respectivamente. Neste caso, verificou-se que a

existência ou não de fendas e a sua posição na peça influenciou significativamente os resultados, senão vejamos:

- O provete 8 não apresenta fendas e tem o valor mais elevado de resistência à flexão;
- Os provetes 17 e 20 têm fendas abaixo do eixo neutro. No entanto, o valor resistente à flexão é próximo do obtido para o provete 8, demonstrando que a posição do defeito referido não diminui significativamente a sua capacidade resistente;
- Os provetes 4, 12 e 14 possuem fendas ao longo do eixo neutro e, por isso, apresentam os valores mais reduzidos de resistência à flexão.

De facto, abaixo do eixo neutro a peça está solicitada à tracção, permitindo aproximar as fibras e aumentar a sua aderência, o que explica a reduzida influência da existência de fendas nessa zona, justificando a resistência obtida nos provetes 17 e 20. Já a existência de fendas posicionadas no eixo neutro terá uma contribuição mais desfavorável do que no caso anterior, uma vez que essa é uma zona de separação entre as fibras solicitadas à tracção e as fibras solicitadas à compressão, caso dos provetes 4, 12 e 14. Além das fendas, verificou-se que os nós também adquirem uma importância significativa na capacidade resistente das peças e que são menos desfavoráveis quando posicionados nas zonas comprimidas das peças.

Naturalmente que a existência dos defeitos atrás referidos condicionou o mecanismo de rotura dos provetes que, na generalidade dos casos, se caracterizou pelo rompimento das fibras traccionadas, normalmente com uma fissura longa que acompanhou a linha neutra, e pelo esmagamento pontual nas zonas de aplicação das cargas.

Conforme já foi referido, os ensaios à flexão realizados na campanha de 2008 foram executados no LSC da FEUP. A máquina de ensaio aí existente pára quando se regista a força máxima para um determinado provete e, por isso, não é possível analisar o seu comportamento após se ter atingido a resistência máxima. Os gráficos força – deslocamento que se obtiveram para os 6 provetes aprovados pelo método *Amorim Faria* podem ser observados na figura 4.6.

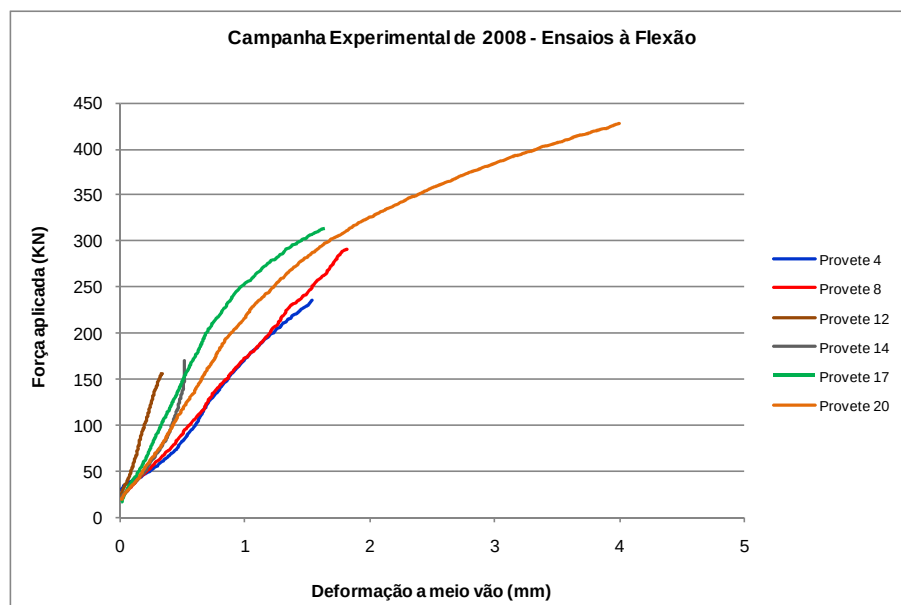


Fig. 4.6 - Gráfico força - deslocamento dos provetes ensaiados à flexão (adaptado de Franco, 2008).

A solicitação aplicada a cada um dos provetes é significativa e as deformações a ela associadas são bastante reduzidas, facto que é justificado pelo não cumprimento da norma EN 408:2003 que rege este tipo de ensaios. Note-se que os provetes 17 e 20 são os que resistem a uma força mais elevada. No entanto, é o provete 8 que tem maior resistência à flexão (ver figura 4.5) em consequência da relação $F_{m\acute{a}x}/W$ ser máxima para este caso.

Contrariamente ao que acontece na flexão, os resultados obtidos nos ensaios à compressão apresentam valores não uniformes, variando entre 18,0 e 52,0 MPa. O valor máximo da resistência à compressão ocorre no provete 14 que apresenta uma secção bastante regular e uma fenda ao longo de todo o comprimento longitudinal, dado que não interferiu na sua capacidade resistente. O valor mínimo da resistência à compressão foi obtido para o provete 12 ao qual se associa a existência de nós relativamente grandes que provocaram uma inflexão considerável às fibras adjacentes. Note-se que apenas o provete 12 se destaca consideravelmente dos outros, concluindo-se que os nós, apesar de terem menos influência do que em peças sujeitas à flexão, também podem diminuir drasticamente a capacidade resistente de elementos solicitados à compressão.

Obviamente que as fendas e os nós influenciaram o modo de rotura dos provetes solicitados à compressão. Em ambos os casos, a curvatura e o progressivo afastamento do fio foi facilitado pela existência de fendas e pela presença de nós de grandes dimensões. Naturalmente que o fenómeno descrito foi mais lento para o provete 14, conduzindo a uma resistência à compressão manifestamente superior.

A análise da resposta dos provetes à compressão consiste numa informação relevante e que merece particular atenção, no entanto, apenas foi possível obter a força máxima aplicada e a correspondente resistência à compressão. Deste modo, não será possível verificar a maior ou menor deformação de cada um dos provetes à solicitação imposta nos ensaios.

Saliente-se que, embora os resultados obtidos nos ensaios à flexão e compressão permitam tirar algumas conclusões, deve-se ter em consideração que o conjunto de provetes era muito reduzido, pelo que os valores obtidos não devem ser encarados como representativos.

4.3.2. CAMPANHA DE 2009 (PEREIRA, 2009)

4.3.2.1. Metodologia e descrição

As amostras de madeira ensaiadas por Samuel Pereira (2009) tiveram duas origens, sendo que a cada uma delas corresponde uma espécie botânica diferente, designadamente:

- Castanho – Resultou de um aproveitamento de pontas de viga utilizadas na campanha experimental realizada por Sónia Franco (2008) (ver 4.3.1.1);
- Carvalho – Teve origem num palacete em Braga do início do século XX que foi sujeito a um incêndio intenso.

As vigas de madeira de Carvalho usadas na campanha experimental encontravam-se parcialmente afectadas devido ao processo de combustão. Na figura 4.7 pode ser visualizado o estado aparente das referidas vigas *in situ*.



Fig. 4.7 - Aparência das vigas de madeira *in situ* após incêndio (Pereira, 2009).

Os elementos estruturais representativos das duas espécies botânicas supracitadas deram origem a provetes a ensaiar à flexão e à compressão paralela ao fio. Os provetes destinados aos ensaios à flexão apresentavam dimensões diferentes consoante a origem da madeira, ou seja, as peças de madeira de Castanho tinham sensivelmente um metro de comprimento e topos quadrangulares com 5,0 cm de lado, enquanto que os elementos de madeira de Carvalho apresentavam dimensões de 0,06 x 0,10 x 1,90 m³. No que diz respeito aos provetes a ensaiar à compressão, verificou-se que as bases e os topos eram quadrados com 12,0 cm de lado e 30,0 cm de comprimento quer fossem de Castanho ou Carvalho (ver quadro 4.4).

Para que as dimensões dos provetes referidas anteriormente pudessem ser obtidas com alguma precisão foi necessário que as vigas originárias sofressem um processo de preparação, tal como ilustra a figura 4.8. Refira-se que os provetes de Castanho foram retirados das partes não danificadas das vigas originárias.



Fig. 4.8 - Preparação dos provetes de Carvalho. Esquerda: serração da viga; Centro: aspecto final dos provetes ensaiados à flexão; Direita: aspecto final dos provetes ensaiados à compressão. (Pereira, 2009).

Deste modo, foram produzidos dois conjuntos de amostras de Castanho e de Carvalho, um para ensaiar à flexão e outro para ensaiar à compressão paralela ao fio. Cada conjunto recebeu a designação de lote e foi identificado com uma ou duas letras, conforme evidencia o quadro 4.4.

Quadro 4.4 - Identificação e caracterização dos lotes ensaiados.

Lote	N.º Amostras	Dimensões (m)	Ensaio	Espécie
<i>D</i>	27	0,05 x 0,05 x 1,00	Flexão	Castanho
<i>Dc</i>	28	0,12 x 0,12 x 0,30	Compressão	
<i>Ac</i>	51	0,12 x 0,12 x 0,30	Compressão	Carvalho
<i>G</i>	52	0,06 x 0,10 x 1,90	Flexão	

Para uma fácil identificação e diferenciação, todas as amostras foram numeradas de acordo com a ordem pela qual foram ensaiadas e marcadas com a designação do lote a que pertenciam. Por exemplo, à vigésima oitava viga a ser ensaiada pertencente ao lote *Dc* foi atribuída a designação *Dc28*, acontecendo o mesmo para os restantes provetes do mesmo lote e dos outros lotes.

Adicionalmente à designação atribuída a cada amostra, as 6 superfícies das peças ensaiadas à flexão (lotes *G* e *D*) também receberam uma identificação que foi traduzida pela atribuição da letra *F* a cada superfície seguida da respectiva numeração. Este procedimento permitiu associar a eventual presença de defeitos a cada uma das superfícies da peça avaliada, detalhando a inspeção visual no momento da classificação e auxiliando a análise da relação rotura – defeitos.

Os processos de identificação das amostras e de numeração das superfícies das peças a ensaiar à flexão podem ser visualizados na figura 4.9.



Fig. 4.9 - Marcação de provetes. Esquerda: designação atribuída; Direita: numeração de superfícies dos provetes que constituíam os lotes *G* e *D*. (Pereira, 2009).

Importa referir que os provetes que constituíram os quatro lotes referidos no quadro 4.4 apresentavam superfícies bem cortadas e arestas bem definidas, logo as suas dimensões eram rigorosas. Algumas amostras pertencentes aos lotes *G* e *D* evidenciavam a falta pontual de pedaços de madeira e algumas fissuras que não puseram em causa a sua integridade e qualidade visual.

Após se ter catalogado convenientemente todos os provetes de madeira, determinou-se a sua massa volúmica (ρ). No entanto, a grande dimensão das peças pertencentes ao lote *G* (1,90 m) dificultou o seu manuseamento e transporte, constituindo a causa para que apenas se tenha avaliado aquele parâmetro para metade das amostras pertencentes a este lote.

A massa volúmica foi calculada pelo quociente entre a massa (M) da amostra e o respectivo volume (V). A massa foi determinada por intermédio de uma balança digital, enquanto que o volume resultou do produto das três dimensões de cada provete medidas com auxílio de uma régua metálica, no caso

das peças a ensaiar à compressão, ou através de uma fita métrica, no caso das amostras a ensaiar à flexão (ver figura 4.10). A metodologia para a determinação da massa volúmica seguiu as indicações da norma NP 616:1973, no entanto, nem todas as suas especificações foram cumpridas. Apesar de os provetes ensaiados apresentarem arestas bem definidas e forma prismática, as suas dimensões não se enquadravam no intervalo definido no documento normativo citado e, em algumas das peças, era visível a presença de defeitos.



Fig. 4.10 - Avaliação da massa volúmica do provete Ac1. Esquerda: pesagem; Direita: medições. (Pereira, 2009).

No presente caso não se determinou o teor de água (H), sendo a pesagem e medição das dimensões dos provetes executadas em instantes consecutivos, pelo que se considerou que aquele parâmetro físico era exactamente igual nas duas operações. O teor de água referido foi ainda extrapolado a toda a campanha experimental pelo facto dos ensaios terem sido realizados no mesmo local e com pouco espaço temporal entre eles.

Antes de serem submetidos aos ensaios mecânicos de flexão, os provetes que constituíam os lotes *D* e *G* foram sujeitos a um processo de classificação visual baseado no método *Amorim Faria* (ver 3.3.1). Mediram-se os defeitos de cada uma das peças que, posteriormente, foram comparados com os valores limite presentes no quadro 3.6. As referidas medições foram acompanhadas por um registo fotográfico e pelo preenchimento de uma ficha tipo de classificação visual. As peças que cumpriram os requisitos de aceitação do método usado receberam a classificação *aprovada*, as restantes receberam o rótulo *reprovada*.

Das 27 amostras de madeira de Castanho que constituíam o lote *D*, 14 foram rejeitadas, enquanto que no lote *G*, constituído por 52 amostras de madeira de Carvalho, apenas 16 obtiveram a mesma classificação. O ataque biológico e a existência de nós e fendas estiveram na origem da classificação negativa atribuída a 30 amostras, de um total de 79.

Com o objectivo de determinar diferentes propriedades resistentes, realizaram-se ensaios mecânicos de flexão, usando as amostras dos lotes *D* e *G*, e de compressão, usando as amostras dos lotes *Dc* e *Ac*. Ambos os ensaios seguiram as disposições estabelecidas na norma EN 408:2003, no entanto, nem todas as suas especificações foram cumpridas, particularmente nos ensaios realizados à compressão.

Os ensaios à flexão foram realizados com o propósito de obter o valor característico da resistência à flexão na direcção do fio ($f_{m,k}$) e o módulo de elasticidade médio ($E_{0,mean}$). Genericamente, o esquema de ensaio preconizado na norma EN 408:2003 consiste na aplicação de duas cargas pontuais simétricas e aplicadas aos terços de um provete de madeira simplesmente apoiado e com um comprimento mínimo (L_{min}) igual a 19 vezes a sua altura (h) (ver figura 5.16). As condições impostas para a concretização dos ensaios à flexão segundo a norma referida foram cumpridas, em particular as que

dizem respeito às dimensões dos provetes do lote *D* ($L \geq L_{min} = 19 \times 0,05 = 0,95$ m) e do lote *G* ($L \geq L_{min} = 19 \times 0,10 = 1,90$ m).



Fig. 4.11 - Ensaio à flexão. Esquerda: setup do ensaio; Direita: rotura por tracção paralela na zona traccionada. (Pereira, 2009).

Os ensaios à compressão paralelo às fibras foram executados com o objectivo de determinar o valor característico da resistência à compressão paralela ao fio ($f_{c,0,k}$) e o módulo de elasticidade em compressão paralela ao fio ($E_{c,0}$). De acordo com a norma EN 408:2003, este tipo de ensaio é caracterizado pela transmissão de uma carga ao provete (ver figura 4.12), que deverá apresentar os topos perfeitamente paralelos e um comprimento mínimo igual a 6 vezes a menor dimensão da secção transversal. Ora, tendo em conta o que foi referido anteriormente relativamente às dimensões das amostras ensaiadas à compressão, verifica-se que os provetes não cumprem simultaneamente as duas condições citadas, uma vez que a sua dimensão longitudinal foi limitada a 30,0 cm com o propósito de minimizar alguns efeitos que se observam habitualmente em peças esbeltas. Ainda assim, os ensaios seguiram a metodologia proposta na norma referenciada anteriormente.



Fig. 4.12 - Ensaio à compressão. Esquerda: setup do ensaio; Direita: provete antes e depois do ensaio. (Pereira, 2009).

4.3.2.2. Resultados

Tal como anteriormente se referenciou, apenas os ensaios à compressão paralela ao fio (lote *Ac*) não cumpriram as disposições presentes na norma EN 408:2003, já que os provetes sujeitos a esse tipo de solicitação apenas tinham 30,0 cm de comprimento e deveriam ter, no mínimo, 72,0 cm. Contudo, considerou-se conveniente seguir a metodologia proposta no documento normativo citado.

Foram realizados ensaios físicos e mecânicos sobre as amostras de madeira de Carvalho que integraram os lotes *G* e *Ac*. Saliente-se que o tratamento dos resultados obtidos experimentalmente

para cada uma das propriedades incidiu sobre todos os provetes de cada lote, incluindo os rejeitados pela aplicação do método *Amorim Faria* no caso do lote G. O grande conjunto de amostras que constitui cada um dos lotes, a análise do seu modo de rotura e do seu comportamento à solicitação implicou uma exposição individual de cada um deles.

i. Ensaios mecânicos de flexão – Lote G

As 52 amostras que integravam o lote G foram ensaiadas à flexão com o propósito de avaliar o valor característico de resistência à flexão na direcção do fio e o módulo de elasticidade médio. Foi ainda determinada a massa volúmica para cada provete, sendo que os valores desta grandeza física e das propriedades mecânicas atrás citadas se encontram presentes no quadro 4.5.

Quadro 4.5 – Campanha experimental de 2009 - Síntese de resultados para o lote G (Pereira, 2009).

Campanha 2009 Lote G	Propriedades físicas	Propriedades mecânicas	
	ρ (kg/m ³)	E_0 (GPa)	f_m (MPa)
Valor máximo	673,5	13,4	62,1
Valor mínimo	526,7	6,8	4,4
Valor médio	598,0	9,9	47,1
Desvio padrão	41,9	1,4	14,8
Coeficiente variação	7,0 %	14,4 %	31,5 %
Valor característico	529,3	7,6	22,8

O valor médio obtido para a massa volúmica de 598,0 kg/m³ constitui uma boa aproximação, tendo em conta que foi calculado com base em apenas 25 provetes, mais concretamente em cerca de 48,0 % do total. O conjunto apresenta uma certa homogeneidade comprovada pelo coeficiente de variação de 7,0 % que reflecte o reduzido peso do desvio padrão, logo uma ligeira dispersão dos valores obtidos em torno do valor médio.

No que se refere ao módulo de elasticidade à flexão, os resultados obtidos são bastante mais dispersos do que os evidenciados para a massa volúmica. Este dado pode ser confirmado pelo valor do coeficiente de variação que é de 14,4 %, aproximadamente o dobro do referido para a massa volúmica.

Já os resultados para a resistência à flexão apresentam um valor médio de 47,1 MPa e um desvio padrão de 14,8 MPa, valores que conduzem a um coeficiente de variação de 31,5 %. Perante o exposto, constata-se que a dispersão dos resultados é grande e tem repercussões no valor característico, espelhando a enorme variabilidade que pode existir dentro da mesma espécie botânica.

Pela importância que esta propriedade mecânica adquire e para uma visualização mais pormenorizada da variabilidade que os ensaios à flexão demonstraram, a figura 4.13 expõe graficamente todos os resultados obtidos, distinguindo peças aprovadas e rejeitadas.

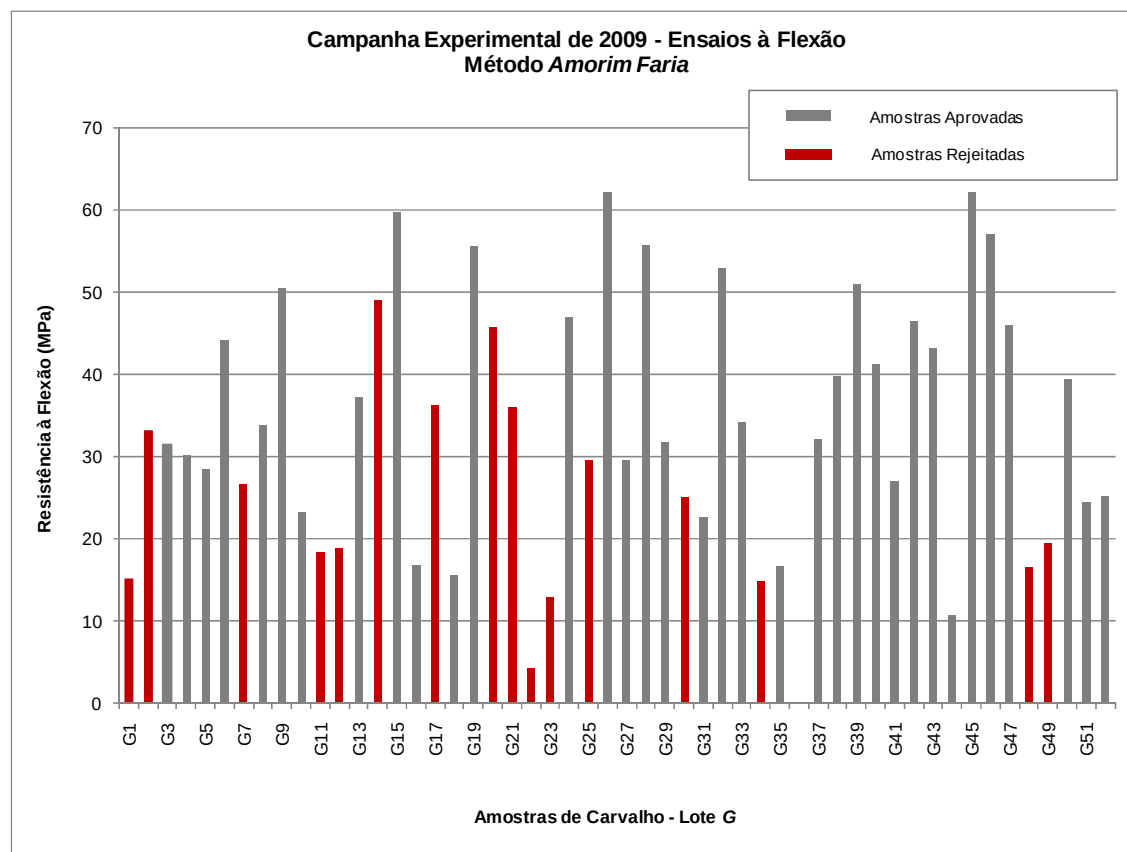


Fig. 4.13 – Método Amorim Faria: resistência à flexão – Lote G (adaptado de Pereira, 2009).

Pela análise da figura 4.13, verifica-se que a resistência à flexão varia entre 62,1 e 4,4 MPa, valores que correspondem às amostras G26 e G22, respectivamente. A amostra G26 apresentava pequenos nós na zona central e duas manchas em duas superfícies, uma com coloração negra e outra em tons amarelados. Na amostra G22 verificava-se a existência de vários nós junto aos apoios e em zonas que posteriormente foram traccionadas, além da presença de inúmeras fendas associadas a alguns vazios em duas superfícies. Os defeitos referidos justificam uma diferença de 57,7 MPa na capacidade resistente das duas amostras referidas.

Efectivamente, a presença de defeitos influenciou significativamente a capacidade resistente das amostras ensaiadas e os respectivos mecanismos de rotura, designadamente:

- Pré-rotura localizada na zona comprimida da peça e posterior rotura pelas fibras traccionadas, geralmente com uma fissura longitudinal a acompanhar a zona do eixo neutro;
- Rotura por corte na zona de aplicação da carga;
- Rotura por tracção perpendicular às fibras junto à zona dos apoios, induzida por fio inclinado;

Assim, mesmo quando submetidos ao mesmo tipo de solicitações, os provetes não evidenciaram um comportamento idêntico em virtude do seu carácter heterogéneo. Contudo, numa importante fatia dos provetes ensaiados, verificou-se que, dos três tipos de rotura acima mencionados, o primeiro foi aquele que se repetiu com alguma frequência (ver figura 4.11).

Um outro aspecto que os ensaios à flexão permitiram analisar foi o comportamento dos provetes à medida que a solicitação aumentava, conforme os gráficos força – deslocamento evidenciam. A figura

4.14 realça a rotura frágil dos provetes durante o ensaio, distinguindo-se as amostras que receberam a classificação *aprovada* e *rejeitada* pelo método *Amorim Faria*.

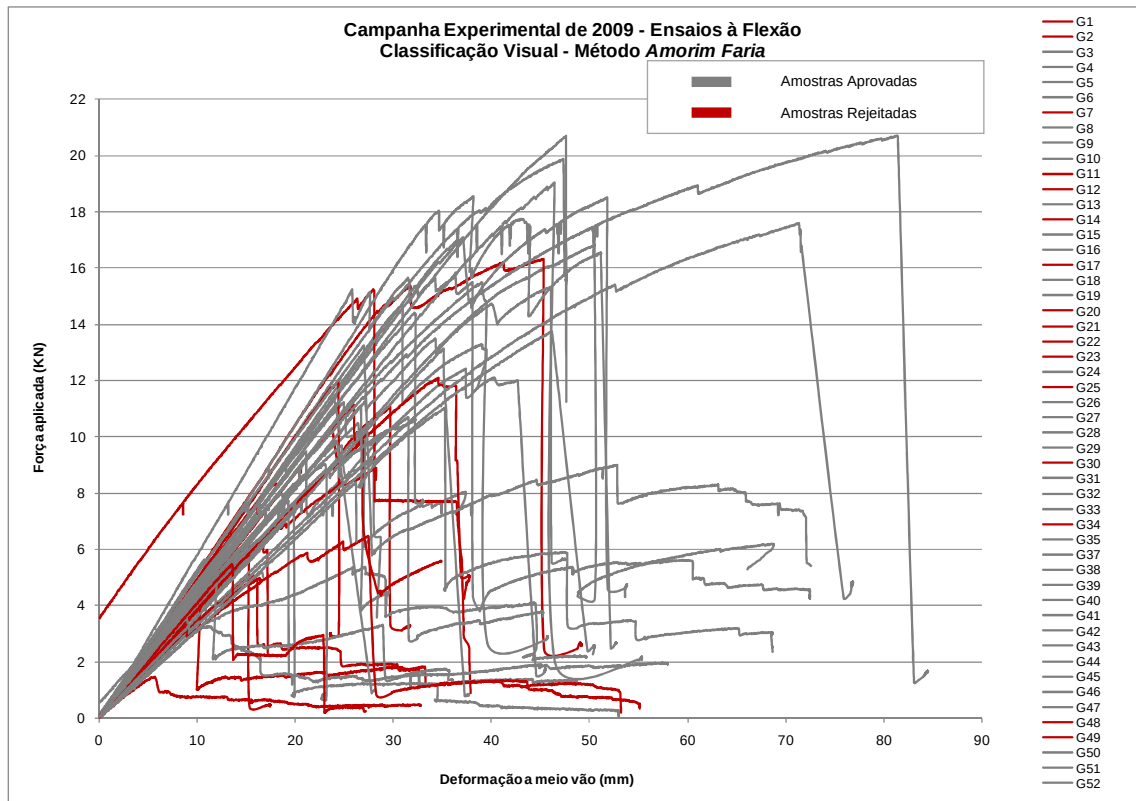


Fig. 4.14 – Método *Amorim Faria*: gráficos força - deslocamento – Lote G (adaptado de Pereira, 2009).

Note-se que o comportamento da generalidade das amostras é caracterizado por uma quebra vertical da força máxima aplicada sem qualquer tipo de deslocamento associado. No entanto, antes de se atingir a carga máxima a deformação é considerável, alertando uma eventual rotura. Esta deformação foi particularmente evidente nas amostras aprovadas que atingiram, em alguns casos, os 70,0 mm. Saliente-se, ainda, que existe uma quantidade importante de amostras aprovadas com menor capacidade resistente do que algumas peças rejeitadas e vice-versa.

ii. Ensaio mecânicos de compressão – Lote Ac

Cada uma das 51 amostras que constituíam o lote Ac foi sujeita a ensaios à compressão com o objectivo de determinar o valor característico da resistência à compressão paralela ao fio e o módulo de elasticidade em compressão paralela ao fio. Foi ainda determinada a massa volúmica para cada provete, sendo que os valores desta grandeza física e das propriedades mecânicas atrás referidas se encontram presentes no quadro 4.6.

Quadro 4.6 – Campanha experimental de 2009 - Síntese de resultados para o lote Ac (Pereira, 2009).

Campanha 2009	Propriedades físicas	Propriedades mecânicas	
Lote Ac	ρ (kg/m ³)	$E_{c,0}$ (GPa)	$f_{c,0}$ (MPa)
Valor máximo	696,1	11,5	49,1
Valor mínimo	510,5	3,3	16,8
Valor médio	603,6	7,8	36,5
Desvio padrão	47,9	1,5	7,2
Coeficiente variação	7,9 %	19,6 %	19,8 %
Valor característico	525,1	5,3	24,6

O valor médio obtido para a massa volúmica nos provetes ensaiados à compressão ronda os 600,0 kg/m³, não se verificando uma grande variabilidade a julgar pelo valor do coeficiente de variação. Se confrontarmos os dados referentes aos lotes G e Ac no que respeita à massa volúmica, verifica-se que são bastante semelhantes, embora os resultados obtidos para o segundo lote sejam revestidos de um maior rigor e fiabilidade, dado que o número de provetes era manifestamente superior. A proximidade dos valores em ambos os casos confirma que, embora o número de amostras do lote G fosse apenas de 25, os resultados obtidos são bastante credíveis.

No que diz respeito ao módulo de elasticidade à compressão, embora seja menos representativo do que os valores obtidos por meio dos ensaios à flexão, foi importante para aprofundar o conhecimento sobre a madeira de Carvalho. O valor médio obtido para esta propriedade mecânica foi de 7,8 GPa com um desvio padrão de 1,5 GPa, dando origem a um coeficiente de variação de 19,6 %. Este valor não deixa de ser considerado elevado e representa a variabilidade exibida pelos resultados em torno do valor médio atrás referido.

Em relação aos ensaios de resistência à compressão, chegou-se a um valor médio de 36,5 MPa e uma grande dispersão de resultados em torno desta ordem de grandeza, comprovada pelo coeficiente de variação que atingiu os 19,8 %. Esta grande variabilidade influencia significativamente o valor característico de resistência à compressão, ou seja, este valor é menor em virtude de um desvio padrão maior.

A resistência à compressão é, sem dúvida, uma das propriedades mais relevantes que é possível obter dos ensaios mecânicos. Por esse motivo, e para permitir uma visão geral da capacidade resistente de cada uma das amostras, na figura 4.15 é possível verificar a resistência máxima de cada provete ensaiado.

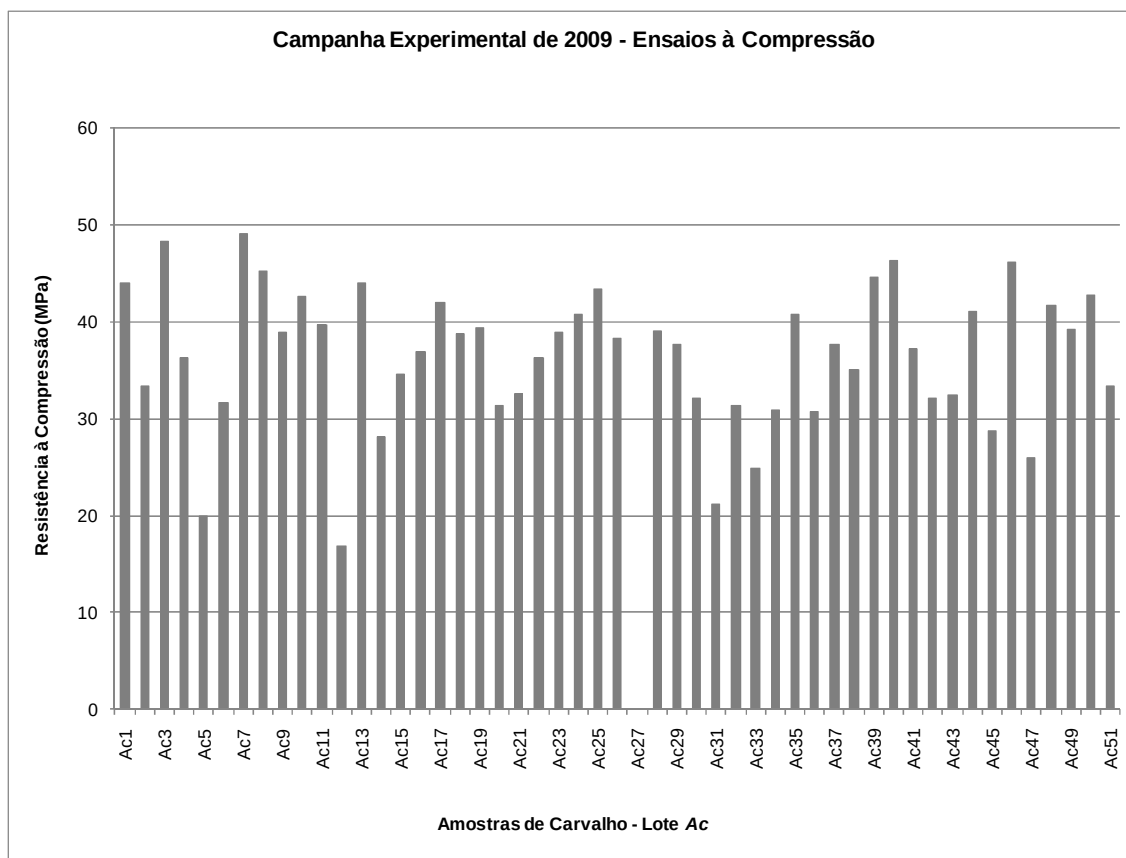


Fig. 4.15 - Resistência à compressão – Lote Ac (adaptado de Pereira, 2009).

Pela análise da figura 4.15, constata-se que a resistência à compressão varia entre 49,1 e 16,8 MPa, valores correspondentes às amostras Ac7 e Ac12, respectivamente. A amostra Ac7 tinha um bom aspecto visual, apesar de apresentar pequenas fissuras próximas de nós nos topos, pequenos vazios e uma ligeira inclinação local do fio. A amostra Ac12 aparentava defeitos importantes como fendas profundas associadas a nós de grandes dimensões num dos topos do provete, instabilidade do fio e manchas amareladas provavelmente motivadas por ataque biológico. Perante o exposto previa-se, à partida, um comportamento oposto para cada um dos provetes, o que mais tarde se veio a confirmar.

Além dos dados estatísticos presentes no quadro 4.6, os ensaios de compressão sobre os provetes do lote Ac denunciaram que a sua capacidade resistente e o seu mecanismo de rotura podem ser afectados não só por factores naturais, como também por factores artificiais. Os factores naturais dizem respeito à existência de defeitos, em particular as fendas que, em alguns casos, permitiram o destacamento de parte da secção e a sua posterior rotura (ver figura 4.12). Os factores artificiais associam-se à presença de defeitos relacionados com a utilização e função da peça, nomeadamente vazios que tiveram origem na fixação de elementos metálicos (pregos) e que influenciaram o modo de rotura da peça.

Uma outra informação que também é possível obter dos ensaios de compressão são os gráficos força – deslocamento que permitiram analisar o comportamento das amostras à solicitação. Uma parte considerável dos provetes ensaiados denunciou um comportamento pouco frágil, tal como evidencia a figura 4.16.

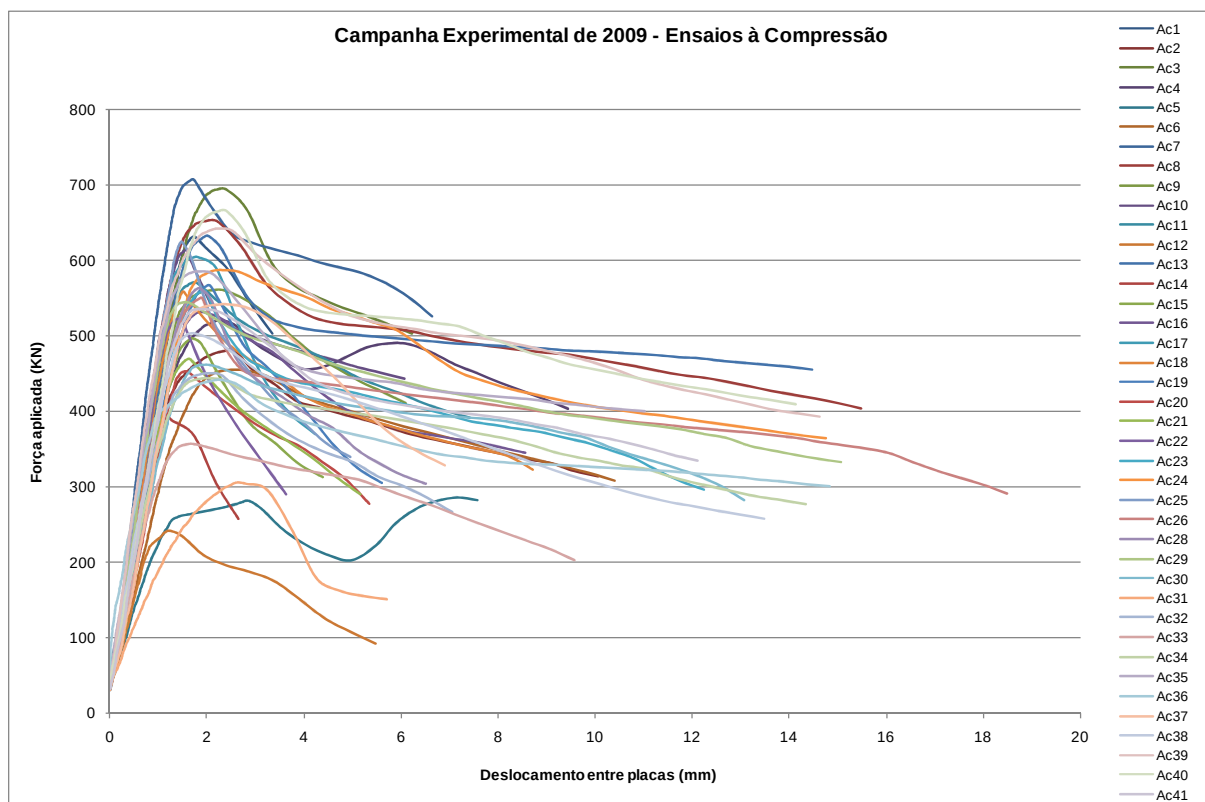


Fig. 4.16 - Gráficos força - deslocamento – Lote Ac (adaptado de Pereira, 2009).

De facto, embora nem todas as amostras tivessem a mesma resposta, na generalidade dos casos o comportamento à solicitação é em tudo semelhante, ou seja, os provetes atingem um pico de resistência com reduzida deformação e a partir daí observa-se uma quebra pouco repentina da força aplicada à qual se associa uma grande deformação.

4.3.3. CAMPANHA DE 2010 (RAMOS, 2010)

4.3.3.1. Metodologia e descrição

As amostras ensaiadas por Albino Ramos (2010) resultaram do corte de peças serradas de pequena dimensão a partir de madeira redonda antiga de Carvalho e Castanho. A proveniência exacta dessa madeira não é conhecida, propositadamente, sabendo-se apenas que teve origem em demolições de edifícios antigos e que se encontravam no parque de madeiras antigas de um empreiteiro de média dimensão com grande tradição no mercado ao nível da reabilitação de estruturas de madeira existentes.

Das peças de madeira originárias, foram extraídos e preparados 50 provetes a ensaiar à flexão com as dimensões de $0,05 \times 0,07 \times 1,40 \text{ m}^3$, sem que se identificasse a espécie botânica a que cada um pertencia. Os provetes apresentavam arestas bem definidas, superfícies ortogonais e uma boa qualidade visual, apesar de ser visível uma coloração diferente em alguns deles. A figura 4.17 ilustra o conjunto dos provetes, onde é possível identificar alguns dos aspectos referidos.

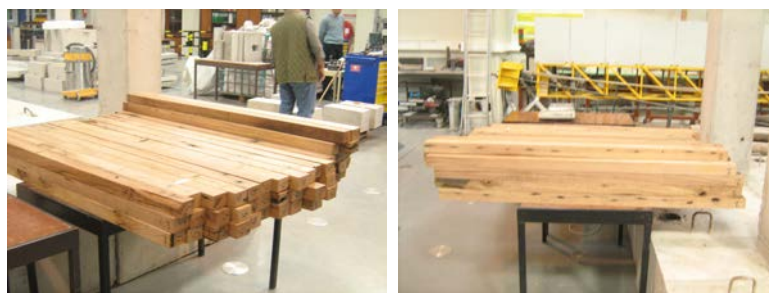


Fig. 4.17 - Aspecto final dos provetes ensaiados à flexão (Ramos, 2010).

Todas as amostras foram identificadas com a letra V seguida de um número correspondente à ordem pela qual foram ensaiadas. Por exemplo, à segunda viga a ser ensaiada foi atribuída a designação V2, acontecendo o mesmo às restantes vigas.

Além da identificação referida, as 6 superfícies de todas as amostras receberam uma numeração que se revela importante no momento da classificação visual, pois permite identificar a localização de defeitos e avaliar a sua importância numa fase posterior (análise da relação rotura – defeitos).

Na figura 4.18 é possível visualizar o procedimento de identificação das amostras e de numeração das suas superfícies.



Fig. 4.18 - Marcação de amostras. Esquerda: designação atribuída; Direita: numeração de superfícies. (Ramos, 2010).

Após se ter catalogado devidamente cada uma das peças, procedeu-se à determinação dos parâmetros físicos. Embora o teor de água (H) possa influenciar o comportamento da madeira, apenas se avaliou a massa volúmica (ρ) que foi calculada dividindo a massa (M) de cada amostra pelo respectivo volume (V). A massa foi avaliada por intermédio de uma balança digital (ver figura 4.19) e o volume resultou da multiplicação das três dimensões de cada peça, medidas através de uma fita métrica (comprimento) e de uma régua metálica (secções transversais). A determinação desta propriedade física seguiu a metodologia proposta na norma NP 616:1973, no entanto, algumas das suas indicações não foram satisfeitas com particular destaque para os provetes que continham defeitos e não apresentavam as dimensões correctas.



Fig. 4.19 - Pesagem das amostras (Ramos, 2010).

Determinada a massa volúmica de cada um dos provetes, procedeu-se à sua classificação de acordo com o método *Amorim Faria*. Conforme se referiu em 3.3.1, este método limita a presença de defeitos e classifica as peças de acordo com esse pressuposto. Assim, todos os defeitos presentes nos provetes foram medidos e confrontados com os valores máximos constantes no quadro 3.6. As peças que cumpriram as exigências receberam a classificação *aprovada*, as que não cumpriram os valores limite definidos no método receberam a classificação *rejeitada*. Refira-se que todos os defeitos de cada provete foram registados fotograficamente e através do preenchimento de uma ficha de classificação visual.

Do conjunto de 50 provetes inspeccionados, apenas 17 foram rejeitados, correspondendo a uma percentagem de 34,0 %. A presença de fendas e o elevado diâmetro dos nós constituíram os defeitos que estiveram na origem das rejeições.

Nesta campanha experimental apenas se realizaram ensaios à flexão com o objectivo de determinar o valor característico da resistência à flexão na direcção do fio ($f_{m,k}$) e o módulo de elasticidade médio ($E_{0,mean}$). O ensaio mencionado seguiu o esquema definido da norma EN 408:2003 que consiste na aplicação de duas cargas pontuais simétricas nos terços da amostra que deve apresentar um comprimento mínimo (L_{min}) igual a 19 vezes a sua altura (h) (ver figura 5.16). As amostras em questão cumpriram a condição referida uma vez que o seu comprimento (L) era superior ao valor mínimo ($L_{min} = 19 \times 0,07 = 1,33$ m).



Fig. 4.20 - Ensaio à flexão. Esquerda: setup do ensaio; Direita: rotura por tracção paralela na zona traccionada. (Ramos, 2010).

4.3.3.2. Resultados

Conforme se destacou em 4.3.3.1, na campanha experimental realizada em 2010 apenas se realizaram ensaios mecânicos à flexão que seguiram e cumpriram as disposições presentes na norma EN 408:2003. Note-se que, propositadamente, não se identificou a espécie botânica a que cada uma das

amostras pertencia, pelo que não foi possível isolar e tratar separadamente os resultados obtidos apenas para a madeira de Carvalho.

Importa referir uma vez mais que os valores obtidos nas campanhas realizadas em 2008 e 2009 resultaram de um tratamento estatístico da totalidade das amostras, quer fossem aprovadas ou rejeitadas pela aplicação do método *Amorim Faria*. Tendo em conta os elevados coeficientes de variação obtidos, perspectivou-se que uma eventual análise apenas sobre as amostras aprovadas conduziria a valores menos dispersos e, por isso, o tratamento estatístico realizado por Albino Ramos (2010) incidiu sobre o conjunto total das amostras e também sobre o subconjunto das amostras aprovadas. O quadro 4.7 sintetiza os valores das propriedades físicas e mecânicas para cada um dos conjuntos referidos.

Quadro 4.7 – Campanha experimental de 2010 - Síntese de resultados (Ramos, 2010).

Campanha 2010	Propriedades físicas		Propriedades mecânicas			
	ρ (kg/m ³)		E_0 (GPa)		f_m (MPa)	
Lote	Completo	Aprovadas	Completo	Aprovadas	Completo	Aprovadas
Valor máximo	768,2	768,2	14,7	13,6	69,8	69,8
Valor mínimo	448,2	463,7	3,5	5,1	6,5	10,4
Valor médio	610,8	603,5	9,5	9,8	32,5	37,2
Desvio padrão	73,43	69,1	2,8	2,3	16,0	14,6
Coeficiente variação	12,0 %	11,5 %	29,6 %	23,8 %	49,2 %	39,3 %
Valor característico	490,6	490,1	4,9	6,0	6,3	13,2

O valor médio da massa volúmica tem uma variação muito ténue quando se confronta o lote completo com o lote das amostras aprovadas, uma vez que os valores correspondentes se situam na ordem dos 605,0 kg/m³. Em ambos os casos o coeficiente de variação situa-se nos 12,0 %, representando o reduzido peso do desvio padrão e, portanto, uma dispersão pouco significativa dos resultados em torno do valor médio.

Em relação ao módulo de elasticidade, à semelhança do que aconteceu com a massa volúmica, não se registaram grandes diferenças. O valor médio para o lote completo é de 9,5 GPa, sendo superior em 0,3 GPa no lote das amostras aprovadas. De igual forma, o desvio padrão também é idêntico em ambos os casos, embora a diferença de valores seja de 0,5 GPa neste parâmetro. Assim sendo, e em resultado dos valores referidos para cada um dos conjuntos, verifica-se um coeficiente de variação de 29,6 %, no caso do lote completo, e de 23,8 %, no caso do lote das amostras aprovadas. Ambos os valores se consideram elevados e representativos de uma grande dispersão dos resultados.

No que diz respeito aos resultados obtidos para a resistência à flexão verifica-se que, no caso do conjunto das 50 amostras, o valor médio é de 32,5 MPa e o desvio padrão é 16,0 MPa, logo o coeficiente de variação atinge praticamente os 50,0 % que corresponde a um valor demasiado elevado, traduzindo a enorme variabilidade constatada. Já no caso do lote de amostras aprovadas, o valor médio cresce para os 37,2 MPa e o desvio padrão desce para 14,6 MPa, fazendo diminuir o coeficiente de variação e aumentando o valor característico. A variação dos valores da resistência à flexão para todos

os provetes pode ser visualizada na figura 4.21, onde se faz a distinção entre peças aprovadas e peças rejeitadas.

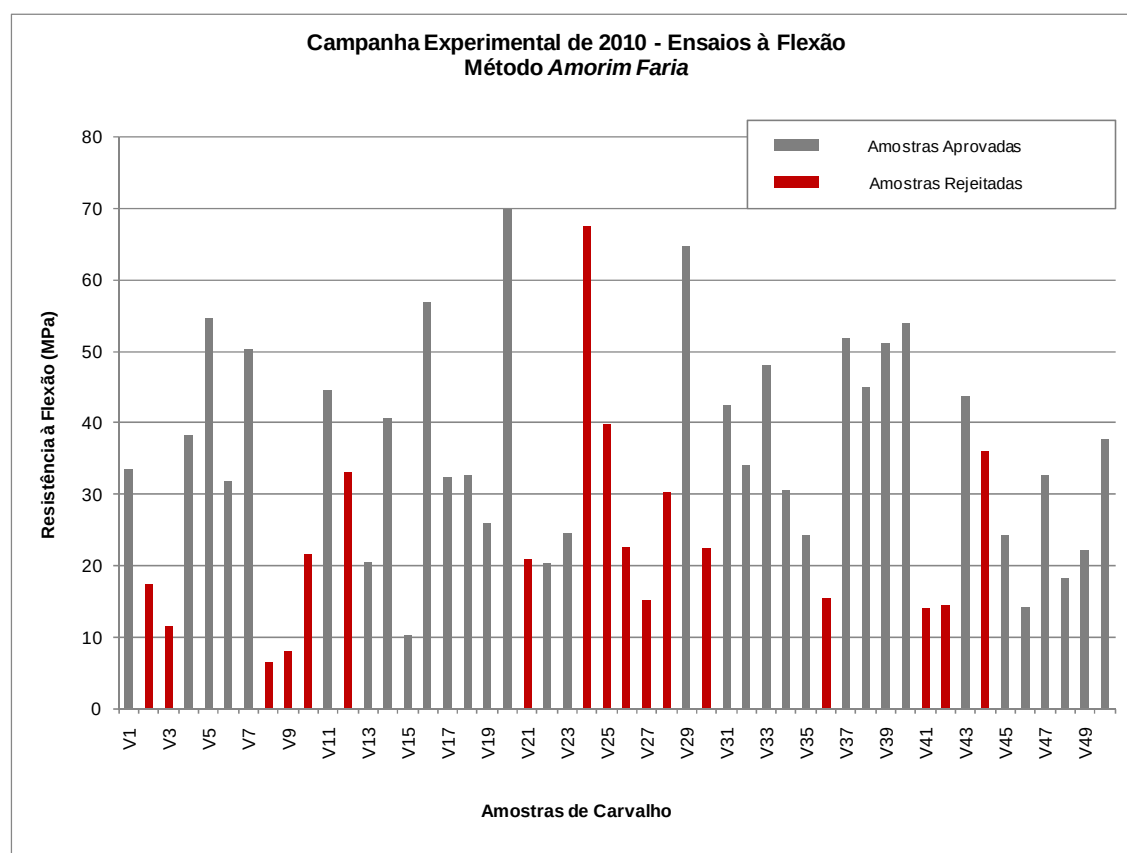


Fig. 4.21 – Método Amorim Faria: resistência à flexão (adaptado de Ramos, 2010).

Pela análise da figura 4.21, verifica-se que a resistência à flexão varia entre 69,8 e 6,5 MPa, às quais correspondem as amostras V20 e V8, respectivamente. A amostra V20 tinha um bom aspecto visual, apresentando apenas um nó de pequena dimensão numa das suas superfícies. Já a amostra V8 apresentava dois nós de grandes dimensões, com 4,0 e 7,0 cm de diâmetro, e vários vazios provocados pela remoção de elementos metálicos (pregos) previamente fixados. A presença de defeitos, em particular o número e dimensão dos nós, justificou os valores resistentes obtidos para as duas amostras anteriormente referidas.

Em muitos casos, verificou-se que a presença de defeitos influenciou o modo de rotura e a sua localização afectou a capacidade resistente de algumas peças. No que diz respeito ao mecanismo de rotura constataram-se vários comportamentos, designadamente:

- Rotura por tracção paralela na zona traccionada;
- Rotura por tracção perpendicular junto à zona dos apoios, induzida por fio inclinado;
- Rotura por tracção perpendicular ao fio, induzida por nó e/ou fenda.

Em relação aos defeitos, verificou-se que o que adquire maior influência na resistência mecânica são os nós, tendo-se constatado que a sua presença a meio vão faz diminuir significativamente a resistência à flexão da amostra ensaiada. As fendas e a degradação interna também diminuem

acentuadamente a resistência dos elementos estruturais de madeira, embora tenham menor influência do que a presença de nós.

Além da avaliação do modo de rotura, é possível fazer um julgamento do comportamento à solicitação das amostras ensaiadas. Dos ensaios à flexão resultaram gráficos força – deslocamento que se tornaram cruciais na avaliação do comportamento das amostras à solicitação. A sobreposição dos gráficos obtidos para cada provete deu origem à figura 4.22, onde é possível confrontar visualmente o comportamento das amostras aprovadas e rejeitadas.

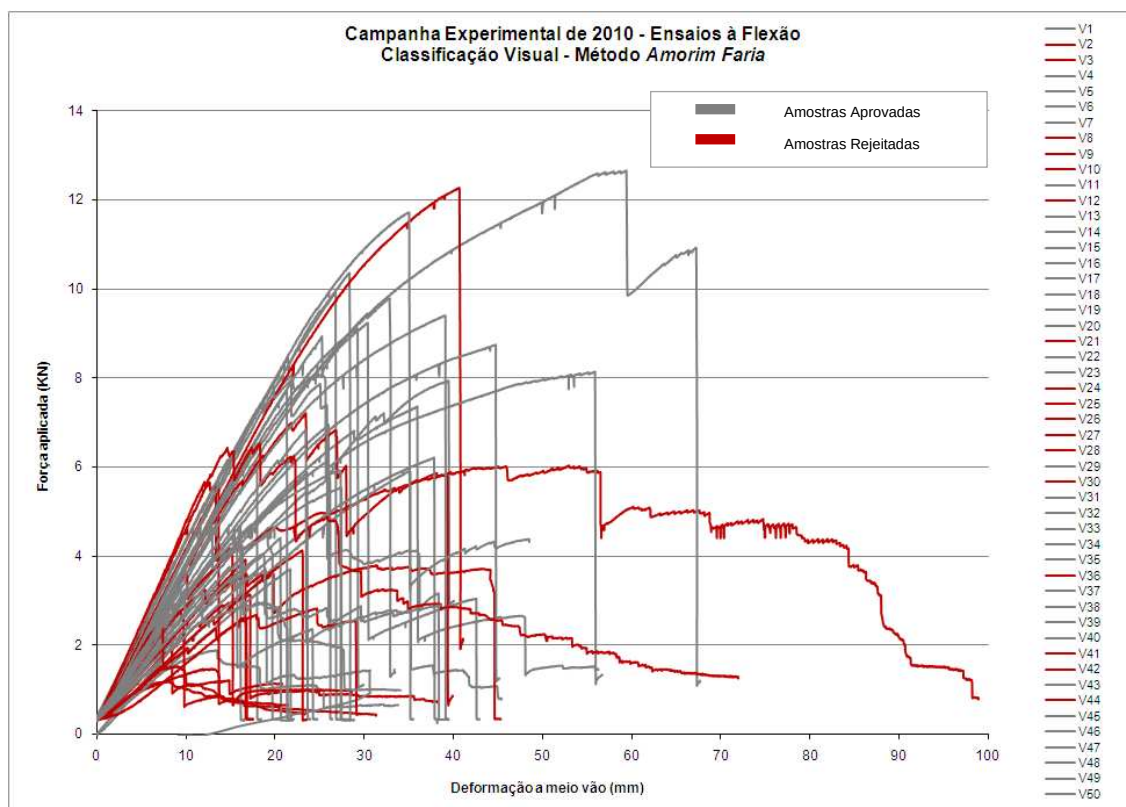


Fig. 4.22 – Método Amorim Faria: gráficos força - deslocamento (adaptado de Ramos, 2010).

A análise da figura 4.22 permite concluir que existe uma gama enorme de comportamentos, revelando o carácter heterogéneo da madeira. Contudo, na generalidade das amostras é visível um comportamento frágil idêntico, ou seja, verifica-se uma quebra repentina da força máxima aplicada sem qualquer tipo de deslocamento associado. Refira-se que existem alguns provetes, nomeadamente os rejeitados, que exibem um comportamento tendencialmente dúctil, chegando a atingir 60,0 a 80,0 mm de deslocamento. À semelhança do que aconteceu na campanha experimental realizada por Samuel Pereira (2009), existem amostras rejeitadas com um bom comportamento e amostras aprovadas com uma fraca capacidade resistente.

4.4. OUTROS TRABALHOS RECENTES EM PORTUGAL

Das campanhas experimentais realizadas na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) resultaram valores mecânicos de resistência para madeira antiga de Carvalho. Com o

objectivo de completar e comparar os resultados obtidos com outros estudos experimentais idênticos, foi realizada uma pesquisa bibliográfica de âmbito nacional, não se tendo encontrado trabalhos relevantes sobre esta espécie florestal com interesse para a presente tese.

O único estudo de avaliação das propriedades mecânicas que incidiu sobre madeira de Carvalho português foi realizado no âmbito da dissertação de Mestrado de Sofia Ramos (2009). No entanto, o estudo referido teve como principal objectivo averiguar o potencial tecnológico desta espécie florestal para revestimento de superfícies e não para fins estruturais.

O trabalho experimental anteriormente referido foi realizado no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) onde existem alguns estudos de diversos autores que caracterizam a madeira de Carvalho português, nomeadamente no que diz respeito à sua estrutura anatómica, composição química e densidade, deixando de parte a sua caracterização mecânica.

Perante o exposto, facilmente se conclui que o conhecimento da capacidade resistente da madeira de Carvalho português é escasso, limitando a possibilidade da sua utilização para fins estruturais. A campanha experimental realizada no âmbito da presente tese vem, de alguma forma, acrescentar conhecimento a uma espécie que no passado adquiriu grande importância e que no presente não é usada e sobre a qual pouco se conhece.

5

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE MADEIRA DE CARVALHO NOVA – CAMPANHA EXPERIMENTAL

5.1. OBJECTIVO

Em Portugal, não se conhecem muitos estudos sobre a resistência mecânica de madeira antiga de Carvalho. Os trabalhos experimentais realizados na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) por Sónia Franco (2008), Samuel Pereira (2009) e Albino Ramos (2010) vieram incrementar o conhecimento sobre a resistência desta espécie florestal, além de terem permitido concluir que a aplicação do método *Amorim Faria* na avaliação das propriedades mecânicas de peças estruturais *in situ* não é viável.

Assim sendo, e no sentido de complementar a investigação referida anteriormente, a campanha experimental realizada no âmbito da presente dissertação serve sobretudo para avaliar as propriedades mecânicas de madeira nova de Carvalho. Os resultados obtidos permitem, por um lado, verificar a aplicabilidade do método *Amorim Faria* na classificação visual de madeira proveniente da serração e, por outro, validar (ou não) os valores propostos pela norma francesa NF B52-001:2007.

Inicialmente, a aplicação do método *Amorim Faria* na classificação visual implicava o conhecimento prévio da massa volúmica (ρ). No entanto, os estudos executados provaram que as propriedades que assumem particular importância são a resistência à flexão (f_m) e o módulo de elasticidade em flexão (E_o), cujo conhecimento serviu de base ao estudo de viabilidade/validação efectuado. Na presente dissertação manteve-se a tónica de avaliação das três propriedades referidas, desta vez usando madeira nova como matéria-prima. A avaliação da propriedade física e das propriedades mecânicas mencionadas seguiram as disposições das normas NP 616:1973 e EN 408:2003, respectivamente, permitindo que os resultados obtidos possam ser correlacionados com outros que tenham seguido os mesmos pressupostos.

Todas as fases da campanha experimental realizada são descritas detalhadamente e sequencialmente no presente capítulo, ou seja, envolve a descrição da preparação e caracterização dos provetes, do processo de classificação visual de acordo com as duas vias supracitadas, dos condicionalismos dos ensaios mecânicos e, finalmente, a interpretação dos mecanismos de rotura. Além disso, fez-se o tratamento estatístico completo dos resultados obtidos para as propriedades físicas e mecânicas já referidas, cujos dados permitiram tirar todas as conclusões dignas de registo.

Resumindo, pretende-se complementar o conhecimento adquirido sobre madeira de Carvalho português, efectuar uma revisão e adequação do método *Amorim Faria* e validar os valores propostos na norma francesa NF B52-001:2007, de modo a poder tirar conclusões de síntese sobre o assunto.

5.2. PREPARAÇÃO DOS PROVETES

O processo de transformação da madeira influencia as propriedades físicas e mecânicas do produto final que, no caso em apreço, se resumiu ao conjunto de amostras usadas na campanha experimental executada no âmbito da presente dissertação. O seu acompanhamento torna-se por isso fundamental para que se identifiquem devidamente as condições a que a madeira foi sujeita e se possa proceder à sua caracterização correcta e completa.

5.2.1. ORIGEM, ABATE E SERRAGEM

Os Cerquinhos que deram origem às amostras usadas na campanha experimental realizada no âmbito da presente dissertação constituíam parte de um povoamento misto de Carvalho português (*Quercus faginea*) e Carvalho negral (*Quercus pyrenaica*) situado na Região do Minho, Norte de Portugal (a cerca de 5 Km a Norte de Braga). Foram abatidas 5 árvores criteriosamente seleccionadas com o objectivo de diminuir os defeitos, nomeadamente a inclinação do fio e o descaio. Ambos os defeitos referidos são provocados por um crescimento excêntrico do tronco da árvore, que geralmente se deve à acção de ventos dominantes. Na figura 5.1 podem ser observados alguns dos Carvalhos abatidos.



Fig. 5.1 - Exemplo de alguns dos Carvalhos abatidos.

O abate dos Carvalhos seleccionados ocorreu em Janeiro de 2011, altura do ano em que a sua actividade biológica é reduzida, tendo sido cortados a 20/30 cm do solo de forma a evitar desperdício de madeira. Posteriormente, procedeu-se à desramação e separou-se a copa do tronco, sendo este dividido em várias partes com comprimentos ligeiramente superiores a 1,90 m. O processo referido designa-se por toragem e permitiu facilitar o transporte do local de produção até ao local de transformação.

As vigas de madeira de Carvalho português usadas nos ensaios à flexão resultaram da serração dos troncos de madeira por meios mecânicos que, no caso em apreço, se resumiram à utilização da serra de

fita. Esta máquina está equipada com fitas de serra que permitiram realizar cortes perfeitamente paralelos, trabalhando sem vibrações e a velocidade constante. A alimentação de toros e o escoamento das peças resultantes da serragem foram executados por dois sistemas independentes acoplados à serra de fita.

A operação de serragem subdividiu o toro por cortes longitudinais e paralelos aos anéis de crescimento, habitualmente designados por cortes tangenciais. De forma a maximizar o número de peças cortadas, e uma vez que as vigas resultantes da serração deveriam possuir a mesma secção transversal, definiu-se previamente um padrão de corte que serviu de referência ao processo mencionado. A figura 5.2 evidencia as rodela (cortes transversais) de alguns dos Carvalhos abatidos sobre as quais incidiram as referidas marcações.



Fig. 5.2 – Rodela (secção transversal) de alguns dos Carvalhos abatidos.

5.2.2. SECAGEM

As propriedades e o comportamento mecânico da madeira são afectados pela maior ou menor presença de água que se apresenta sob três formas diferentes: a água livre, que ocupa os vazios celulares, a água de impregnação, que se liga às paredes celulares por pontes de hidrogénio e forças de Van der Waals, e finalmente a água de constituição, que existe combinada com os constituintes do material lenhoso.

A água livre foi eliminada após o abate, verificando-se que a madeira verde exposta ao ar foi perdendo água de forma rápida e sem qualquer variação dimensional associada. O teor de água (H) correspondente à situação em que toda a água livre foi expulsa, designa-se ponto de saturação das fibras (PSF) e corresponde sensivelmente a 30,0 %. Acima do PSF a diminuição do teor de água não se reflectiu em variações volumétricas, ao contrário do que aconteceu abaixo daquele valor onde as trocas de água originaram retracção e consequentes empenamentos, reflectindo o carácter higroscópico da madeira. A água responsável por este comportamento é a água de impregnação que se encontra ligada quimicamente e, por isso, a quantidade de energia necessária para proceder à sua libertação é manifestamente superior.

É sabido que as trocas de água no domínio higroscópico influenciam as propriedades físicas e mecânicas da madeira que são tanto maiores quanto menor o seu teor em água (Negrão e Faria, 2009). Assim, estabeleceu-se que o teor de água padrão para a determinação das propriedades da madeira corresponde a 12,0 %. Conforme se referiu, a água livre é facilmente expulsa, sobretudo para peças com reduzida secção, já a água impregnada requer uma grande energia para a sua libertação.

Uma vez que os provetes resultantes da serração não estavam secos e se destinavam a determinar propriedades físicas e mecânicas de madeira de Carvalho português, foi necessário libertar a água de impregnação até se atingir o teor de água padrão. A secagem artificial ou em estufa foi a forma

utilizada para se atingir o teor de água pretendido. O funcionamento da estufa e o processo de secagem adoptado no caso em apreço são a seguir descritos com algum detalhe.

A estufa utilizada na diminuição do teor de água dos provetes de Carvalho português usados no âmbito do presente trabalho é composta por três compartimentos, nomeadamente a câmara de secagem, a torre de controlo e o depósito de combustível. A câmara de secagem constitui um espaço isolado e estanque termicamente, onde se cria o clima propício à redução do teor de água da madeira colocada no seu interior. As questões de segurança e de monitorização da temperatura na câmara de secagem e do teor de água das amostras de madeira são efectuadas na torre de controlo. Neste espaço está também presente o sistema de aquecimento que usa o combustível depositado num compartimento anexo. A figura 5.3 esquematiza o aspecto geral de uma estufa de madeira.

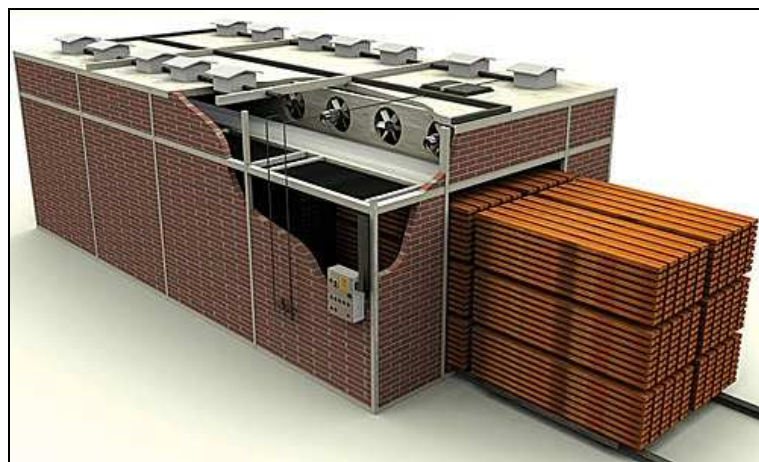


Fig. 5.3 - Aspecto geral de uma estufa para secagem de madeira (fonte: <http://termometalicas.pai.com>).

A climatização da câmara de secagem é feita por um circuito fechado onde circula água previamente aquecida por intermédio de uma caldeira de biomassa automática, permitindo atingir temperaturas na ordem dos 115,0 °C (ver figura 5.4). A uniformização das condições de secagem é assegurada por um sistema de circulação do ar (ventoinhas) que garante que o ar aquecido e com adequada humidade atinge a superfície das peças em secagem e que o ar arrefecido e humedecido pode ser escoado por intermédio de aberturas localizadas no tecto da câmara.

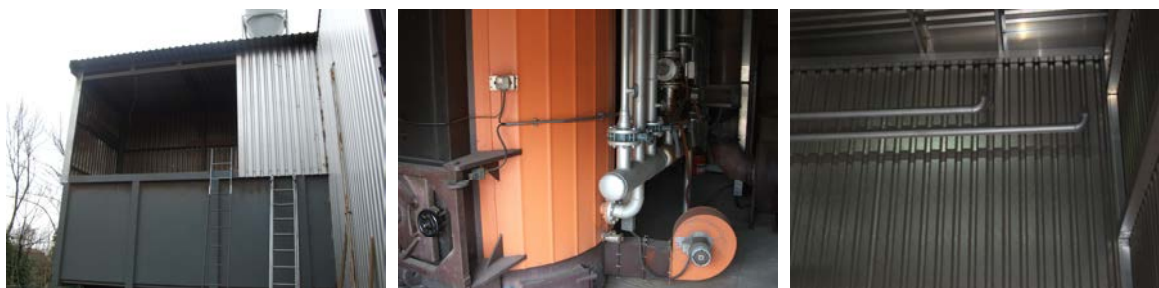


Fig. 5.4 - Sistema de climatização. Esquerda: depósito de resíduos (combustível); Centro: caldeira de biomassa; Direita: circuito fechado de aquecimento da câmara de secagem.

Para que o processo de secagem decorra de forma eficaz é necessário garantir que o ar esteja em contacto com todas as superfícies de cada uma das amostras de forma a acelerar os fenómenos de evaporação, criando condições de migração da água do interior para a periferia de cada uma das peças de madeira. Com esse objectivo, os provetes foram organizados por andares separados por régua de empilhamento, criando condições para que o ar circulasse livremente. Tal como evidencia a figura 5.5, as amostras foram posicionadas a meia altura da câmara de secagem e numa posição que garantiu um contacto intenso com o ar, facilitando os fenómenos de convecção.



Fig. 5.5 - Posicionamento das amostras na câmara de secagem.

Uma das grandes vantagens da secagem artificial consiste num maior controlo do teor de água da madeira. No caso em apreço, esse controlo foi efectuado por sondas eléctricas que foram colocadas até metade da secção de uma das amostras em secagem, registando o valor do teor de água que pode ser lido no quadro de controlo. Considera-se que o teor de água medido para a amostra seleccionada é representativo daquele parâmetro para as restantes.

Apesar da madeira de Carvalho português ser bastante densa e de se perspectivar um ritmo de secagem lento, verificou-se que ao fim de 8 dias a 104,0 °C o teor de água do provete testemunha (M8) já registava 12,4 % (ver figura 5.6). O posicionamento das amostras na câmara de secagem, aliado à sua reduzida secção, justifica que o tempo de secagem tenha sido tão reduzido.



Fig. 5.6 - Monitorização do teor de água. Esquerda: leitura no quadro de controlo ao fim de 8 dias de secagem; Centro: aplicação das sondas eléctricas no provete testemunha; Direita: sonda eléctrica.

Como é sabido, o processo de secagem da madeira cria desequilíbrios e desenvolve tensões que causam perturbações estruturais e químicas e, por isso, não devem ser ignoradas. No caso em apreço, a secagem originou fendas (superficiais e de topo) e deformações que alteraram a geometria de algumas das peças.

Conforme já foi referido, abaixo do PSF a perda de água de impregnação conduz à retracção da madeira, ou seja, as fibras dispostas na direcção longitudinal tendem a aproximar-se ao perderem água, gerando tensões de tracção que conduzem a fissuras nessa direcção. Porém, a retracção da madeira é diferente na direcção tangencial e radial, sendo os movimentos na direcção tangencial cerca do dobro dos movimentos na direcção radial (Cachim, 2007). Esta retracção anisotrópica, aliada a uma secagem rápida, gerou fissuras radiais significativas que atravessavam vários anéis de crescimento e constituíram a causa da distorção e empenamento ligeiro de alguns provetes. A figura 5.7 retrata os defeitos atrás mencionados.



Fig. 5.7 - Defeitos de secagem. Esquerda: fendas longitudinais; Centro: fenda radial; Direita: distorção e empeno.

5.2.3. APLAINAMENTO E MOLDURAGEM

Conforme foi referido, as vigas de madeira secas apresentavam secções distorcidas e empenos ligeiros e, por isso, foi necessário sujeitá-las a um processo que regularizasse as secções e endireitasse o seu eixo axial. Com esse objectivo, as amostras foram aplainadas e molduradas, operações que constituíram a última fase do processo de preparação das amostras.

O aplainamento é uma operação de desgaste que permite obter superfícies planas. Este acabamento só é possível porque todas as faces das peças de madeira passam por um cilindro munido com lâminas posicionadas perpendicularmente ao seu eixo axial. Este cilindro tem movimento contrário ao avanço da peça, permitindo remover porções de lenho sob a forma de aparas. No entanto, a plaina por si só não permite garantir uma grande precisão nas medidas das secções, sendo necessário sujeitar a madeira à molduragem. Além de garantir dimensões precisas, este processo permite corrigir eventuais empenos motivados pela perda de água.

Os ensaios mecânicos à flexão realizados no âmbito do presente trabalho pressupõem que as amostras de Carvalho português apresentassem superfícies perfeitamente paralelas e secções constantes. Tendo em conta os pressupostos referidos, os provetes foram trabalhados numa molduradora munida com plaina que permitiu obter faces ortogonais entre si e superfícies lisas.

5.3. CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

Depois de serem sujeitas a um processo de secagem e posterior aplainamento e molduragem, as amostras de madeira foram acondicionadas no Laboratório de Engenharia Sísmica e Estrutural (LESE) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP). Trata-se de um local coberto e bem ventilado, permitindo que o teor de água (H) de equilíbrio da madeira se mantenha na ordem dos 12,0 % e garantindo a protecção dos provetes aos agentes atmosféricos, em particular a precipitação e a radiação. A figura 5.8 evidencia o local de acondicionamento dos provetes.



Fig. 5.8 - Local de acondicionamento dos provetes no LESE.

Previamente à execução dos ensaios mecânicos à flexão, as amostras tiveram que ser devidamente identificadas e caracterizadas no que respeita às suas dimensões e à sua massa (M), dados fundamentais no cálculo da massa volúmica (ρ).

5.3.1. IDENTIFICAÇÃO E DESCRIÇÃO GERAL

Foram preparados 51 provetes de Carvalho português e, tendo em conta que a madeira era nova, o conjunto foi denominado por lote N . Para uma fácil identificação e diferenciação, todas as amostras foram marcadas com a letra N , seguida do número correspondente à ordem pela qual foram ensaiadas. Por exemplo, à terceira viga ensaiada foi-lhe atribuída a designação $N3$, acontecendo o mesmo às restantes vigas. Após se ter identificado os provetes de acordo com a regra anteriormente mencionada, procedeu-se à numeração das 6 superfícies de todas as vigas. O resultado dos procedimentos referidos pode ser visualizado na figura 5.9.



Fig. 5.9 - Identificação de vigas e numeração de superfícies.

Conforme é perceptível na figura 5.9, os processos de identificação das vigas e de numeração das suas superfícies foram executados com tonalidades distintas, a azul o primeiro e a preto o segundo. A designação atribuída a cada provete foi marcada junto às extremidades das superfícies 3 e 5, habitualmente designadas por faces por apresentarem maior dimensão do que as superfícies 4 e 6, denominadas por cantos. Tendo em conta que os provetes constituem peças de secção prismática, apresentam duas faces, dois cantos e dois topos que, por exclusão de partes, foram numerados com os algarismos 1 e 2.

A identificação e a numeração das superfícies constituíram procedimentos indispensáveis ao processo de classificação visual, pois permitiram associar os defeitos de cada uma das vigas a uma determinada

superfície (face, canto ou topo), auxiliando a análise da relação rotura – defeitos executada numa fase posterior (ver 5.6).

Após terem sido devidamente catalogadas de acordo com a metodologia exposta, as vigas foram medidas e pesadas. Este processo foi fundamental para a determinação da massa volúmica (ρ) e, por isso, é detalhado com maior rigor em 5.3.2. No entanto, adianta-se que das 51 vigas que constituíam o lote *N*, 47 apresentavam dimensões na ordem dos $0,048 \times 0,085 \times 1,90 \text{ m}^3$ e as restantes 4, embora com o mesmo comprimento, tinham secções diferentes com dimensões de $0,048 \times 0,065 \text{ m}^2$.

De uma forma geral, as vigas que constituíam o lote *N* aparentavam um aspecto saudável e robusto, evidenciado pelo relativamente elevado peso sentido no manuseamento de cada um dos provetes. Apresentavam um tom castanho claro sem significativas variações e libertavam um odor característico das madeiras novas. Em termos geométricos e à vista desarmada, verificou-se que as faces, os cantos e os topos eram perfeitamente paralelos, excepção feita às superfícies com descaios que existiam em algumas peças. Além deste defeito, verificou-se a presença de fio inclinado, fendas e sobretudo nós de variadas dimensões que sobressaíam em algumas superfícies.

5.3.2. DETERMINAÇÃO DA MASSA VOLÚMICA

Conforme anteriormente foi mencionado, o carácter higroscópico da madeira permite constantes variações do seu teor de água (*H*) em função das condições do meio em que se insere. Estas variações provocam alterações de massa (*M*) e de volume (*V*) que se reflectem no valor da massa volúmica (ρ). Conclui-se portanto que, para a mesma peça de madeira, aquele parâmetro físico pode variar em função do teor de água no momento da sua determinação.

A massa volúmica constitui um parâmetro físico de enorme importância, se tivermos em conta que se relaciona com a sua resistência mecânica. Contudo, em virtude da grande variabilidade das espécies existentes, não existe uma correlação directa e perfeita entre os parâmetros citados. Apesar das limitações referidas, a massa volúmica continua a ser um dos condicionalismos presentes em algumas normas de classificação visual. Saliente-se que também a versão original do método *Amorim Faria*, aplicado na presente dissertação, impunha limites mínimos para aquele parâmetro físico, sendo por isso essencial a sua avaliação no presente trabalho.

A determinação da massa volúmica dos provetes de madeira de Carvalho português que foram ensaiados à flexão seguiu as especificações da norma NP 616:1973, embora nem todas tenham sido cumpridas, como adiante se verá. De acordo com o documento referido, a massa volúmica corresponde ao quociente entre a massa do provete e o respectivo volume, ambos os valores determinados com o mesmo teor de água. É traduzida pela seguinte expressão:

$$\rho = \frac{M_H}{V_H} \quad (5.1)$$

em que, ρ – Massa volúmica (kg/m^3);

M_H – Massa do provete de madeira para o teor em água *H* (kg);

V_H – Volume do provete de madeira para o teor em água *H* (m^3).

A norma NP 616:1973 refere que o cálculo da massa volúmica deve ser executado sobre provetes de madeira sã e isenta de nós, fendas e outros defeitos e ter, de preferência, forma cúbica de 20,0 mm de aresta. Contudo, e ainda de acordo com a norma citada, podem utilizar-se provetes diferentes do indicado, desde que a sua forma seja prismática e as suas dimensões, em qualquer direcção, estejam compreendidas entre 20,0 e 60,0 mm.

Os provetes usados nos ensaios mecânicos à flexão tinham forma prismática, no entanto, as suas dimensões não estavam compreendidas no intervalo citado na norma, pelo que as especificações mencionadas não foram cumpridas. Além disso, conforme já se referiu, as peças apresentavam defeitos como nós, fendas e descaios, alguns dos quais de grande dimensão. Apesar das especificações presentes na norma não serem cumpridas na sua totalidade, a metodologia usada na determinação da massa volúmica seguiu as suas indicações, considerando que os resultados se aproximam do valor real.

5.3.2.1. Pesagem e medições

O cálculo da massa volúmica, traduzido pela aplicação da expressão 5.1, requer a determinação da massa e do volume que, conforme se referiu anteriormente, devem ser avaliados para o mesmo teor de água. No caso em apreço, embora não se tenha determinado o valor do teor de água, admitiu-se que este parâmetro físico não variou nos processos de pesagem e medição, uma vez que foram executados em instantes consecutivos para cada provete.

A massa foi avaliada com recurso a uma balança digital KERN DS, com capacidade máxima de 36100g, fornecendo os resultados em gramas com uma casa decimal. Os 51 provetes de madeira de Carvalho português foram colocados com especial cuidado sobre a balança referida e devidamente centrados, de forma a não adulterar os resultados fornecidos. A figura 5.10 exemplifica a pesagem de um dos provetes do lote *N*.



Fig. 5.10 – Diferentes perspectivas da pesagem do provete *N1*.

No que diz respeito ao volume, este foi determinado pela multiplicação das três dimensões de cada provete que foram medidas com uma régua metálica, no caso da secção transversal, e com uma fita métrica, no caso do comprimento longitudinal (ver figura 5.11).



Fig. 5.11 – Medição das dimensões do provete N6. Esquerda: medição da altura (h); Centro: medição da largura (b); Direita: medição do comprimento (L).

Note-se, pela análise da figura 5.11, que a medição das dimensões h e b são efectuadas em secções previamente marcadas na peça (a preto). Embora as vigas tenham sido sujeitas aos processos de aplainamento e molduragem, que permitiram definir a dimensão das secções com alguma precisão, entendeu-se que era necessário realizar três medições, uma a meio vão e as restantes duas a 40,0 cm de cada extremidade. Deste modo, para cada provete foram obtidos três valores para b e outros tantos para h , sendo que, em ambos os casos, a dimensão utilizada no cálculo do volume correspondeu ao valor médio. A figura 5.12 evidencia a marcação de uma das secções onde se efectuaram medições num dos provetes do lote N .



Fig. 5.12 - Marcação de uma das secções medidas na viga N6.

As dimensões das três secções mencionadas e do comprimento de cada provete podem ser visualizadas no Anexo I.

5.3.2.2. Resultados obtidos

O conhecimento da massa volúmica permite fazer uma analogia posterior com os resultados obtidos para a resistência mecânica e contribuir para o aprofundamento do conhecimento sobre a madeira de Carvalho português, sustentando (ou não) os intervalos de valores sugeridos por diversos autores.

Depois de se ter obtido a massa e as dimensões dos provetes, facilmente se determina a massa volúmica pela aplicação da expressão 5.1. No quadro 5.1 é possível visualizar os valores mencionados para cada uma das peças. Refira-se que, de acordo com a norma NP 616:1973, os resultados da massa volúmica devem ser apresentados arredondados às centésimas.

Quadro 5.1 - Massa volúmica.

Amostra	M (kg)	Dimensões			ρ (kg/m ³)
		b (cm)	h (cm)	L (m)	
N1	7,42	4,80	8,45	1,90	962,90
N2	7,95	4,80	8,50	1,90	1024,90
N3	7,53	4,80	8,48	1,90	973,53
N4	7,65	4,70	8,50	1,90	1007,84
N5	7,09	4,70	8,48	1,90	936,36
N6	7,85	4,80	8,48	1,90	1015,08
N7	7,76	4,80	8,47	1,90	1004,65
N8	7,26	4,78	8,50	1,90	940,12
N9	7,88	4,80	8,48	1,90	1018,77
N10	7,60	4,77	8,43	1,90	994,66
N11	7,44	4,80	8,47	1,90	963,60
N12	8,06	4,77	8,48	1,90	1049,65
N13	6,94	4,47	8,48	1,90	963,54
N14	7,35	4,80	8,43	1,90	955,83
N15	7,66	4,80	8,50	1,90	987,62
N16	7,29	4,77	8,48	1,90	948,90
N17	7,76	4,80	8,45	1,90	1006,31
N18	7,53	4,80	8,50	1,90	971,81
N19	7,52	4,80	8,45	1,90	975,68
N20	7,35	4,82	8,50	1,90	944,86
N21	7,80	4,80	8,50	1,90	1006,26
N22	6,90	4,73	8,45	1,90	907,31
N23	7,59	4,80	8,50	1,90	979,62
N24	7,32	4,77	8,50	1,90	951,33
N25	7,37	4,80	8,50	1,90	951,17
N26	7,69	4,80	8,48	1,90	993,50
N27	7,71	4,87	8,50	1,90	980,83
N28	7,33	4,82	8,50	1,90	942,16
N29	7,34	4,80	8,45	1,90	952,84
N30	7,53	4,80	8,48	1,90	972,88
N31	7,63	4,80	8,50	1,90	984,84
N32	7,18	4,80	8,50	1,90	926,21
N33	7,46	4,75	8,50	1,90	972,40
N34	7,08	4,80	8,50	1,90	913,31
N35	7,50	4,80	8,45	1,90	973,61
N36	7,71	4,80	8,50	1,90	995,10
N37	7,48	4,80	8,48	1,90	966,87
N38	7,47	4,82	8,50	1,90	959,90
N39	7,74	4,80	8,50	1,90	998,07
N40	7,48	4,78	8,50	1,90	967,63
N41	7,44	4,80	8,50	1,90	959,62
N42	7,33	4,80	8,50	1,90	946,14
N43	8,00	4,85	8,47	1,90	1025,76
N44	7,77	4,80	8,48	1,90	1003,84
N45	6,88	4,80	8,50	1,90	887,25
N46	7,85	4,75	8,47	1,90	1027,33
N47	7,65	4,75	8,45	1,90	1002,74
N48	5,39	4,78	6,50	1,90	912,16
N49	5,99	4,80	6,50	1,90	1009,95
N50	5,50	4,82	6,47	1,90	929,19
N51	5,31	4,73	6,50	1,90	909,13

Analisando o quadro 5.1, facilmente se diferenciam dois grupos fictícios de provetes em termos de massa e de dimensões. Os quatro últimos provetes destacam-se dos restantes porque têm sensivelmente menos 2,0 cm de altura do que a maioria das peças, o que justifica que a sua massa também seja menor. Ambos os grupos evidenciam uma ligeira variação, embora imperceptível a olho nu, das dimensões da secção transversal das peças, o que não acontece com o comprimento longitudinal que é igual para todos os provetes.

O conjunto total dos valores obtidos para a massa volúmica foi sujeito a um tratamento estatístico com o intuito de avaliar a sua dispersão, calculando o valor médio e o valor característico, apesar de este último não adquirir grande importância para a propriedade física em apreço.

Quadro 5.2 - Massa volúmica - Valores estatísticos.

Média	Desvio Padrão	Coeficiente Variação	Valor Característico	Máximo	Mínimo
ρ_{mean}	σ	CV	ρ_k	ρ_{max}	ρ_{min}
(kg/m ³)	(kg/m ³)	(%)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)
971,7	35,5	3,7	913,4	1049,7	887,3

O valor médio obtido para a massa volúmica é de 971,7 kg/m³, com um desvio padrão de apenas 35,5 kg/m³. Este valor conduz a um coeficiente de variação reduzido, aproximando o valor característico do valor médio e revelando uma homogeneidade considerável para o conjunto. Na figura 5.13 é possível visualizar graficamente os valores atingidos por cada provete.

Os resultados obtidos para a massa volúmica enquadram-se no intervalo de valores sugerido por Carvalho (1996) para esta espécie de madeira, que apresenta um limite inferior de 800,0 kg/m³ e um limite superior de 950,0 kg/m³, ambos valores característicos. Note-se que, no caso em apreço, o valor característico aproxima-se do limite superior referido, traduzindo a densidade elevada apresentada pelos provetes do lote *N* e perspectivando-se, desde o início, que a resistência mecânica a determinar seria elevada.

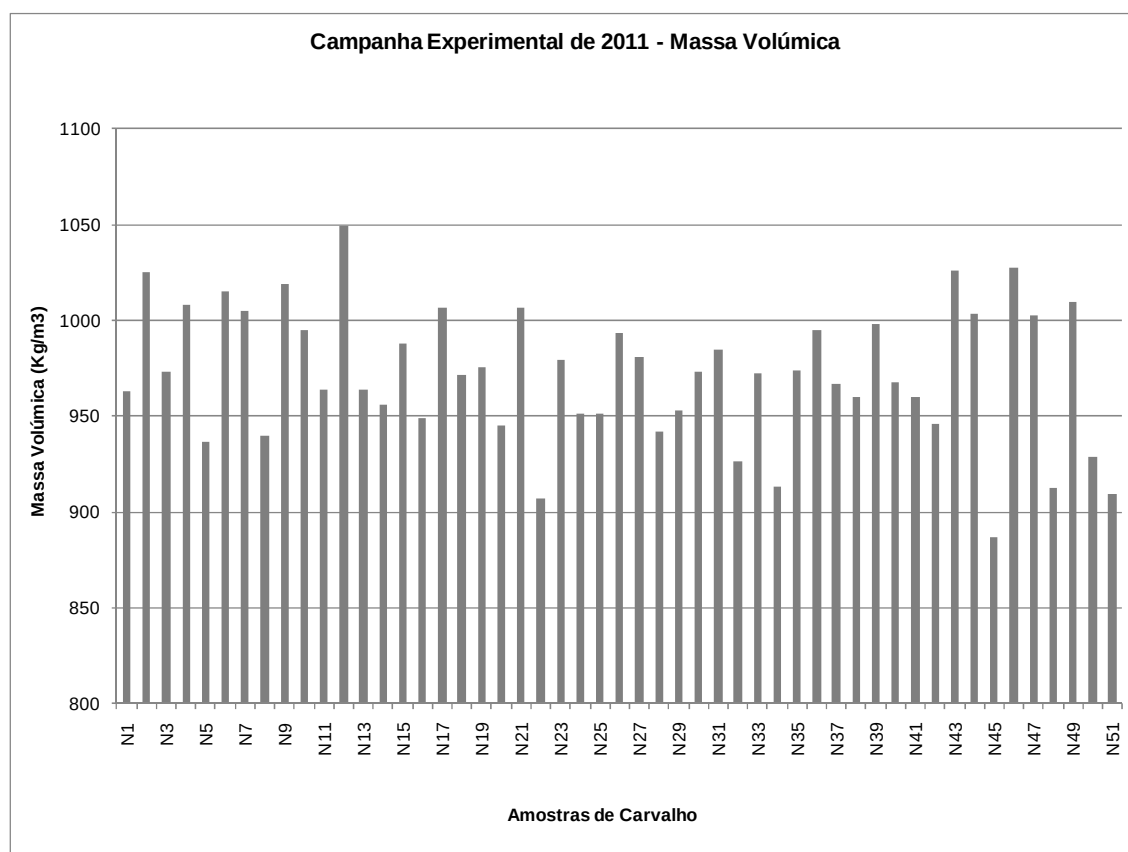


Fig. 5.13 - Massa volúmica.

5.4. CLASSIFICAÇÃO VISUAL

5.4.1. DEFINIÇÃO DOS CRITÉRIOS DE CLASSIFICAÇÃO VISUAL APLICÁVEIS

Os ensaios mecânicos à flexão, efectuados no âmbito do presente trabalho, tinham como objectivo dar um contributo no sentido de aprofundar o conhecimento sobre madeira de Carvalho português, validando (ou não) as propriedades mecânicas correspondentes à classe de qualidade atribuída no processo de classificação visual.

Como é sabido, em Portugal, a única norma de classificação visual que permite atribuir uma determinada classe de qualidade é a NP 4305:1995, apenas aplicável a madeira nova de Pinho bravo português. Assim, no momento de definir o documento normativo que atribuiria uma classe de qualidade aos 51 provetes de madeira de Carvalho português em função dos defeitos presentes em cada um, levantou-se uma problemática a resolver.

Não existindo uma norma nacional de classificação visual aplicável à madeira de Carvalho português, recorreu-se à norma francesa NF B52-001:2007 que classifica a madeira estrutural em três classes de qualidade às quais correspondem outras tantas classes de resistência. Paralelamente à classificação visual com base no documento normativo referido, procedeu-se à atribuição de uma classe de qualidade a cada um dos provetes pelo método *Amorim Faria*. Recorde-se que este método foi desenvolvido para ser usado na inspecção de estruturas de madeira *in situ*, pelo que os motivos que justificam a sua aplicação a madeira nova são desenvolvidos em 5.4.1.2.

O processo de classificação visual pelas duas vias supracitadas teve uma base comum, ou seja, a medição dos defeitos de todos os provetes, nomeadamente os nós, os descaios, as fendas e a inclinação do fio.

5.4.1.1. Norma francesa – NF B52-001:2007

A revisão da norma NF B52-001:1998 deu origem à norma NF B52-001:2007, que constituiu a base do processo de classificação visual dos 51 provetes de madeira de Carvalho português. No que diz respeito à espécie botânica citada, verificaram-se algumas alterações nalguns dos critérios que definem a classe de qualidade. A evolução referida pode ser visualizada no quadro 5.3.

Quadro 5.3 - Alterações na norma francesa NF B52-001 de 1998 para 2007.

NF B52-001:1998				NF B52-001:2007	
Classe de qualidade	1	2	1	2	3
Diâmetro dos nós	Saudável $\varnothing \leq 30 \text{ mm}$ Insalubre $\varnothing \leq 40 \text{ mm}$			$\varnothing < 30 \% (b \text{ ou } h)$ $\varnothing \leq 5 \% (b \text{ ou } h)$	$\varnothing < 45 \% \times (b \text{ ou } h)$ $\varnothing < 15 \% \times (b \text{ ou } h)$
Descaio	$L_d \leq 1/3 L \text{ e } < 100 \text{ cm}$ $d \leq 1/3 (b \text{ ou } h)$		A definir	- Se $L \leq 3 \text{ m}$ Não tolerado - Se $L > 3 \text{ m}$ $d < 10 \% (b \text{ ou } h) \text{ e } L_d < 25 \% L$	$d < 10 \% (b \text{ ou } h) \text{ e } L_d < 35 \% L$ No entanto, se secção $\geq 25/25$: $d < 20 \% (b \text{ ou } h) \text{ e } L_d < 35 \% L$
Inclinação do fio	Local $i \leq 10 \%$ Geral $i \leq 7 \%$	$i \leq 20 \%$ $i \leq 12 \%$		$i \leq 10 \%$ $i \leq 5 \%$	$i \leq 20 \%$ $i \leq 8 \%$
Alterações biológicas	Caruncho Fungos	Admissíveis numa só face Não admissíveis		Não considerado	
Massa volúmica a 20% (kg/m^3)	≥ 800	≥ 800		Não considerado	
Classe de resistência	D35	D30	---	D24	D18

Legenda (sugere-se a consulta simultânea do quadro 5.4):

b – Largura da peça

h – Altura da peça

L – Comprimento da peça

$\varnothing$ – Diâmetro dos nós

L_d – Comprimento do descaio

d – Descaio

i – Inclinação do fio

Analisando o quadro 5.3, verifica-se que a limitação de defeitos é mais exigente na versão de 2007 da norma NF B52-001, nomeadamente no que diz respeito ao descaio e à inclinação do fio. A limitação dos nós também sofreu um rearranjo importante, uma vez que não fazia sentido aceitar nós com 4,0 cm de diâmetro que ocupassem quase a totalidade da largura/altura da peça. Além das alterações

referidas, verifica-se que a classe de resistência atribuída a cada classe de qualidade é manifestamente inferior, revelando uma postura cautelosa e prudente.

Conforme se mencionou, o processo de classificação visual efectuado no âmbito da presente dissertação de Mestrado baseou-se na norma NF B52-001:2007 e, por isso, se dará maior relevo a esta versão. O documento normativo referido atribui às peças estruturais de madeira as classes de qualidade 2 e 3, às quais correspondem as classes de resistência D24 e D18, respectivamente. Note-se que, apesar de existir, a classe de qualidade 1 ainda não está definida e, por isso, não tem qualquer classe de resistência atribuída.

5.4.1.2. Método de avaliação por inspecção visual

O método de avaliação por inspecção visual, designado na presente dissertação por método *Amorim Faria*, foi desenvolvido para averiguar de uma forma prática a capacidade resistente de estruturas de madeira *in situ*. Conforme se evidencia em 3.3.1, a campanha experimental desenvolvida por Albino Ramos (2010) demonstrou que este método é pouco fiável, não aconselhando a sua aplicação a madeira antiga.

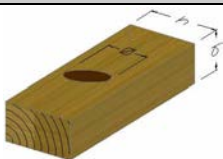
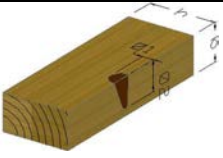
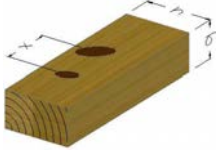
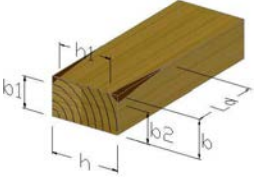
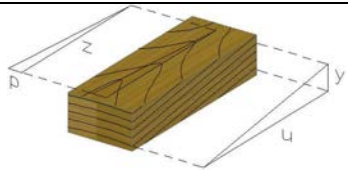
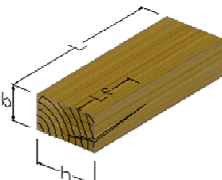
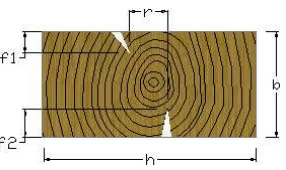
Tendo em conta que o método *Amorim Faria* oferece pouca segurança na avaliação da capacidade resistente de peças estruturais antigas, entendeu-se oportuno averiguar a sua aplicabilidade a madeira estrutural nova, particularmente a madeira de Carvalho português. Deste modo, as 51 vigas que constituíam o lote *N* foram também classificadas de acordo com o método referido, sendo que cada uma recebeu uma das duas classes de qualidade seguintes: *aprovada* ou *rejeitada* (ver quadro 3.6).

A aplicabilidade do método *Amorim Faria* no processo de classificação visual de madeira nova de Carvalho português será averiguada pela confrontação dos valores resistentes propostos pelo método referido (ver quadro 3.7) com os resultados dos ensaios mecânicos realizados no âmbito do presente trabalho. Caso se verifique que a sua utilização é adequada a madeira proveniente da serração, poderá constituir o ponto de partida para o desenvolvimento de uma norma portuguesa de classificação visual que seja aplicável à espécie de madeira em questão.

5.4.2. PROCEDIMENTO DE AVALIAÇÃO E REGISTO DE DEFEITOS

A classificação visual dos 51 provetes de madeira de Carvalho português implicou que fossem medidos e registados todos os defeitos presentes em cada um, nomeadamente os nós, os descaios, as fendas e a inclinação do fio. A sua medição cumpriu os critérios definidos na dissertação de Mestrado de Sónia Franco (2008), os quais seguem as indicações da norma EN 1310:1997. O quadro 5.4 apresenta, de forma muito resumida, as regras de medição presentes na tese mencionada, sugerindo-se a sua consulta nas situações por ele não contempladas.

Quadro 5.4 - Regras de medição de defeitos.

Defeito	Regras de medição – Considerações gerais	Figura esquemática
Nós	- O diâmetro dos nós é medido perpendicularmente ao eixo longitudinal da peça; - Os nós com diâmetro inferior a 1 cm são desprezados;	
	- Os nós de aresta são avaliados na superfície em que a relação $\varnothing_1 / h$ ou $\varnothing_2 / b$ é máxima; - Consideram-se nós agrupados numa das seguintes situações: se $(x \leq 15 \text{ cm para } h \geq 15 \text{ cm})$ ou se $(x < h \text{ para } h < 15 \text{ cm})$; - Nós agrupados avaliam-se através da soma dos seus diâmetros, quando não se sobrepõem, ou pelo diâmetro do conjunto, quando se sobrepõem.	 
	$d = \max \left(\frac{h-h_1}{h}; \frac{b-b_1}{b}; \frac{b-b_2}{b} \right); L_d.$	
Inclinação do fio	- A base mínima para avaliação da inclinação do fio é de 15 cm, medidos paralelamente ao eixo longitudinal da peça; $i = \max (y / u ; p / z).$	
Fendas de secagem	- As fendas são medidas paralelamente ao eixo longitudinal da peça. Caso se trate de um agrupamento de fendas, o comprimento é medido entre os pontos extremos das fendas; - As fendas não são consideradas se: $L_f < (0,25 L \text{ e } 1 \text{ m})$;	 
	- São consideradas fendas repassadas as que se apresentam em superfícies opostas. No entanto, consideram-se fendas não repassadas as que cumprem pelo menos uma das seguintes condições: $r \geq \max (f_1, f_2)$ e/ou $(f_1 + f_2) \leq 2/3 b$; - As fendas repassadas não são admitidas.	

Para cada um dos provetes, os defeitos foram medidos de acordo com as regras constantes no quadro 5.4, sendo posteriormente registados numa ficha tipo. Refira-se que o registo da localização dos defeitos presentes em cada uma das peças também foi acautelado pelo desenho de figuras esquemáticas devidamente cotadas. No Anexo II encontram-se três exemplares das referidas fichas correspondentes a vigas escolhidas aleatoriamente.

A medição do diâmetro dos nós, do descaio e da inclinação do fio foi efectuada com uma régua metálica, enquanto o comprimento das fendas foi medido através de uma fita métrica. Aliás, este foi

também o instrumento de medição usado no levantamento da posição dos defeitos na peça, auxiliando na cotagem das figuras esquemáticas atrás mencionadas. Na figura 5.14 é possível visualizar exemplos de alguns dos defeitos medidos.



Fig. 5.14 - Exemplo de alguns defeitos medidos. Esquerda: nó - provete N44; Centro: descaio - provete N22; Direita: inclinação do fio - provete N45.

De acordo com a norma EN 408:2003, que especifica as condições a satisfazer na determinação das propriedades mecânicas, os provetes ensaiados à flexão devem ter um vão igual a 18 vezes a sua altura (h). Deste modo, em todas as peças foram marcados os locais de apoio que são visíveis nas figuras 5.14 e 5.15. Interessa sobretudo aqui realçar que os defeitos que não estão compreendidos entre estas duas marcações não foram medidos, visto que não têm qualquer influência no comportamento da peça à solicitação. Estas e outras condições do ensaio são abordadas com maior detalhe em 5.5.

Adicionalmente ao preenchimento de uma ficha de classificação visual, procedeu-se ao registo fotográfico de cada um dos provetes. Assim, para cada peça tiraram-se quatro fotografias em perspectiva e duas em alçado, de modo a contemplar todas as suas superfícies. A figura 5.15 exemplifica o tipo de registo fotográfico efectuado.



Fig. 5.15 - Registo fotográfico efectuado para o provete N10.

Repare-se, pela análise da figura 5.15, que é possível visualizar todas as superfícies do provete *N10*, complementando o registo anteriormente efectuado nas fichas de classificação visual. De facto, a correcta e completa caracterização dos provetes de madeira é fundamental na fase de classificação visual e de análise da relação rotura – defeitos (ver 5.6) e, por isso, é importante que ocorra antes dos ensaios mecânicos à flexão.

5.4.3. ATRIBUIÇÃO DE CLASSES DE QUALIDADE E CORRESPONDENTES PROPRIEDADES MECÂNICAS

Depois de terem sido medidos e registados os defeitos presentes em cada um dos 51 provetes de madeira de Carvalho português, foi possível proceder à sua classificação visual. Assim, viga a viga, o registo efectuado na ficha tipo para cada um dos defeitos (nós, descaio, inclinação do fio e fendas) foi confrontado com o respectivo limite máximo definido pela norma NF B52-001:2007 (ver quadro 5.3) e pelo método *Amorim Faria* (ver quadro 3.6), resultando na atribuição de duas classes de qualidade a cada provete.

A cada classe de qualidade estão associados valores para as propriedades mecânicas de resistência e de rigidez, em particular a resistência à flexão ($f_{m,k}$) e o módulo de elasticidade ($E_{0,mean}$). A atribuição da classe de qualidade a cada um dos provetes pelas duas vias supracitadas, assim como as correspondentes propriedades mecânicas podem ser visualizadas no quadro 5.5.

De acordo com o quadro referido, comparando as duas vias de classificação usadas, verifica-se que a percentagem de provetes rejeitados é cerca de 67,0 % pela aplicação da norma NF B52-001:2007 e aproximadamente 41,0 % no caso da aplicação do método *Amorim Faria*. Conclui-se, portanto, que esta última via de classificação visual é menos exigente do que a documento francês citado, uma vez que este não permite a utilização como elemento estrutural de uma grande fatia de provetes do lote *N* (a maior parte devido a problemas com nós).

Os valores das propriedades mecânicas atribuídas a cada um dos provetes serão posteriormente comparados com os resultados dos ensaios mecânicos à flexão. Esta análise servirá para aprovar (ou não) os valores propostos pela norma francesa NF B52-001:2007 e permitirá averiguar a aplicabilidade do método *Amorim Faria* à classificação visual de madeira nova.

Quadro 5.5 - Classificação visual e correspondentes propriedades mecânicas.

Amostra	Método Amorim Faria				Norma NF B52-001:2007	
	Classe de qualidade	Propriedades mecânicas		Classe de qualidade	Propriedades mecânicas	
		$f_{m,k}$ (MPa)	$E_{0,mean}$ (GPa)		$f_{m,k}$ (MPa)	$E_{0,mean}$ (GPa)
N1	A	21,0	8,0	R	-	-
N2	A	21,0	8,0	R	-	-
N3	A	21,0	8,0	A (3)	18,0	9,0
N4	R	-	-	R	-	-
N5	A	21,0	8,0	A (3)	18,0	9,0
N6	R	-	-	R	-	-
N7	A	21,0	8,0	A (3)	18,0	9,0
N8	R	-	-	R	-	-
N9	A	21,0	8,0	A (3)	18,0	9,0
N10	A	21,0	8,0	R	-	-
N11	A	21,0	8,0	A (2)	24,0	11,0
N12	R	-	-	R	-	-
N13	R	-	-	R	-	-
N14	A	21,0	8,0	A (3)	18,0	9,0
N15	A	21,0	8,0	R	-	-
N16	A	21,0	8,0	A (3)	18,0	9,0
N17	R	-	-	R	-	-
N18	A	21,0	8,0	R	-	-
N19	A	21,0	8,0	A (3)	18,0	9,0
N20	A	21,0	8,0	R	-	-
N21	A	21,0	8,0	A (3)	18,0	9,0
N22	R	-	-	R	-	-
N23	R	-	-	R	-	-
N24	A	21,0	8,0	R	-	-
N25	R	-	-	R	-	-
N26	R	-	-	R	-	-
N27	R	-	-	R	-	-
N28	R	-	-	R	-	-
N29	A	21,0	8,0	R	-	-
N30	A	21,0	8,0	A (3)	18,0	9,0
N31	A	21,0	8,0	R	-	-
N32	A	21,0	8,0	A (2)	24,0	11,0
N33	A	21,0	8,0	R	-	-
N34	R	-	-	R	-	-
N35	A	21,0	8,0	A (3)	18,0	9,0
N36	A	21,0	8,0	R	-	-
N37	A	21,0	8,0	R	-	-
N38	R	-	-	R	-	-
N39	R	-	-	R	-	-
N40	A	21,0	8,0	A (2)	24,0	11,0
N41	A	21,0	8,0	A (3)	18,0	9,0
N42	R	-	-	R	-	-
N43	R	-	-	R	-	-
N44	R	-	-	R	-	-
N45	R	-	-	R	-	-
N46	A	21,0	8,0	A (2)	24,0	11,0
N47	R	-	-	R	-	-
N48	A	21,0	8,0	A (3)	18,0	9,0
N49	A	21,0	8,0	R	-	-
N50	R	-	-	R	-	-
N51	A	21,0	8,0	A (2)	24,0	11,0

Legenda: A – Aprovada (classe de qualidade – ver quadro 5.3); R – Rejeitada.

5.5. ENSAIOS MECÂNICOS

A classificação visual pelo método *Amorim Faria* e pela norma NF B52-001:2007 permitiu a atribuição de duas classes de qualidade a cada um dos provetes, às quais correspondem propriedades de resistência e de rigidez (ver quadro 5.5). Com o objectivo de sustentar os valores propostos pelas vias supracitadas e de incrementar o conhecimento sobre madeira de Carvalho português, realizaram-se ensaios mecânicos à flexão que permitiram determinar a resistência à flexão (propriedade de resistência) e o módulo de elasticidade em flexão (propriedade de rigidez), além de terem possibilitado averiguar o mecanismo de rotura de cada peça.

A campanha experimental decorreu no Laboratório de Engenharia Sísmica e Estrutural (LESE) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) e seguiu as indicações presentes na norma EN 408:2003. Este documento especifica as condições e métodos de ensaio usados na determinação das propriedades da madeira, garantindo que os resultados obtidos possam ser correlacionados com outros que tenham seguido os mesmos pressupostos. As principais especificações presentes na norma referentes aos provetes de ensaio dizem respeito a aspectos que os caracterizam, designadamente:

- Dimensões - se a largura (b) e/ou a altura (h) dos provetes variarem, estas dimensões devem obter-se pela média das três medições feitas em posições diferentes ao longo da peça, mas sempre afastadas do topo não menos do que 15,0 cm;
- Teor de água (H) – Determinado de acordo com a EN 13183-1:2002 sobre a totalidade da peça, que deve ser isenta de defeitos;
- Massa volúmica (ρ) – Determinada antes do ensaio e após condicionamento, avaliando a massa e o volume da totalidade da peça, que deve ser isenta de defeitos;
- Condicionamento – Os ensaios devem ser realizados sobre provetes condicionados sob o ambiente normalizado de $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ e $(65 \pm 5 \%)$ de humidade relativa.

É importante salientar que apenas a medição das dimensões dos provetes cumpriu a totalidade das indicações presentes na EN 408:2003. Assim, a determinação do teor de água e da massa volúmica não seguiu as disposições mencionadas, desde logo, pela presença de defeitos nos provetes ensaiados. No que diz respeito ao condicionamento, como adiante se verá, a temperatura do local de ensaio registou valores superiores aos sugeridos pela norma.

Adicionalmente a todas estas especificações, a norma EN 408:2003 estabelece o esquema de ensaio e indica várias disposições a cumprir na sua realização. O setup de ensaio e o procedimento adoptado na campanha experimental realizada no âmbito da presente dissertação de Mestrado é de seguida descrito com maior rigor.

5.5.1. SETUP DE ENSAIO

De acordo com a norma EN 408:2003, a peça a ensaiar, simplesmente apoiada, deve ter um comprimento mínimo (L_{min}) de 19 vezes a altura (h) da sua secção e ser carregada simetricamente em flexão em dois pontos de um vão igual a 18 vezes aquela altura. Contudo, nos casos em que a peça ou o equipamento não permitam que tais condições sejam satisfeitas, é permitido que a distância entre os pontos de aplicação das forças e os apoios possa ser alterada de um valor não superior a 1,5 vezes a altura da secção. Além do referido, é admitido que o vão (l) possa ser alterado de um valor não superior a três vezes aquela altura, garantindo sempre que a simetria do ensaio é cumprida. A figura 5.16 representa o esquema de ensaio preconizado na norma mencionada com as devidas tolerâncias.

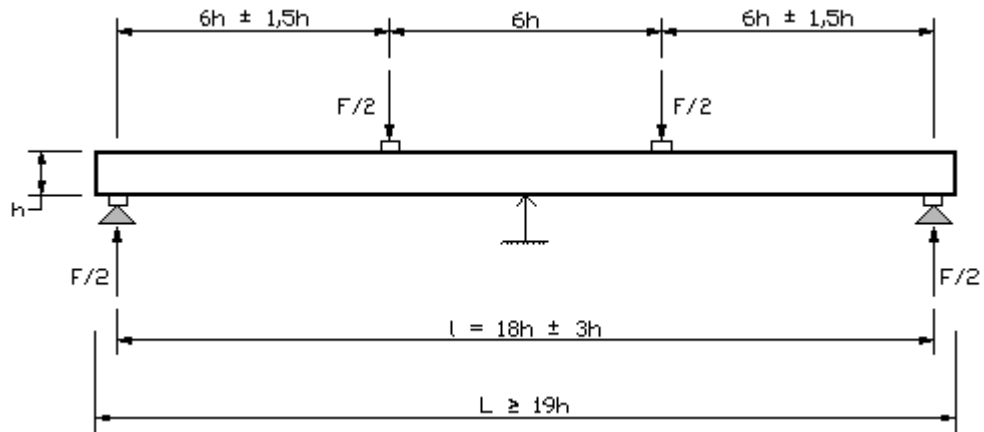


Fig. 5.16 - Esquema de ensaio da norma EN 408:2003.

No caso em apreço foram cumpridas as condições geométricas estabelecidas na figura 5.16, em particular a distância de aplicação das cargas, o vão e o comprimento mínimo da peça, conferindo assim simetria ao esquema de ensaio. Refira-se que, pelo facto de existirem dois grupos fictícios de provetes que apenas se diferenciam pela altura da sua secção, o setup de ensaio adquiriu dois formatos que podem ser visualizados na figura 5.17.

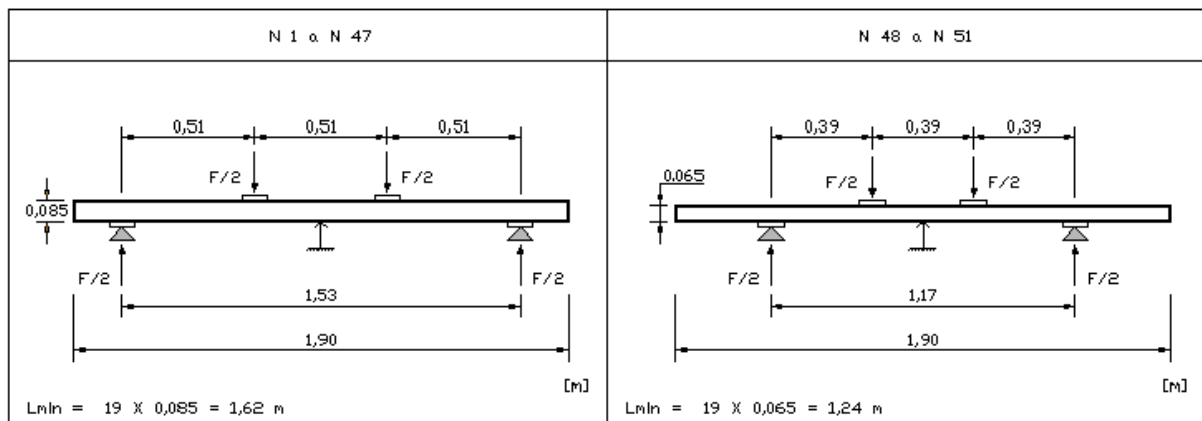


Fig. 5.17 - Esquemas de ensaio adoptados na campanha experimental.

Os esquemas de ensaio presentes na figura 5.17 foram materializados através de um pórtico com peças amovíveis, permitindo ajustar os vãos de ensaio previamente estabelecidos (ver figura 5.18). A estrutura metálica mencionada era munida de um actuador hidráulico capaz de exercer uma força até 200 kN e que possuía internamente um transdutor de deslocamento. O sistema mecânico referido foi controlado através de um sistema electrónico, cuja interface de contacto com o operador foi o Programa de Ensaio e Controlo de Actuadores (PECA), usado também para a aquisição de dados relativos ao ensaio, nomeadamente a carga aplicada e o respectivo deslocamento, processo garantido de forma contínua ao longo do ensaio.



Fig. 5.18 - Esquema de ensaio real. Esquerda: alçado; Centro: perspectiva; Direita: vista lateral.

A força exercida pelo actuador hidráulico durante os ensaios foi lida sucessivamente por uma célula de carga com capacidade máxima de 300 kN, sendo posteriormente subdividida em duas cargas de igual valor através de um perfil tubular. A transmissão de cada uma das cargas mencionadas aos terços da peça ensaiada foi estabelecida por intermédio de dois elementos metálicos devidamente posicionados. Entre o actuador hidráulico, responsável pelo incremento da carga, e o perfil tubular que divide a solicitação em duas forças iguais, foi colocada uma chapa metálica com o objectivo de assegurar um melhor ajustamento e, por isso, uma transmissão de carga mais eficaz. Os aspectos atrás mencionados podem ser visualizados na figura 5.19.



Fig. 5.19 - Sistema de solicitação.

Um outro dado que assume grande importância neste tipo de ensaios e que é crucial no cálculo do módulo de elasticidade global em flexão ($E_{m,g}$) é o deslocamento (w). A sua leitura foi assegurada por um sensor de deslocamento linear, designado por LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*), que foi estrategicamente posicionado a meio vão e que se agarrava ao provete através de um elemento metálico rectangular fixado a cada uma das peças. Tendo em conta que o pórtico funciona como reacção à força exercida pelo actuador, facto que poderia adulterar os dados recolhidos pelo transdutor, foi criada uma plataforma de madeira assente sobre dois tripés de modo a que o equipamento referido tivesse apoio numa base que não apresentasse qualquer tipo de vibração. Na figura 5.20 é possível visualizar os cuidados tidos na instalação e fixação do LVDT.



Fig. 5.20 - Medição de deslocamentos. Esquerda: LVDT; Centro: tripé de apoio; Direita: peça de fixação à viga.

O setup de ensaio preconizado na norma EN 408:2003 e esquematizado na figura 5.16 pressupõe que as peças a ensaiar estão simplesmente apoiadas. Conforme evidencia a figura 5.21, a materialização das condições de apoio referidas foram estabelecidas por intermédio de elementos metálicos cilíndricos que permitiram a livre rotação da peça no momento da solicitação.



Fig. 5.21 - Materialização dos apoios. Esquerda: vista geral; Centro: pormenor do apoio esquerdo; Direita: pormenor do apoio direito.

Tendo em conta que a madeira é um material heterogéneo que pode apresentar roturas frágeis, foi necessário tomar medidas de precaução que garantissem a segurança dos operadores e a integridade dos equipamentos. O perfil metálico usado na divisão da força em duas cargas de igual valor foi devidamente amarrado ao pórtico com uma corda, evitando assim a sua queda que poderia causar danos materiais e mesmo colocar em causa a segurança dos técnicos do laboratório. Adicionalmente a esta medida, e com o intuito de proteger o LVDT, foram colocadas tábuas de madeira sob a peça ensaiada, garantindo que, em caso de rotura frágil, o equipamento referido não seria afectado por fragmentos do provete (ver figura 5.21 – esquerda).

5.5.2. PROCEDIMENTO DE ENSAIO

Os ensaios mecânicos à flexão foram executados durante três dias em condições de temperatura e humidade relativa mais ou menos constantes, atingindo, em média, 24,0 °C e 60,0 %, respectivamente. Estes valores permitiram que o teor de água (H) dos provetes ensaiados rondasse os 12,0 %, conforme se verificou pelas leituras pontuais efectuadas com *Humidímetro*.

Os provetes foram ensaiados de acordo com a sua designação, ou seja, a primeira peça a ser solicitada foi a $N1$ e a última correspondeu à $N51$. Cada um deles foi colocado sobre os apoios, respeitando as marcas previamente marcadas (ver figura 5.21) e procurando que o seu eixo longitudinal ficasse

perpendicular ao eixo do cilindro metálico que materializava cada um dos apoios. Com o objectivo de facilitar a análise posterior da relação rotura – defeitos, todas as peças foram solicitadas na mesma posição, ou seja, com a face 3 sempre voltada para a câmara de filmar (ver figura 5.21).

Após as peças estarem devidamente posicionadas, procedeu-se à fixação do perfil metálico a meio vão ao qual se amarrou o fio do LVDT, seguindo-se a marcação dos pontos de aplicação das cargas. Depois de terem sido colocados os elementos metálicos que permitiram a divisão da força aplicada, ajustou-se o actuador hidráulico até imobilizar a chapa utilizada no ajuste.

A primeira amostra ensaiada foi carregada à velocidade constante de 0,10 mm/s. No entanto, o período até se atingir a carga máxima ultrapassou o intervalo (300 ± 120) s definido na norma. Desta forma, e de acordo com as indicações da norma EN 408:2003, a velocidade foi ajustada para 0,20 mm/s com o intuito de reduzir esse período, não se verificando posteriores irregularidades.

Os ensaios foram prolongados após se ter atingido a carga máxima com o objectivo de verificar o comportamento da peça à solicitação, não existindo, porém, um momento preciso que determinasse a sua conclusão. A monitorização dos ensaios foi acompanhada pela visualização num monitor de um gráfico força – deslocamento, que ia sendo desenhado instantaneamente e que permitiu estabelecer o fim do carregamento, tal como evidencia a figura 5.22.



Fig. 5.22 - Monitorização do ensaio. Esquerda: aquisição de dados; Direita: gráfico força – deslocamento.

Todos os ensaios foram filmados, registando-se fotograficamente o comportamento de cada viga ao carregamento até ocorrer a sua rotura. Este procedimento permitiu interpretar numa fase posterior a rotura de cada um dos provetes, que poderá ou não ter sido influenciada pela presença de defeitos. Esta análise é efectuada com detalhe no ponto seguinte.

5.6. INTERPRETAÇÃO DOS ENSAIOS

A campanha experimental efectuada permitiu recolher dados que possibilitaram a determinação de propriedades mecânicas importantes. Contudo, para se compreender o comportamento de um determinado material, neste caso a madeira, é necessário também perceber os seus modos de rotura. Assim, numa primeira fase, é preciso conhecer a distribuição de esforços na peça e só depois avaliar o motivo que originou o início da cedência.

É sabido que a existência de defeitos na madeira influencia significativamente o seu mecanismo de rotura e só fazendo um acompanhamento exaustivo dos ensaios de cada uma das vigas é possível estabelecer relações defeito – rotura. É precisamente aqui que o preenchimento das fichas de classificação visual e o registo fotográfico efectuada para cada um dos provetes constituem elementos cruciais de apoio.

A causa inicial da rotura por flexão depende da grande variabilidade da madeira e da ocorrência de singularidades e defeitos, não existindo, por isso, um padrão único de rotura, mesmo quando a solicitação é semelhante. O quadro 5.6 apresenta o resultado da análise e estudo do modo de rotura verificado em cada uma das peças, onde, para melhor síntese das ocorrências, se entendeu classificar as roturas em quatro tipos, designadamente:

- Rotura do tipo A – Caracteriza-se pelo esmagamento das fibras comprimidas que aumenta progressivamente à medida que a curvatura se acentua, originando a descida do eixo neutro e o aumento das tensões de tracção até se atingir o limite da capacidade resistente da peça à tracção. No entanto, em alguns casos, este limite é atingido antes da rotura por compressão, facilitado por uma ligeira inclinação do fio que permite o destacamento de parte da peça;
- Rotura do tipo B – Necessariamente induzida pela existência de fio inclinado, ao qual está associada a presença de um ou vários nós que interferem na trajectória das tensões de tracção, provocando roturas frágeis por tracção perpendicular ao fio por vezes seguidas por outros tipos de roturas (em geral compressão e tracção paralelas);
- Rotura do tipo C – Induzida principalmente pela presença de um ou vários nós que influenciam significativamente o modo de rotura. A sua presença na parte inferior da viga (zona traccionada) é indiscutivelmente prejudicial, tendo em conta que constitui uma interrupção ao prolongamento das fibras responsáveis por resistir às tracções. Nestas condições, a secção útil da peça fica necessariamente reduzida, precipitando a rotura;
- Rotura do tipo D – Provocada essencialmente pela presença de fio acentuadamente inclinado, permitindo um destacamento prévio das fibras traccionadas que vai seguindo a direcção do fio à medida que a solicitação aumenta. Este fenómeno vai diminuindo progressivamente a secção útil resistente, conduzindo ao esgotamento precoce da capacidade resistente da peça.

As roturas do tipo A e C foram as que ocorreram mais frequentemente, a primeira sobretudo no terço central, a segunda tendencialmente junto aos nós com maior diâmetro posicionados na metade inferior da secção transversal. A rotura do tipo D sucedeu preferencialmente fora do terço central e, finalmente, a rotura do tipo B, pelo facto de ter ocorrido apenas quatro vezes, não evidenciou qualquer tendência.

Quadro 5.6 – Análise dos mecanismos de rotura.

Viga	Classificação visual		Interpretação da rotura	Fotografia
	Amorim Faria	NF B52-001:2007		
N1	Aprovada	Rejeitada	▪ Provocada por inclinação do fio e nó ▪ Fora do terço central	
		Motivo: nós	▪ Rotura do tipo A	

N2	Aprovada	Rejeitada Motivo: nós	- Induzida por inclinação do fio - No terço central - Rotura do tipo D	
N3	Aprovada	Aprovada (3)	- Provocada por inclinação do fio e nó - Fora do terço central - Rotura do tipo D	
N4	Rejeitada Motivo: nós	Rejeitada Motivo: nós	- Induzida por nó - No terço central - Rotura do tipo C	
N5	Aprovada	Aprovada (3)	- Provocada por inclinação do fio - No terço central - Rotura do tipo A	
N6	Rejeitada Motivo: nós	Rejeitada Motivo: nós	- Induzida por nó - Fora do terço central - Rotura do tipo C	
N7	Aprovada	Aprovada (3)	- Provocada por fio inclinado - No terço central - Rotura do tipo A	
N8	Rejeitada Motivo: nós	Rejeitada Motivo: nós	- Induzida por nó - Na zona de aplicação de uma das cargas - Rotura tipo A	

N9	Aprovada	Aprovada (3)	▪ Provocada por fio inclinado ▪ Na zona de aplicação de uma das forças ▪ Rotura do tipo A	
N10	Aprovada	Rejeitada Motivo: nós	▪ Induzida por inclinação do fio e nó ▪ Na zona de aplicação de uma das forças ▪ Rotura do tipo B	
N11	Aprovada	Aprovada (2)	▪ Provocada por nó ▪ Na zona de aplicação de uma das cargas ▪ Rotura do tipo C	
N12	Rejeitada Motivo: nós e inclinação do fio	Rejeitada Motivo: nós e inclinação do fio	▪ Induzida por nó ▪ Fora do terço central ▪ Rotura do tipo C	
N13	Rejeitada Motivo: nós e inclinação do fio	Rejeitada Motivo: nós e inclinação do fio	▪ Provocada por inclinação do fio e nó ▪ Na zona de aplicação de uma das forças ▪ Rotura do tipo B	
N14	Aprovada	Aprovada (3)	▪ Induzida por inclinação do fio e nó ▪ Fora do terço central ▪ Rotura do tipo D	
N15	Aprovada	Rejeitada Motivo: nós	▪ Provocada por inclinação do fio e nó ▪ Na zona de aplicação de uma das cargas ▪ Rotura do tipo C	

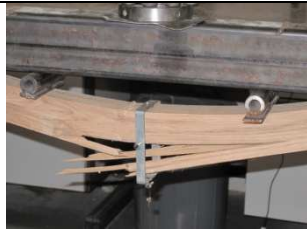
N16	Aprovada	Aprovada (3)	- Induzida por inclinação do fio e nó - Fora do terço central - Rotura do tipo D	
N17	Rejeitada Motivo: inclinação do fio	Rejeitada Motivo: inclinação do fio	- Provocada por nó - No terço central - Rotura do tipo C	
N18	Aprovada	Rejeitada Motivo: nós e descaio	- Induzida por inclinação do fio - Na zona de aplicação de uma das forças - Rotura do tipo D	
N19	Aprovada	Aprovada (3)	- Provocada por nó - Na zona de aplicação de uma das cargas - Rotura do tipo C	
N20	Aprovada	Rejeitada Motivo: nós	- Induzida por inclinação do fio e nó - Fora do terço central - Rotura do tipo B	
N21	Aprovada	Aprovada (3)	- Provocada por inclinação do fio - Na zona de aplicação de uma das forças - Rotura do tipo A	
N22	Rejeitada Motivo: nós e descaio	Rejeitada Motivo: nós e descaio	- Provocada por nó e descaio - Na zona de aplicação de uma das cargas - Rotura do tipo C	

N23	Rejeitada Motivo: nós	Rejeitada Motivo: nós	- Induzida por nó - Na zona de aplicação de uma das forças - Rotura do tipo C	
N24	Aprovada	Rejeitada Motivo: nós	- Provocada por nó - Na zona de aplicação de uma das cargas - Rotura do tipo C	
N25	Rejeitada Motivo: inclinação do fio	Rejeitada Motivo: inclinação do fio	- Provocada por inclinação do fio - No terço central - Rotura do tipo A	
N26	Rejeitada Motivo: nós	Rejeitada Motivo: nós	- Induzida por nó - Fora do terço central - Rotura do tipo C	
N27	Rejeitada Motivo: nós	Rejeitada Motivo: nós	- Provocada por inclinação do fio - Na zona de aplicação de uma das forças - Rotura do tipo A	
N28	Rejeitada Motivo: nós	Rejeitada Motivo: nós e descaio	- Não induzida por defeitos - No terço central - Rotura do tipo A	
N29	Aprovada	Rejeitada Motivo: nós	- Provocada por nó - No terço central - Rotura do tipo C	

N30	Aprovada	Aprovada (3)	- Induzida por inclinação do fio - No terço central - Rotura do tipo D	
N31	Aprovada	Rejeitada Motivo: nós	- Provocada por inclinação do fio - Na zona de aplicação de uma das cargas - Rotura do tipo A	
N32	Aprovada	Aprovada (2)	- Induzida por inclinação do fio - No terço central - Rotura do tipo A	
N33	Aprovada	Rejeitada Motivo: nós	- Não provocada por defeitos - No terço central - Rotura do tipo A	
N34	Rejeitada Motivo: inclinação do fio	Rejeitada Motivo: inclinação do fio e descaio	- Induzida por inclinação do fio - Na zona de aplicação de uma das forças - Rotura do tipo A	
N35	Aprovada	Aprovada (3)	- Provocada por inclinação do fio - Fora do terço central - Rotura do tipo B	
N36	Aprovada	Rejeitada Motivo: nós	- Induzida por nó - No terço central - Rotura do tipo C	

N37	Aprovada	Rejeitada Motivo: nós	▪ Provocada por nó ▪ No terço central ▪ Rotura do tipo C	
N38	Rejeitada Motivo: inclinação do fio	Rejeitada Motivo: nós e inclinação do fio	▪ Induzida por nó ▪ Fora do terço central ▪ Rotura do tipo C	
N39	Rejeitada Motivo: inclinação do fio	Rejeitada Motivo: nós e inclinação do fio	▪ Provocada por inclinação do fio e nó ▪ Na zona de aplicação de uma das cargas ▪ Rotura do tipo C	
N40	Aprovada	Aprovada (2)	▪ Induzida por inclinação do fio ▪ No terço central ▪ Rotura do tipo A	
N41	Aprovada	Aprovada (3)	▪ Provocada por inclinação do fio ▪ Na zona de aplicação de uma das forças ▪ Rotura do tipo A	
N42	Rejeitada Motivo: nós	Rejeitada Motivo: nós	▪ Induzida por inclinação do fio e nó ▪ Na zona de aplicação de uma das cargas ▪ Rotura do tipo C	
N43	Rejeitada Motivo: nós	Rejeitada Motivo: nós	▪ Provocada por nó ▪ Fora do terço central ▪ Rotura do tipo C	

N44	Rejeitada Motivo: nós	Rejeitada Motivo: nós	- Induzida por nó - Fora do terço central - Rotura do tipo C	
N45	Rejeitada Motivo: nós	Rejeitada Motivo: nós	- Provocada por inclinação do fio - Na zona de aplicação de uma das forças - Rotura do tipo A	
N46	Aprovada	Aprovada (2)	- Não induzida por defeitos - No terço central - Rotura do tipo A	
N47	Rejeitada Motivo: inclinação do fio	Rejeitada Motivo: inclinação do fio	- Provocada por inclinação do fio - Na zona de aplicação de uma das cargas - Rotura do tipo D	
N48	Aprovada	Aprovada (3)	- Induzida por inclinação do fio - Na zona de aplicação de uma das forças - Rotura do tipo A	
N49	Aprovada	Rejeitada Motivo: nós	- Não provocada por defeitos - No terço central - Rotura do tipo A	
N50	Rejeitada Motivo: nós	Rejeitada Motivo: nós	- Induzida por nó - No terço central - Rotura do tipo C	

N51	Aprovada	Aprovada (2)	▪ Não induzida por defeitos ▪ No terço central ▪ Rotura do tipo A	

Legenda:

Rotura do tipo A – Rotura por esgotamento da capacidade resistente da peça;

Rotura do tipo B – Rotura frágil induzida por defeito: efeito simultâneo de inclinação do fio e nó;

Rotura do tipo C – Rotura induzida por defeito: nó - estrangulamento da secção útil resistente;

Rotura do tipo D – Rotura induzida por defeito: fio inclinado – esgotamento da capacidade resistente da peça;

Entre parêntesis a identificação da classe de qualidade 2 e 3 (ver quadro 5.3).

À excepção da rotura do tipo A, todas as restantes evidenciaram que os defeitos, particularmente a inclinação do fio e os nós, adquirem uma enorme influência no mecanismo de rotura das peças sujeitas à flexão. Ambos os defeitos referidos representam uma falta de continuidade para as tensões de tracção, induzindo tracções perpendiculares ao fio, às quais a madeira oferece pouca resistência. A figura 5.23 representa esquematicamente o fenómeno descrito.

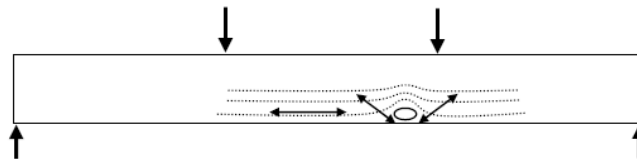


Fig. 5.23 - Tracção perpendicular devido ao desvio do fio provocado pela presença de um nó (Santos, 2007).

5.7. ANÁLISE ESTATÍSTICA

A campanha experimental realizada no âmbito da presente tese teve como principal objectivo a determinação das propriedades mecânicas de madeira de Carvalho português, nomeadamente a resistência à flexão (f_m) e o módulo de elasticidade em flexão (E_0). Os resultados obtidos para ambas as propriedades mecânicas foram alvo de um tratamento estatístico adequado, permitindo averiguar a sua maior ou menor dispersão através do cálculo do desvio padrão, assim como a determinação de valores médios e característicos.

Para cada uma das propriedades mecânicas determinadas, o tratamento estatístico incidu sobre três grupos de valores, ou seja, o conjunto formado pela totalidade dos provetes e os subconjuntos constituídos pelas amostras aprovadas pela aplicação do método *Amorim Faria* e pela norma NF B52-001:2007. Deste modo, pretendeu-se avaliar comparativamente a dispersão de resultados, embora os dados estatísticos que derivam dos subconjuntos de provetes aprovados não sejam suficientemente representativos, devido à pequena dimensão da amostra. Os resultados obtidos para a resistência à flexão e para o módulo de elasticidade paralelo ao fio são a seguir apresentados separadamente, podendo também observar-se o tratamento estatístico separado dos três grupos de provetes referidos.

5.7.1. RESISTÊNCIA À FLEXÃO

A resistência à flexão constitui a propriedade mais importante da madeira, facto que pode ser confirmado pela atribuição de classes de resistência pela norma EN 338:2009 em função desse valor. Efectivamente, grande parte das peças estruturais estão sujeitas a este tipo de esforço, nomeadamente elementos que constituem coberturas, pisos, escadas e pontes. A utilização de madeira neste tipo de estruturas é uma mais-valia, dado que se trata de um dos materiais que apresenta melhor relação entre a capacidade resistente e o peso próprio (Santos, 2007).

Geralmente, a flexão surge pela aplicação de cargas, uniformemente distribuídas ou pontuais, que são perpendiculares ao eixo da viga, provocando compressões, predominantemente na metade superior da peça, e tracções, predominantemente na metade inferior da peça. Estes esforços são máximos nas fibras extremas e variam linearmente em regime elástico, implicando, por isso, que a posição do eixo neutro se situe a meio da altura (h) da secção.

O conhecimento da capacidade resistente da madeira à flexão é assim determinante na utilização eficaz e segura deste material. No caso em apreço, tratando-se de madeira de Carvalho português, a campanha experimental executada constituirá um contributo no sentido de aprofundar o conhecimento mecânico desta espécie florestal e permitirá averiguar a viabilidade das duas vias usadas na classificação visual dos provetes.

Conforme foi anteriormente referido, os ensaios seguiram as disposições da norma EN 408:2003 (ver 5.5), resultando gráficos força – deslocamento para cada um dos provetes. Tendo em conta a força máxima atingida, as dimensões transversais e os esquemas presentes na figura 5.17 foi possível determinar a capacidade de resistência à flexão de acordo com a seguinte expressão:

$$f_m = \frac{a \times F_{m\acute{a}x}}{2 \times W} \quad (5.2)$$

em que, f_m – Resistência à flexão (MPa);

a – Distância entre a posição de uma força e o apoio mais próximo (mm);

$F_{m\acute{a}x}$ – Força máxima (N);

W – Módulo de flexão da secção (mm³)

$$W = \frac{b \times h^2}{6} \quad (5.3)$$

b – Largura da secção transversal da viga ensaiada (mm);

h – Altura da secção transversal da viga ensaiada (mm).

5.7.1.1. Lote completo

Após se ter efectuado a medição das dimensões dos provetes foi possível definir o esquema de ensaio a que cada um estaria sujeito que, conforme se referiu, é função da altura da peça. Tendo presente os dados referidos, e após realizar o ensaio de cada um dos provetes, foi possível determinar a sua resistência à flexão pela aplicação da expressão 5.2. Os resultados obtidos podem ser visualizados no quadro 5.7.

Quadro 5.7 – Lote completo: resistência à flexão.

Amostra	F_{max} (N)	a (mm)	W (mm ³)	f_m (MPa)
N1	14850,7	510,0	57122,0	66,3
N2	8516,4	510,0	57800,0	37,6
N3	10786,6	510,0	57573,6	47,8
N4	9692,8	510,0	56595,8	43,7
N5	15312,5	510,0	56374,1	69,3
N6	8428,9	510,0	57573,6	37,3
N7	12770,0	510,0	57347,6	56,8
N8	10718,5	510,0	57599,3	47,5
N9	15205,5	510,0	57573,6	67,3
N10	10436,6	510,0	56501,8	47,1
N11	11880,4	510,0	57347,6	52,8
N12	9342,8	510,0	57173,7	41,7
N13	8108,0	510,0	53575,4	38,6
N14	9931,0	510,0	56896,9	44,5
N15	9474,0	510,0	57800,0	41,8
N16	10232,4	510,0	57173,7	45,6
N17	11243,6	510,0	57122,0	50,2
N18	13017,9	510,0	57800,0	57,4
N19	6022,5	510,0	57122,0	26,9
N20	10538,7	510,0	58000,7	46,3
N21	13149,2	510,0	57800,0	58,0
N22	8151,8	510,0	56328,6	36,9
N23	11083,1	510,0	57800,0	48,9
N24	6027,4	510,0	57398,6	26,8
N25	13314,5	510,0	57800,0	58,7
N26	15098,6	510,0	57573,6	66,9
N27	13999,9	510,0	58602,8	60,9
N28	14194,4	510,0	58000,7	62,4
N29	10669,9	510,0	57122,0	47,6
N30	13859,0	510,0	57573,6	61,4
N31	14447,2	510,0	57800,0	63,7
N32	14986,8	510,0	57800,0	66,1
N33	13436,0	510,0	57197,9	59,9
N34	11788,0	510,0	57800,0	52,0
N35	13669,4	510,0	57122,0	61,0
N36	14189,5	510,0	57800,0	62,6
N37	9702,5	510,0	57573,6	43,0
N38	3961,3	510,0	58000,7	17,4
N39	13392,3	510,0	57800,0	59,1
N40	11744,3	510,0	57599,3	52,0
N41	14534,7	510,0	57800,0	64,1
N42	12614,5	510,0	57800,0	55,7
N43	12065,1	510,0	57944,9	53,1
N44	11112,3	510,0	57573,6	49,2
N45	15059,7	510,0	57800,0	66,4
N46	13659,6	510,0	56750,2	61,4
N47	12079,7	510,0	56527,0	54,5
N48	9299,0	390,0	33682,6	53,8
N49	12896,4	390,0	33800,0	74,4
N50	9892,1	390,0	33570,4	57,5
N51	14806,9	390,0	33330,6	86,6

Note-se que, embora os quatro últimos provetes tenham sensivelmente menos 2,0 cm de altura do que os restantes, logo um módulo de flexão menor, esse facto não se reflecte nos valores da resistência à flexão, registando mesmo os dois resultados mais elevados para essa propriedade mecânica. Naturalmente que houve um ajustamento do esquema de ensaio conforme evidencia a figura 5.17, que se reflecte no valor de a e que permitiu o cumprimento da norma EN 408:2003.

O conjunto de todos os valores obtidos para a resistência à flexão foi alvo de um tratamento estatístico, o qual permitiu avaliar a sua variabilidade, determinar o valor médio e, consequentemente, o valor característico. Os resultados obtidos estão presentes no quadro 5.8.

Quadro 5.8- Lote completo: resistência à flexão - Valores estatísticos.

Média	Desvio Padrão	Coefficiente Variação	Valor Característico	Máximo	Mínimo
f_m	σ	CV	$f_{m,k}$	$f_{m,max}$	$f_{m,min}$
(MPa)	(MPa)	(%)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
53,1	12,7	23,9	32,3	86,6	17,4

O valor médio da resistência à flexão ronda os 53,0 MPa e o desvio padrão atinge os 12,7 MPa, justificando um coeficiente de variação de 23,9 %. Este valor pode ser considerado alto e reflecte a grande dispersão dos resultados obtidos para a propriedade mecânica em questão, fazendo diminuir substancialmente o valor característico.

No que toca a valores extremos, verifica-se que a resistência à flexão varia entre 86,6 MPa e 17,4 MPa, resistências que correspondem aos provetes *N51* e *N38*, respectivamente. O provete *N51* apenas apresentava um nó com 1,2 cm de diâmetro na metade superior da peça, zona que posteriormente foi comprimida. O provete *N38* possuía cinco nós situados em várias faces com diâmetros compreendidos entre 1,0 e 4,0 cm, além de apresentar uma inclinação do fio que pontualmente atingia os 39,4 %. Os defeitos referidos faziam antever valores resistentes necessariamente diferentes.

Tendo presente o conjunto total dos resultados obtidos para a resistência à flexão, interessa analisar comparativamente os valores atingidos pelas vigas rejeitadas e aprovadas pelo método *Amorim Faria* e pela norma NF B52-001:2007, avaliando em simultâneo o comportamento dos provetes ao carregamento. Assim, de forma a atingir os objectivos referidos de forma mais eficaz, apresentam-se de seguida dois gráficos para cada uma das vias de classificação mencionadas: o primeiro apresenta graficamente os valores atingidos por cada viga; o segundo demonstra o comportamento dos provetes à solicitação.

i. Classificação visual – Método *Amorim Faria*

Os valores de resistência à flexão obtidos para cada uma das vigas são apresentados graficamente na figura 5.24, onde é possível distinguir as vigas aprovadas e as rejeitadas pela aplicação do método *Amorim Faria*. Visualizando a figura referida constata-se que, ao contrário do que se esperava, grande parte das barras vermelhas se confunde com as cinzentas, o que significa que o método referido desperdiçou algumas peças que apresentaram resistências importantes.

A força máxima utilizada no cálculo da resistência à flexão para cada uma das vigas resultou da construção prévia de um gráfico força – deslocamento, o qual também permitiu avaliar o comportamento da peça à solicitação. Na figura 5.25 é possível visualizar a sobreposição de todos esses gráficos, distinguindo-se amostras aprovadas e rejeitadas. A sua análise vem reforçar a ideia de que existiram vigas rejeitadas que resistiram satisfatoriamente a cargas significativas e que o comportamento de praticamente todas as amostras é idêntico numa primeira fase da solicitação, ou seja, até se atingir a força limite.

Porém, após esse nível de carga, verifica-se um comportamento distinto entre a generalidade das peças aprovadas e rejeitadas. Os provetes aprovados apresentam um comportamento “plástico”, caracterizado por uma deformação significativa após se atingir o carregamento máximo, enquanto que os provetes rejeitados evidenciam uma rotura frágil, caracterizada por uma quebra repentina da força aplicada sem qualquer tipo de deslocamento associado. Contudo, refira-se que não existe uma fronteira bem definida entre estes dois tipos de comportamento, existindo amostras aprovadas com roturas frágeis, embora sejam uma minoria.

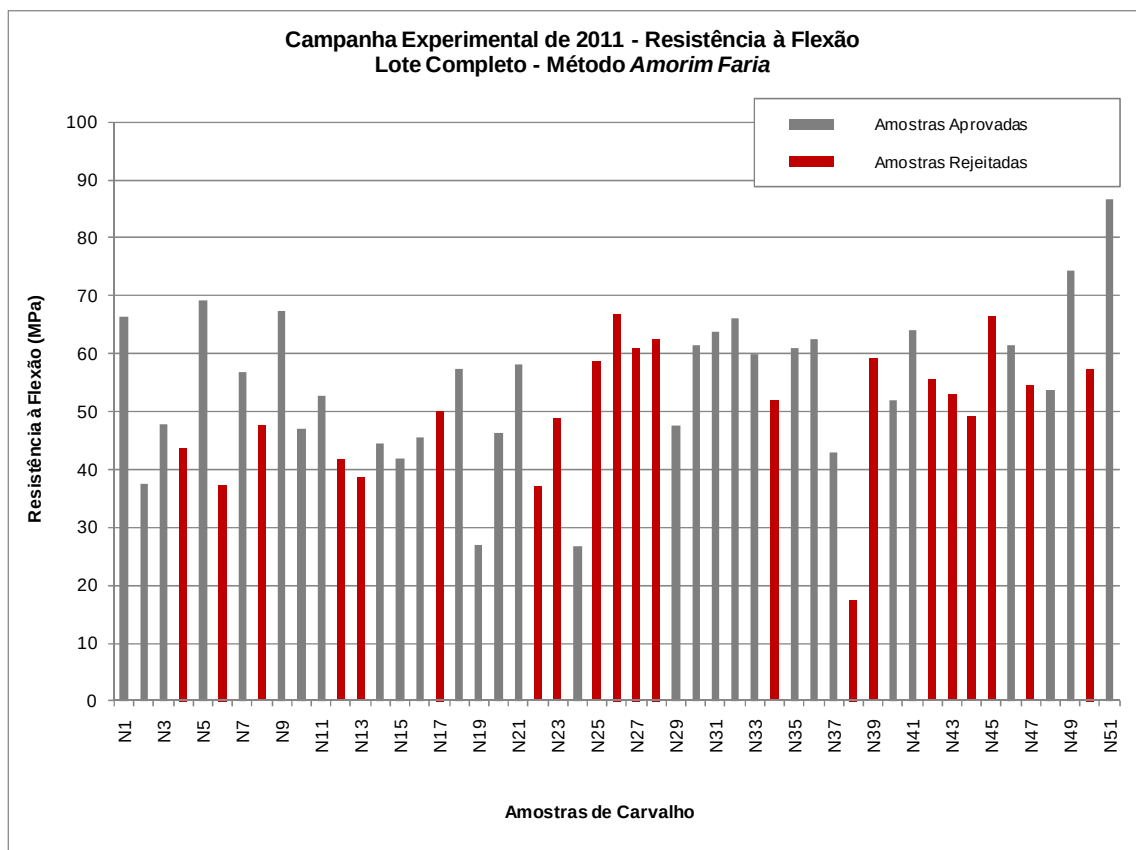


Fig. 5.24 - Lote completo – Método Amorim Faria: resistência à flexão.

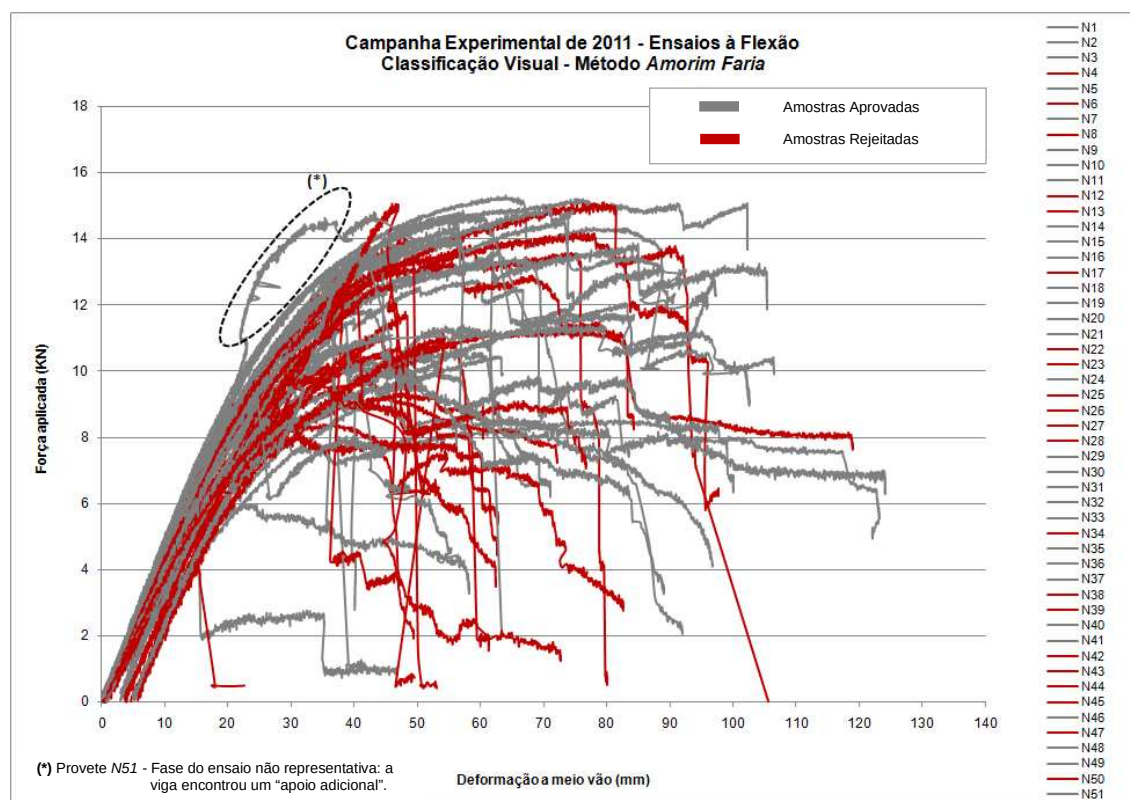


Fig. 5.25 – Lote completo – Método Amorim Faria: gráficos força – deslocamento.

ii. Classificação visual – Norma NF B52-001:2007

A capacidade resistente à flexão obtida para cada um dos provetes na campanha experimental realizada no âmbito da presente tese é apresentada graficamente na figura 5.26, onde se faz a distinção entre amostras aprovadas e rejeitadas pela aplicação da norma NF B52-001:2007. Analisando a figura referida, constata-se que grande parte das amostras rejeitadas obteve valores resistentes apreciáveis e, em grande parte dos casos, mesmo superiores às amostras aprovadas de classe 3 e até da classe 2. Conclui-se, portanto, que a classificação visual de madeira de Carvalho por esta via de classificação conduz à rejeição de um número importante de peças que poderiam perfeitamente ser usadas como elemento estrutural.

Paralelamente à resistência à flexão, analisou-se também o comportamento ao carregamento de cada uma das vigas através de gráficos força – deslocamento. A figura 5.27 resultou da sobreposição de todos esses gráficos, onde se distinguem provetes aprovados e rejeitados, sendo perceptível que a maior parte das vigas excluídas apresentaram uma resistência satisfatória. Conforme anteriormente foi referido, verifica-se um comportamento relativamente homogéneo entre todas as vigas antes de se verificar a carga máxima e heterogéneo após se ter atingido aquele patamar de solicitação.

A classificação visual pela norma NF B52-001:2007 conduziu à rejeição de praticamente todos os provetes que apresentaram rotura frágil, embora grande parte dos que apresentaram comportamento “plástico” também tenham sido rejeitados. A divisão destes dois tipos de comportamento, traduzida em vigas rejeitadas e aprovadas, respectivamente, é mais evidente no método Amorim Faria.

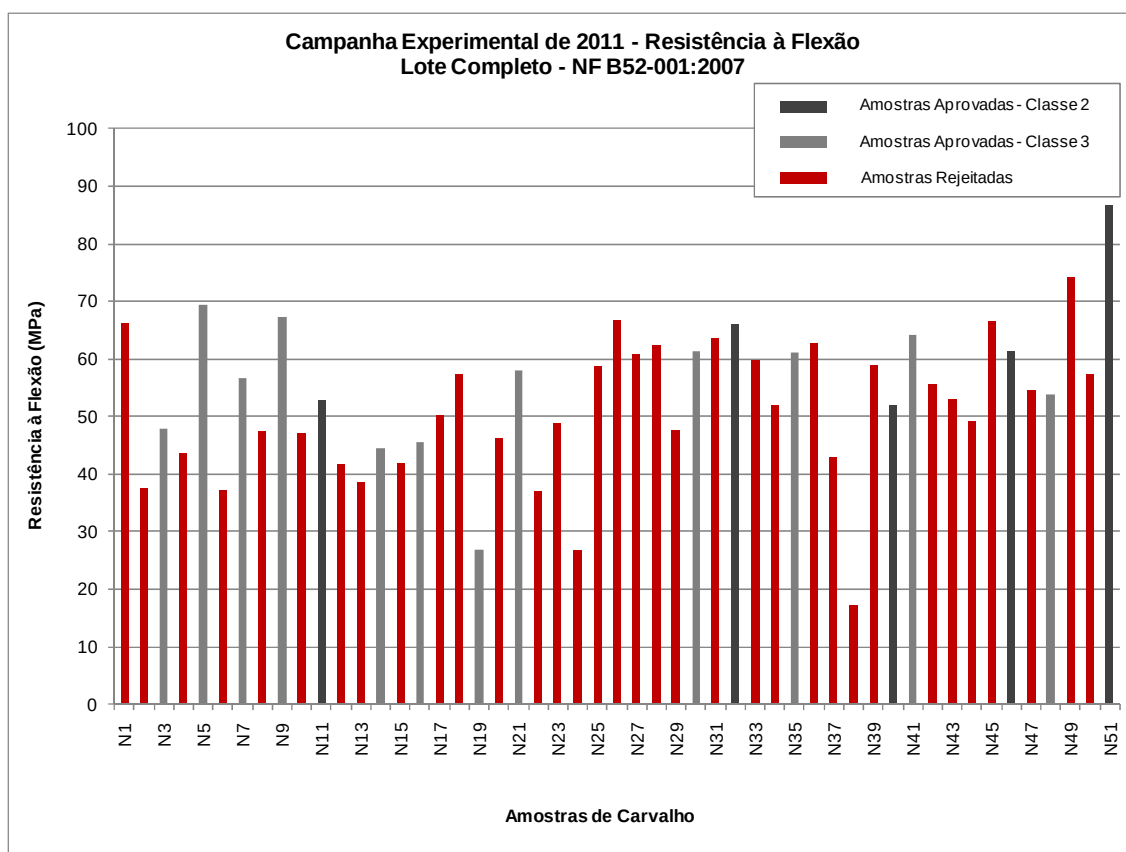


Fig. 5.26 - Lote completo – Norma NF B52-001:2007: resistência à flexão.

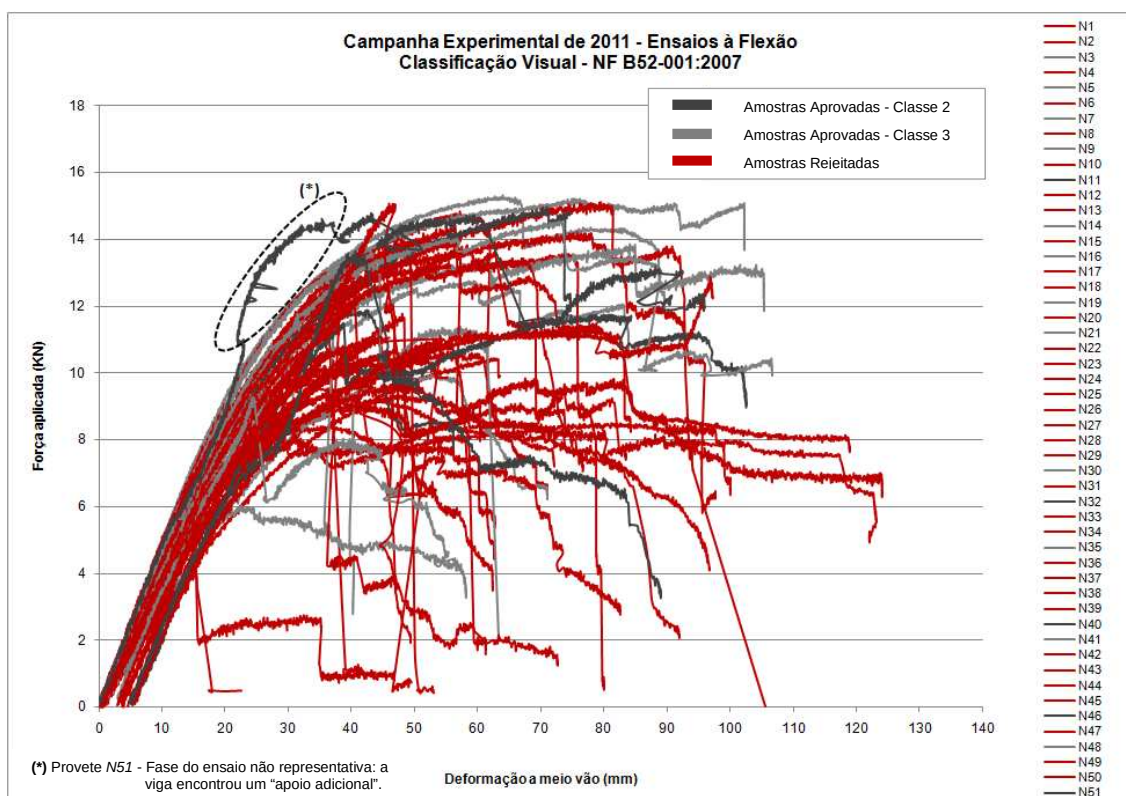


Fig. 5.27 – Lote completo – Norma NF B52-001:2007: gráficos força – deslocamento.

5.7.1.2. Lote aprovadas – Método Amorim Faria

Da classificação visual pelo método Amorim Faria resultaram 30 provetes aprovados, cujos valores resistentes à flexão se isolaram no quadro 5.9. Com o objectivo de verificar se o subconjunto das amostras aprovadas pelo método em apreço apresentava valores mais homogêneos do que a totalidade do lote, efectuou-se o tratamento estatístico englobando apenas os resultados das vigas que obtiveram classificação positiva. No quadro 5.10 é possível averiguar a sua dispersão, assim como o valor médio e o valor característico.

Quadro 5.9 - Lote aprovadas - Método Amorim Faria: resistência à flexão.

Amostra	F_{max} (N)	a (mm)	W (mm ³)	f_m (MPa)
N1	14850,7	510,0	57122,0	66,3
N2	8516,4	510,0	57800,0	37,6
N3	10786,6	510,0	57573,6	47,8
N5	15312,5	510,0	56374,1	69,3
N7	12770,0	510,0	57347,6	56,8
N9	15205,5	510,0	57573,6	67,3
N10	10436,6	510,0	56501,8	47,1
N11	11880,4	510,0	57347,6	52,8
N14	9931,0	510,0	56896,9	44,5
N15	9474,0	510,0	57800,0	41,8
N16	10232,4	510,0	57173,7	45,6
N18	13017,9	510,0	57800,0	57,4
N19	6022,5	510,0	57122,0	26,9
N20	10538,7	510,0	58000,7	46,3
N21	13149,2	510,0	57800,0	58,0
N24	6027,4	510,0	57398,6	26,8
N29	10669,9	510,0	57122,0	47,6
N30	13859,0	510,0	57573,6	61,4
N31	14447,2	510,0	57800,0	63,7
N32	14986,8	510,0	57800,0	66,1
N33	13436,0	510,0	57197,9	59,9
N35	13669,4	510,0	57122,0	61,0
N36	14189,5	510,0	57800,0	62,6
N37	9702,5	510,0	57573,6	43,0
N40	11744,3	510,0	57599,3	52,0
N41	14534,7	510,0	57800,0	64,1
N46	13659,6	510,0	56750,2	61,4
N48	9299,0	390,0	33682,6	53,8
N49	12896,4	390,0	33800,0	74,4
N51	14806,9	390,0	33330,6	86,6

Quadro 5.10 - Lote aprovadas - Método Amorim Faria: resistência à flexão - Valores estatísticos.

Média	Desvio Padrão	Coefficiente Variação	Valor Característico	Máximo	Mínimo
f_m	σ	CV	$f_{m,k}$	$f_{m,máx}$	$f_{m,mín}$
(MPa)	(MPa)	(%)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
55,0	13,2	23,4	33,4	86,6	26,8

Comparativamente aos valores estatísticos obtidos para o conjunto total de amostras, o valor médio e o desvio padrão subiram em proporções diferentes, contribuindo para o aumento ligeiro do valor característico. A dispersão continua a ser significativa, facto confirmado pelo valor do coeficiente de variação que atinge os 23,4 %. Na figura 5.28 é possível verificar graficamente, ainda que de forma visual, a variabilidade referida, verificando-se que todos os provetes aprovados ultrapassaram e, em alguns casos, duplicaram e até triplicaram os 21,0 MPa, valor proposto pelo método *Amorim Faria*. Este facto demonstra, por um lado, a sua grande fiabilidade e, por outro, a subestimação da capacidade resistente das peças aprovadas.

Convém salientar que o método referido foi inicialmente desenvolvido para ser aplicado a peças estruturais antigas, justificando alguma prudência nos valores propostos e na limitação de defeitos. Porém, note-se que os provetes com menor resistência, *N19* e *N24*, atingiram resistências na ordem dos 26,0 MPa, ou seja, apenas 5,0 MPa acima do valor proposto para as vigas aprovadas, revelando a adequação do método.

De forma a sustentar a ideia anteriormente defendida de que as vigas aprovadas apresentaram, na sua generalidade, um comportamento “plástico”, sobrepuseram-se os seus gráficos força – deslocamento, os quais se apresentam em simultâneo na figura 5.29. A sua visualização permite verificar que todos os provetes se comportam de forma semelhante até atingir a carga máxima e posteriormente, grande parte deles, plastificam, ou seja, evidenciam deformações residuais consideráveis. Contudo, saliente-se que este comportamento não pode ser generalizado, dado que a madeira é um material extremamente heterogéneo.

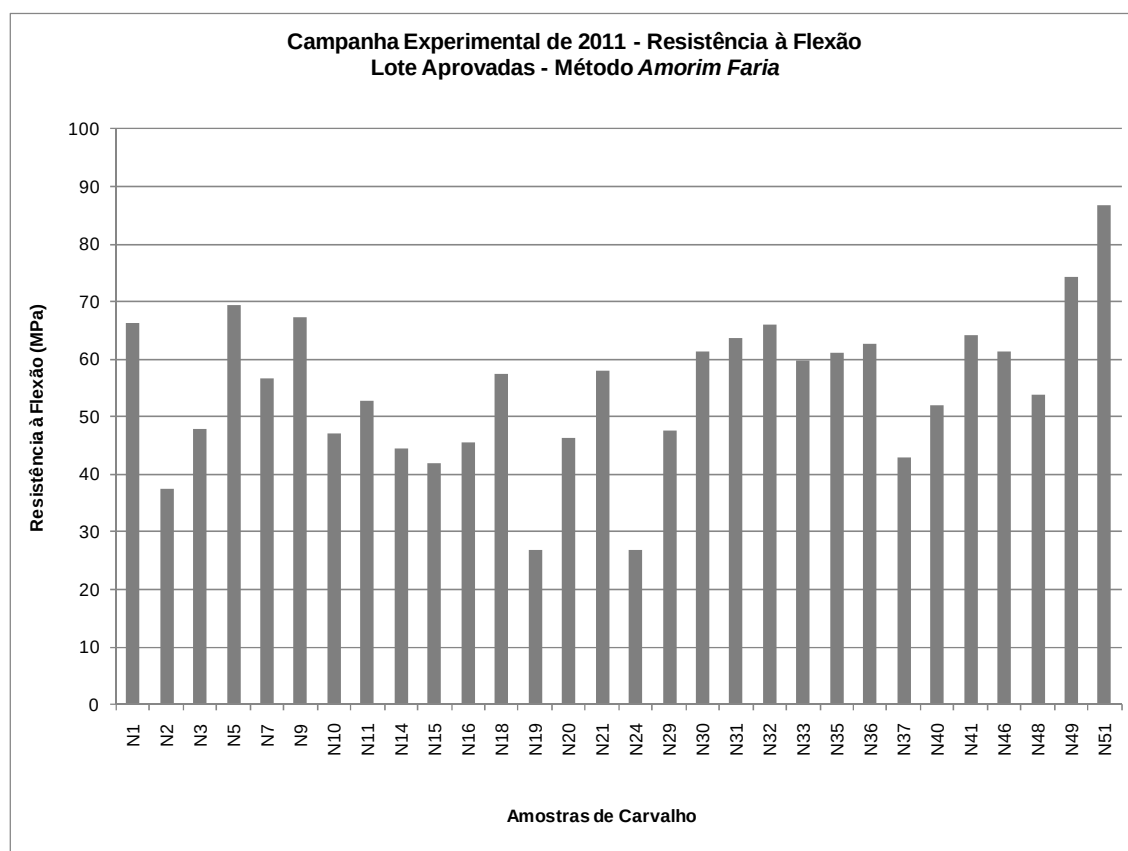


Fig. 5.28 - Lote aprovadas - Método *Amorim Faria*: resistência à flexão.

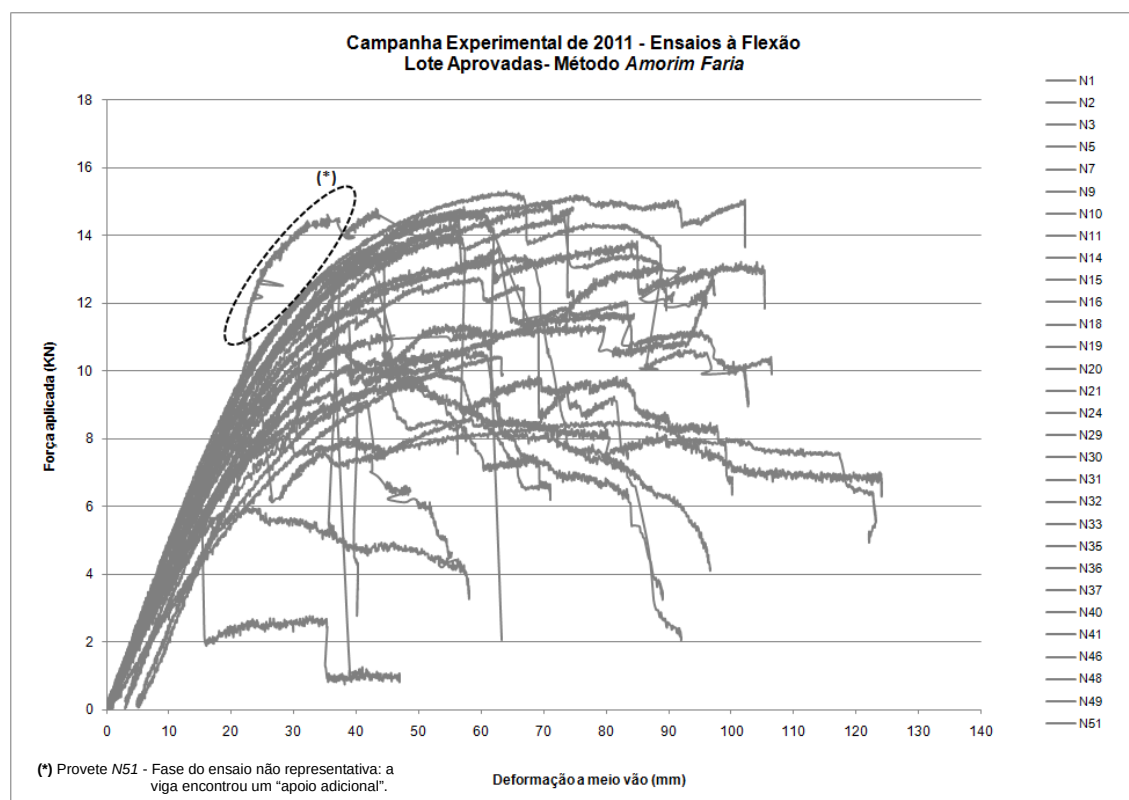


Fig. 5.29 - Lote aprovadas - Método *Amorim Faria*: gráficos força – deslocamento.

5.7.1.3. Lote aprovadas – Norma NF B52-001:2007

A classificação visual pela norma NF B52-001:2007 demonstrou ser mais rígida do que o método *Amorim Faria*, facto confirmado pela aprovação de apenas 17 provetes, cujos valores resistentes à flexão se isolaram no quadro 5.11. Tal como se procedeu para o subconjunto das amostras aprovadas pelo método *Amorim Faria*, os valores resistentes à flexão dos provetes que obtiveram classificação positiva pela norma NF B052-001:2007 foram alvo de um tratamento estatístico, cujo principal objectivo consistiu na avaliação da dispersão dos seus resultados. Os valores estatísticos calculados com base no subconjunto referido são apresentados no quadro 5.12.

Quadro 5.11 - Lote aprovadas - Norma NF B52-001:2007: resistência à flexão.

Amostra	F_{max} (N)	a (mm)	W (mm ³)	f_m (MPa)
N3	10786,6	510,0	57573,6	47,8
N5	15312,5	510,0	56374,1	69,3
N7	12770,0	510,0	57347,6	56,8
N9	15205,5	510,0	57573,6	67,3
N11	11880,4	510,0	57347,6	52,8
N14	9931,0	510,0	56896,9	44,5
N16	10232,4	510,0	57173,7	45,6
N19	6022,5	510,0	57122,0	26,9
N21	13149,2	510,0	57800,0	58,0
N30	13859,0	510,0	57573,6	61,4
N32	14986,8	510,0	57800,0	66,1
N35	13669,4	510,0	57122,0	61,0
N40	11744,3	510,0	57599,3	52,0
N41	14534,7	510,0	57800,0	64,1
N46	13659,6	510,0	56750,2	61,4
N48	9299,0	390,0	33682,6	53,8
N51	14806,9	390,0	33330,6	86,6

Quadro 5.12 - Lote aprovadas - Norma NF B52-001:2007: resistência à flexão - Valores estatísticos.

Média	Desvio Padrão	Coefficiente Variação	Valor Característico	Máximo	Mínimo
f_m	σ	CV	$f_{m,k}$	$f_{m,máx}$	$f_{m,mín}$
(MPa)	(MPa)	(%)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
57,0	13,1	23,0	35,5	86,6	26,9

Comparando os valores estatísticos do subconjunto em apreço com os do conjunto total de amostras, verifica-se que o valor característico é superior em 3,2 MPa no primeiro caso, fruto de um valor médio superior. Em relação ao subconjunto de amostras aprovadas pelo método *Amorim Faria*, verifica-se exactamente o mesmo, embora as diferenças registadas sejam mais ligeiras. Em todo o caso, a dispersão continua a ser significativa, conforme demonstra a figura 5.30. A análise da figura referida permite verificar que os provetes aprovados das classes 2 e 3 superaram e, em alguns casos, duplicaram e até triplicaram os valores propostos pela norma NF B52-001:2007 de 24,0 MPa e 18,0 MPa, respectivamente. Este facto realça a sua grande fiabilidade e a subestimação da capacidade resistente das peças aprovadas. Importa ainda salientar que os provetes de classe 2 nem sempre obtiveram resistências superiores aos de classe 3, tal como seria de esperar.

Tem-se vindo a defender a ideia de que a generalidade dos provetes aprovados não apresenta uma rotura frágil, apresentando deslocamentos consideráveis após atingirem a carga máxima. Este comportamento foi claramente observado na maior parte das vigas aprovadas pelo método *Amorim Faria*, no entanto, deveria ser ainda mais evidente no caso da NF B52-001:2007 pelo simples facto de constituir uma via de classificação visual bastante mais exigente. Na figura 5.31 é possível visualizar os gráficos de ensaio dos provetes aprovados pela norma citada, sendo notório que grande parte deles evidencia grandes deformações, chegando a atingir, em alguns casos, 10,0 cm O número de vigas que apresentaram rotura frágil é diminuto, pertencendo todas elas à classe 3.

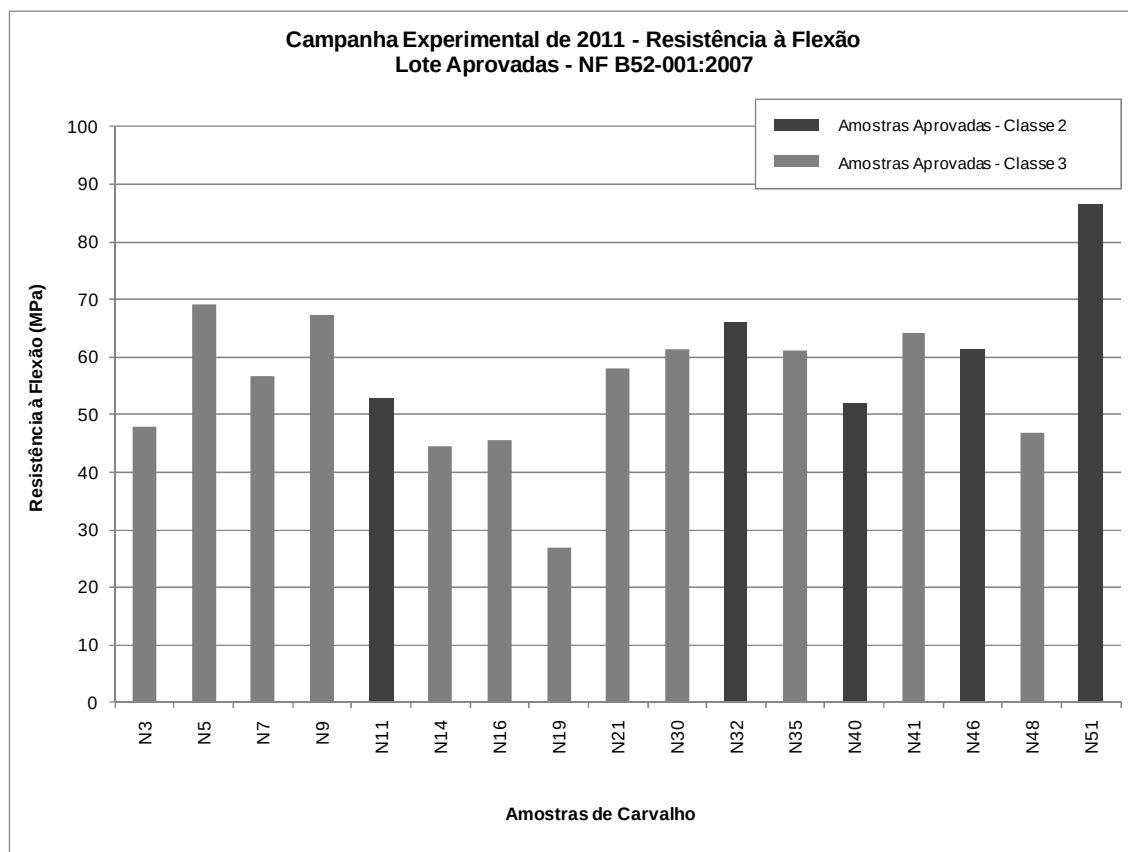


Fig. 5.30- Lote aprovadas - Norma NF B52-001:2007: resistência à flexão.

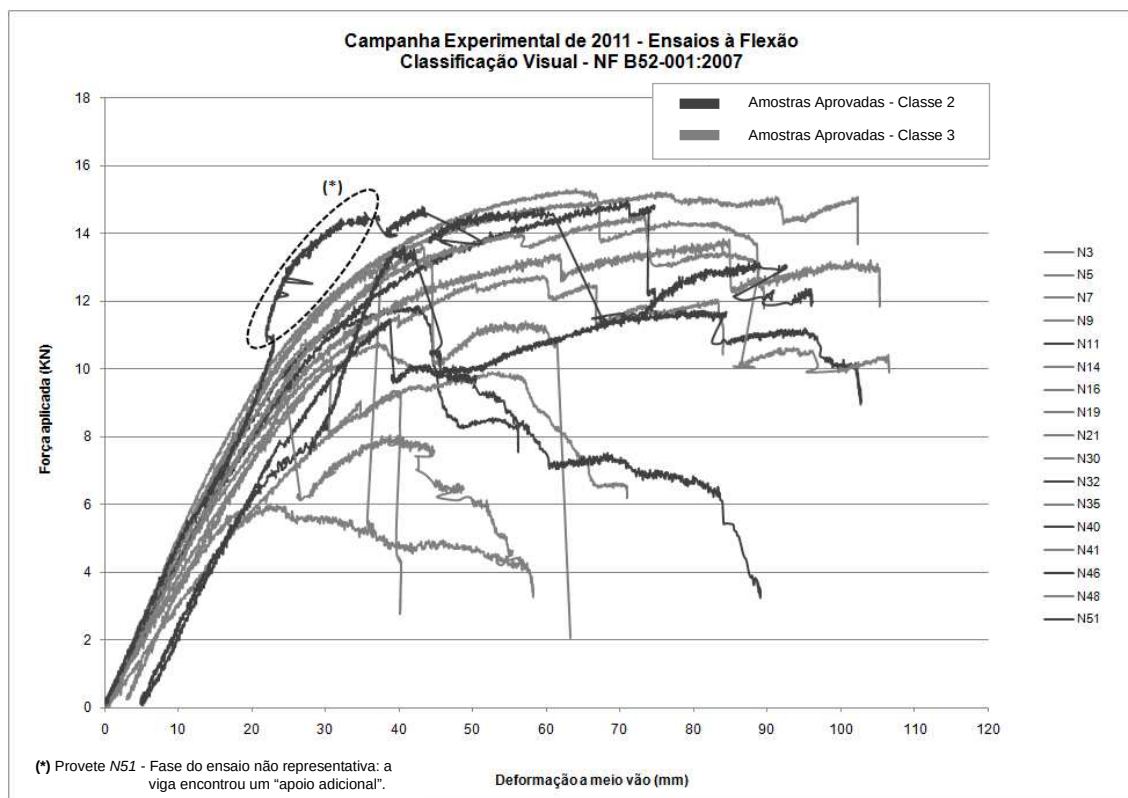


Fig. 5.31 - Lote aprovadas - Norma NF B52-001:2007: gráficos força – deslocamento.

5.7.2. MÓDULO DE ELASTICIDADE

Tal como outros materiais estruturais, é sabido que a madeira apresenta um certo grau de elasticidade, ou seja, tem a capacidade de se deformar até um determinado limite por efeito de uma acção exterior e de recuperar a sua forma inicial quando essa acção é retirada. O parâmetro que mede mais facilmente a maior ou menor flexibilidade de um dado material é o módulo de elasticidade. Trata-se de uma constante que caracteriza a inclinação da curva tensão – deformação, sendo esta relação válida na chamada zona de proporcionalidade. Quanto maior for o módulo de elasticidade mais elevado é o declive da recta e menor será a deformação para um mesmo acréscimo de carga.

O módulo de elasticidade pode ser medido em relação a vários tipos de esforços. Porém, o que adquire maior importância no comportamento de uma peça estrutural é o módulo de elasticidade em flexão, parâmetro determinado no âmbito da presente campanha experimental. Desta forma, pretende-se contribuir para o conhecimento da madeira de Carvalho português no que toca à propriedade em apreço, validando (ou não) os valores propostos pelas duas vias usadas na classificação visual.

A determinação do módulo de elasticidade à flexão (E_0) seguiu os procedimentos presentes na norma EN 408:2003, que designa aquela propriedade por módulo de elasticidade global em flexão ($E_{m,g}$). Tendo em conta a parte “recta” da curva força – deformação de cada um dos provetes, as suas dimensões transversais e os esquemas presentes na figura 5.17, determinou-se a propriedade referida de acordo com a seguinte expressão:

$$E_{m,g} = \frac{l^3(F_2 - F_1)}{bh^3(w_2 - w_1)} \left[\left(\frac{3a}{4l} \right) - \left(\frac{a}{l} \right)^3 \right] \quad (5.4)$$

em que, $E_{m,g}$ – Módulo de elasticidade global em flexão (MPa);

a – Distância entre a posição de uma força e o apoio mais próximo (mm);

b – Largura da secção transversal da viga ensaiada (mm);

h – Altura da secção transversal da viga ensaiada (mm);

l – Vão em flexão (mm);

$(F_2 - F_1)$ – É o incremento de força na porção recta da curva força – deformação (N);

$(w_2 - w_1)$ – É o incremento de deformação correspondente a $F_2 - F_1$ (mm).

A expressão 5.4 incorpora duas grandezas que devem ser obtidas graficamente, nomeadamente o incremento de carga ($F_2 - F_1$) e a correspondente deformação ($w_2 - w_1$). Segundo a norma EN 408:2003, estes valores são obtidos através de uma regressão linear, desde que $R^2 > 0,99$.

5.7.2.1. Lote completo

Através dos gráficos força – deslocamento determinaram-se regressões lineares aceitáveis ($R^2 > 0,99$) e, por isso, os valores do incremento de carga e da correspondente deformação foram considerados válidos (ver Anexo III). Tendo presente os valores referidos para cada um dos provetes, foi possível determinar o módulo de elasticidade global em flexão pela aplicação da expressão 5.4. Os resultados obtidos para a propriedade referida podem ser observados no quadro 5.13 (em GPa).

Quadro 5.13 - Lote completo: módulo de elasticidade.

Amostra	b (mm)	h (mm)	l (mm)	a (mm)	$F_2 - F_1$ (N)	$w_2 - w_1$ (mm)	R^2	E_0 (GPa)
N1	48,00	84,50	1530,0	510,0	8575,4	20,4	0,998	11,1
N2	48,00	85,00	1530,0	510,0	7340,6	20,8	0,997	9,2
N3	48,00	84,83	1530,0	510,0	7739,2	21,0	0,996	9,6
N4	47,00	85,00	1530,0	510,0	7029,5	20,5	0,993	9,1
N5	47,00	84,83	1530,0	510,0	9095,6	20,7	0,998	11,7
N6	48,00	84,83	1530,0	510,0	6752,4	20,5	0,998	8,6
N7	48,00	84,67	1530,0	510,0	7880,2	20,5	0,994	10,1
N8	47,83	85,00	1530,0	510,0	7204,5	20,4	0,996	9,2
N9	48,00	84,83	1530,0	510,0	9503,9	20,7	0,997	12,0
N10	47,67	84,33	1530,0	510,0	5488,4	20,2	0,997	7,3
N11	48,00	84,67	1530,0	510,0	8711,5	20,9	0,996	10,9
N12	47,67	84,83	1530,0	510,0	7442,7	20,5	0,995	9,5
N13	44,67	84,83	1530,0	510,0	6382,9	20,5	0,997	8,7
N14	48,00	84,33	1530,0	510,0	5848,2	20,3	0,998	7,6
N15	48,00	85,00	1530,0	510,0	7126,7	20,9	0,994	8,8
N16	47,67	84,83	1530,0	510,0	7471,9	20,8	0,998	9,4
N17	48,00	84,50	1530,0	510,0	7131,6	20,5	0,997	9,2
N18	48,00	85,00	1530,0	510,0	9105,3	20,6	0,997	11,4
N19	48,00	84,50	1530,0	510,0	5177,3	15,8	0,996	8,6
N20	48,17	85,00	1530,0	510,0	6995,5	20,7	0,997	8,7
N21	48,00	85,00	1530,0	510,0	9081,0	20,8	0,998	11,3
N22	47,33	84,50	1530,0	510,0	6344,0	21,0	0,995	8,1
N23	48,00	85,00	1530,0	510,0	6946,8	20,9	0,993	8,6
N24	47,67	85,00	1530,0	510,0	5148,2	12,5	0,997	10,7
N25	48,00	85,00	1530,0	510,0	8400,4	20,2	0,998	10,8
N26	48,00	84,83	1530,0	510,0	7992,0	20,5	0,997	10,2
N27	48,67	85,00	1530,0	510,0	8692,1	20,4	0,997	10,9
N28	48,17	85,00	1530,0	510,0	8507,3	20,3	0,998	10,8
N29	48,00	84,50	1530,0	510,0	7885,1	20,6	0,997	10,1
N30	48,00	84,83	1530,0	510,0	8181,6	20,5	0,997	10,4
N31	48,00	85,00	1530,0	510,0	8740,7	20,9	0,996	10,8
N32	48,00	85,00	1530,0	510,0	8176,8	20,8	0,998	10,2
N33	47,50	85,00	1530,0	510,0	8089,3	20,5	0,998	10,3
N34	48,00	85,00	1530,0	510,0	6548,2	20,4	0,998	8,3
N35	48,00	84,50	1530,0	510,0	8439,3	20,7	0,998	10,7
N36	48,00	85,00	1530,0	510,0	8609,4	20,5	0,998	10,9
N37	48,00	84,83	1530,0	510,0	6932,3	20,5	0,993	8,8
N38	48,17	85,00	1530,0	510,0	3349,5	13,0	0,992	6,7
N39	48,00	85,00	1530,0	510,0	8424,7	20,9	0,999	10,4
N40	47,83	85,00	1530,0	510,0	6660,0	15,8	0,999	11,0
N41	48,00	85,00	1530,0	510,0	4457,8	10,0	0,999	11,6
N42	48,00	85,00	1530,0	510,0	6946,8	17,1	0,997	10,5
N43	48,50	84,67	1530,0	510,0	7087,8	16,4	0,999	11,2
N44	48,00	84,83	1530,0	510,0	5916,2	17,5	0,996	8,8
N45	48,00	85,00	1530,0	510,0	6091,2	15,2	0,995	10,4
N46	47,50	84,67	1530,0	510,0	6266,3	16,1	0,995	10,3
N47	47,50	84,50	1530,0	510,0	5464,1	12,3	0,998	11,8
N48	47,83	65,00	1170,0	390,0	7311,4	18,0	0,996	10,5
N49	48,00	65,00	1170,0	390,0	7214,2	18,0	0,997	10,4
N50	48,17	64,67	1170,0	390,0	7005,2	20,9	0,995	8,8
N51	47,33	65,00	1170,0	390,0	9173,3	20,8	0,996	11,6

Saliente-se que, conforme aconteceu na resistência à flexão, o ajustamento do esquema de ensaio dos quatro últimos provetes permitiu que os resultados obtidos para o módulo de elasticidade tivessem representatividade e pudessem ser comparados com os restantes, assegurando o cumprimento das disposições presentes na norma EN 408:2003.

O conjunto total dos valores obtidos para o módulo de elasticidade foi sujeito a um tratamento estatístico com o objectivo de determinar o valor médio, o desvio padrão e o valor característico. Os resultados obtidos apresentam-se no quadro 5.14.

Quadro 5.14 - Lote completo: módulo de elasticidade - Valores estatísticos.

	Desvio Padrão	Coeficiente Variação	Valor Característico	Máximo	Mínimo
$E_{0,mean}$	σ	CV	$E_{0,05}$	$E_{0,máx}$	$E_{0,mín}$
(GPa)	(GPa)	(%)	(GPa)	(GPa)	(GPa)
9,9	1,3	12,6	7,9	12,0	6,7

O valor médio do módulo de elasticidade ronda os 10,0 GPa com um desvio padrão relativamente reduzido, facto espelhado no valor do coeficiente de variação de 12,6 %. Ao contrário do que acontece na flexão, onde os resultados são dispersos, os valores obtidos para o módulo de elasticidade são bastante mais homogéneos.

Conforme já se referiu, o módulo de elasticidade é uma constante que caracteriza a inclinação da curva tensão – deformação na chamada zona de proporcionalidade e, tendo em conta a figura 5.25 ou 5.27, seria de prever uma reduzida dispersão de resultados para esta propriedade mecânica. Importa ainda salientar que, tendencialmente, se verifica uma correlação entre os valores do módulo de elasticidade e da resistência à flexão. No entanto, nem sempre isso se verifica, como por exemplo nas peças N25 e N26, ambas rejeitadas.

Em relação aos valores extremos, constata-se que o módulo de elasticidade varia entre 12,0 e 6,7 GPa, a que correspondem os provetes N9 e N38, respectivamente. O primeiro constitui um dos provetes que apresentou melhor resistência à flexão e possuía um nó com 1,5 cm de diâmetro e uma inclinação do fio de 16,7 %; o segundo evidenciou o pior resultado e, conforme se mencionou anteriormente, continha vários nós com diferentes diâmetros e uma inclinação do fio acentuada (representa uma peça que teria de ser rejeitada por qualquer método/processo de classificação já que tinha muitos e óbvios defeitos).

No sentido de analisar comparativamente os valores obtidos para o módulo de elasticidade dos provetes aprovados e rejeitados pelo método *Amorim Faria* e pela norma NF B52-001:2007, apresentam-se de seguida dois gráficos para cada uma das vias de classificação mencionadas com o intuito de facilitar a análise referida.

i. Classificação visual – Método *Amorim Faria*

Os resultados obtidos para o módulo de elasticidade podem ser observados no gráfico de barras da figura 5.32, onde se diferenciam as vigas aprovadas e rejeitadas na classificação visual pela aplicação

do método *Amorim Faria*. A sua análise permite constatar que algumas das vigas rejeitadas apresentaram uma boa rigidez e, em alguns casos, mesmo superior aos provetes que obtiveram classificação positiva. À semelhança do que aconteceu com a resistência à flexão, a via de classificação referida excluiu peças com um módulo de elasticidade perfeitamente dentro dos limites da normalidade (acima dos 8,0 GPa).

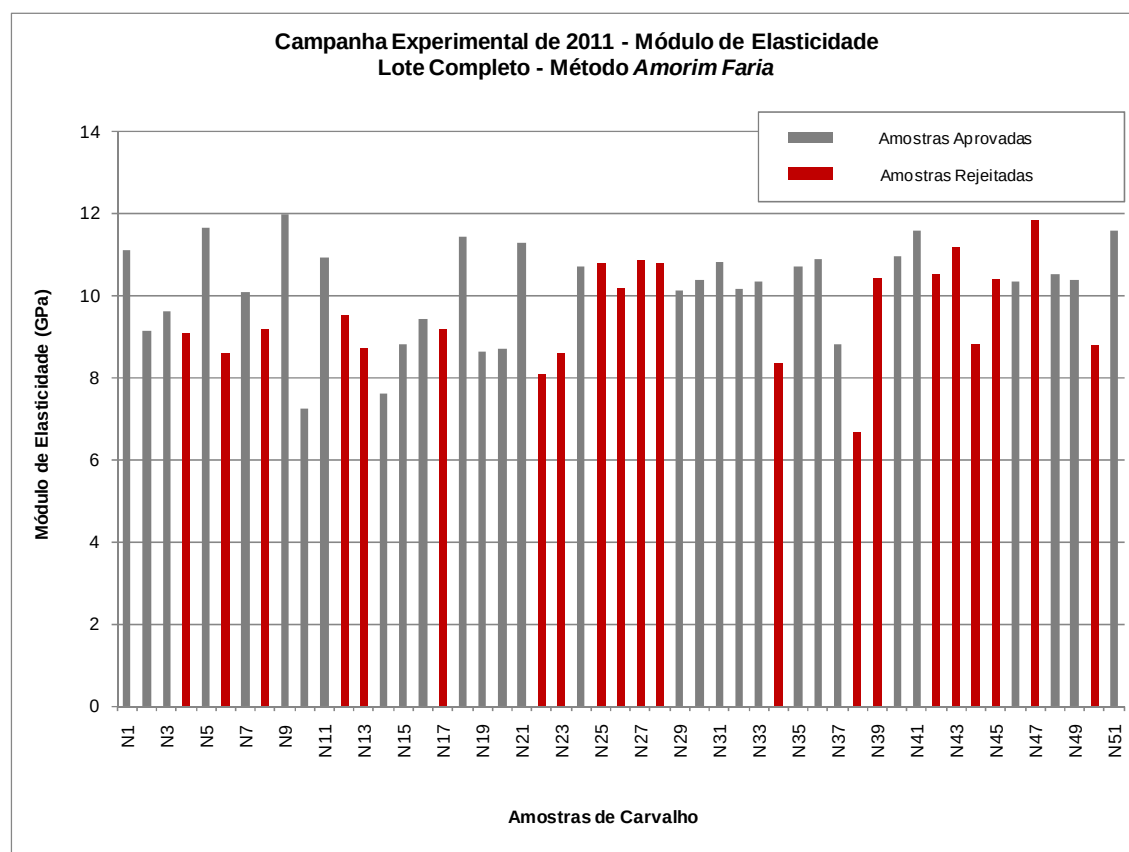


Fig. 5.32 - Lote completo – Método *Amorim Faria*: módulo de elasticidade.

ii. Classificação visual – Norma NF B52-001:2007

Os resultados obtidos para o módulo de elasticidade de todas as peças são apresentados graficamente na figura 5.33, fazendo-se agora a diferenciação das vigas aprovadas e rejeitadas na classificação visual efectuada conforme a norma NF B52-001:2007. A análise da figura referida permite verificar que a maior parte das peças rejeitadas evidencia um módulo de elasticidade semelhante às peças aprovadas de classe 3 e mesmo de classe 2. Verifica-se, portanto, a rejeição de uma fatia importante de provetes que evidenciaram uma boa rigidez, tal como igualmente se tinha verificado em relação à capacidade resistente à flexão.

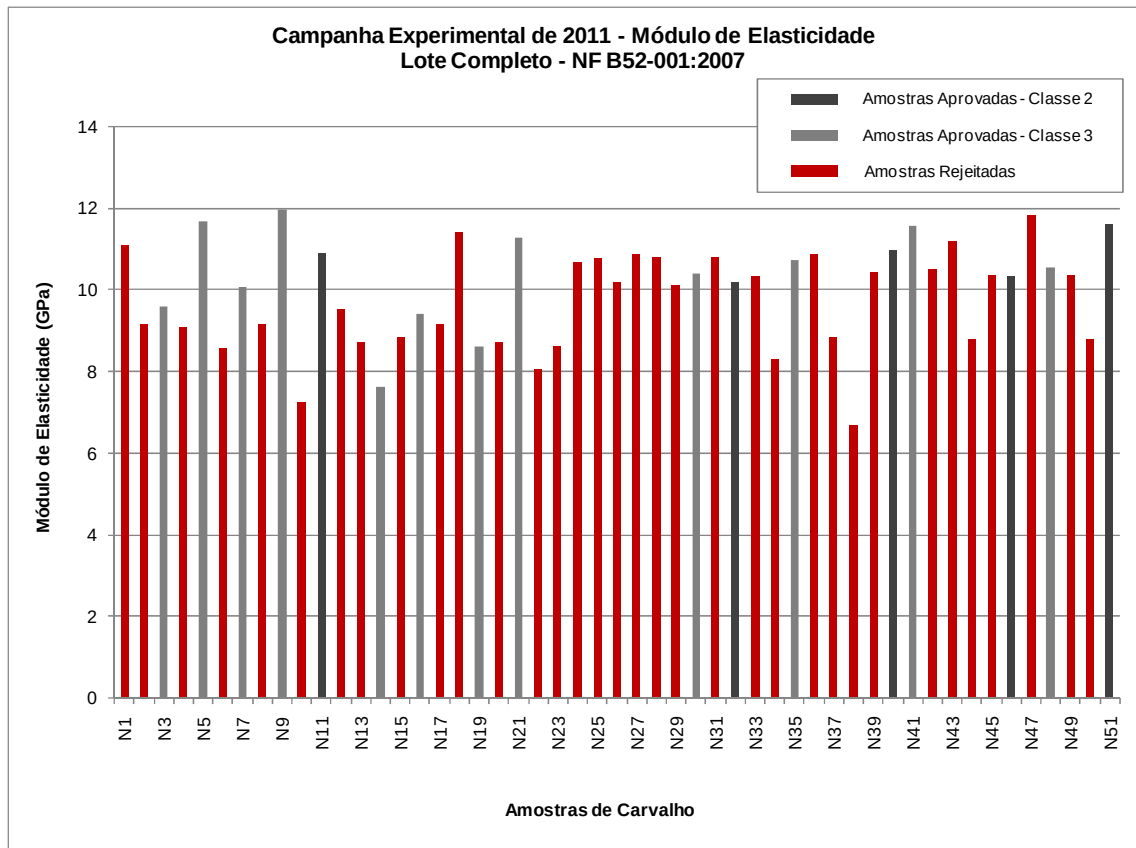


Fig. 5.33 - Lote completo - Norma NF B52-001:2007: módulo de elasticidade.

5.7.2.2. Lote aprovadas – Método *Amorim Faria*

Das 51 peças de madeira que compunham o conjunto total, a classificação visual pelo método *Amorim Faria* conduziu à rejeição de 21 dessas peças, sendo que os valores obtidos para o módulo de elasticidade das restantes 30 encontram-se isolados no quadro 5.15.

A dispersão de resultados evidenciada pelo conjunto total dos provetes para esta propriedade mecânica é relativamente baixa. Ainda assim, à semelhança do que se fez para a resistência à flexão, procedeu-se ao tratamento estatístico do subconjunto de amostras aprovadas pelo método *Amorim Faria* no sentido de verificar se, neste caso, essa variabilidade seria ou não efectivamente mais baixa (ver quadro 5.16).

Quadro 5.15 - Lote aprovadas - Método *Amorim Faria*: módulo de elasticidade.

Amostra	<i>b</i> (mm)	<i>h</i> (mm)	<i>l</i> (mm)	<i>a</i> (mm)	$F_2 - F_1$ (N)	$w_2 - w_1$ (mm)	R^2	E_0 (GPa)
N1	48,00	84,50	1530,0	510,0	8575,4	20,4	0,998	11,1
N2	48,00	85,00	1530,0	510,0	7340,6	20,8	0,997	9,2
N3	48,00	84,83	1530,0	510,0	7739,2	21,0	0,996	9,6
N5	47,00	84,83	1530,0	510,0	9095,6	20,7	0,998	11,7
N7	48,00	84,67	1530,0	510,0	7880,2	20,5	0,994	10,1
N9	48,00	84,83	1530,0	510,0	9503,9	20,7	0,997	12,0
N10	47,67	84,33	1530,0	510,0	5488,4	20,2	0,997	7,3
N11	48,00	84,67	1530,0	510,0	8711,5	20,9	0,996	10,9
N14	48,00	84,33	1530,0	510,0	5848,2	20,3	0,998	7,6
N15	48,00	85,00	1530,0	510,0	7126,7	20,9	0,994	8,8
N16	47,67	84,83	1530,0	510,0	7471,9	20,8	0,998	9,4
N18	48,00	85,00	1530,0	510,0	9105,3	20,6	0,997	11,4
N19	48,00	84,50	1530,0	510,0	5177,3	15,8	0,996	8,6
N20	48,17	85,00	1530,0	510,0	6995,5	20,7	0,997	8,7
N21	48,00	85,00	1530,0	510,0	9081,0	20,8	0,998	11,3
N24	47,67	85,00	1530,0	510,0	5148,2	12,5	0,997	10,7
N29	48,00	84,50	1530,0	510,0	7885,1	20,6	0,997	10,1
N30	48,00	84,83	1530,0	510,0	8181,6	20,5	0,997	10,4
N31	48,00	85,00	1530,0	510,0	8740,7	20,9	0,996	10,8
N32	48,00	85,00	1530,0	510,0	8176,8	20,8	0,998	10,2
N33	47,50	85,00	1530,0	510,0	8089,3	20,5	0,998	10,3
N35	48,00	84,50	1530,0	510,0	8439,3	20,7	0,998	10,7
N36	48,00	85,00	1530,0	510,0	8609,4	20,5	0,998	10,9
N37	48,00	84,83	1530,0	510,0	6932,3	20,5	0,993	8,8
N40	47,83	85,00	1530,0	510,0	6660,0	15,8	0,999	11,0
N41	48,00	85,00	1530,0	510,0	4457,8	10,0	0,999	11,6
N46	47,50	84,67	1530,0	510,0	6266,3	16,1	0,995	10,3
N48	47,83	65,00	1170,0	390,0	7311,4	18,0	0,996	10,5
N49	48,00	65,00	1170,0	390,0	7214,2	18,0	0,997	10,4
N51	47,33	65,00	1170,0	390,0	9173,3	20,8	0,996	11,6

Quadro 5.16 - Lote aprovadas - Método *Amorim Faria*: módulo de elasticidade - Valores estatísticos.

Média	Desvio Padrão	Coefficiente Variação	Valor Característico	Máximo	Mínimo
$E_{0,mean}$	σ	CV	$E_{0,05}$	$E_{0,máx}$	$E_{0,mín}$
(GPa)	(GPa)	(%)	(GPa)	(GPa)	(GPa)
10,2	1,2	11,7	8,2	12,0	7,3

Comparativamente aos valores estatísticos obtidos para o conjunto total de amostras, constata-se que o valor médio cresceu e o desvio padrão seguiu o caminho inverso, resultando num aumento do valor característico. Estas variações foram relativamente ténues e a dispersão sentida para o conjunto total mantém-se praticamente constante, tal como a figura 5.34 evidencia. A sua análise permite constatar que as vigas *N10* e *N14* não atingiram os 8,0 GPa, valor proposto pelo método *Amorim Faria* para as vigas aprovadas, no entanto, aproximaram-se dele. Não se pode dizer que este facto coloque em causa o valor proposto pelo método citado, até porque se tratam apenas de duas peças.

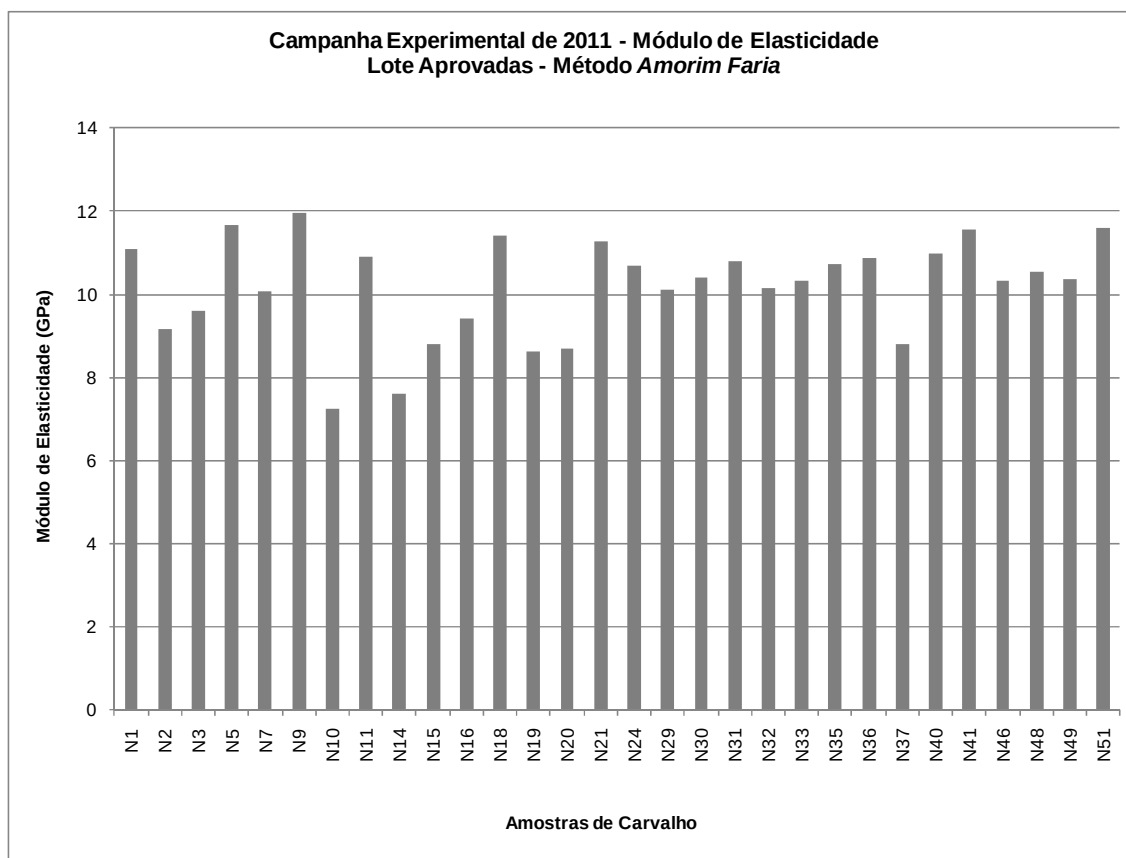


Fig. 5.34- Lote aprovadas - Método Amorim Faria: módulo de elasticidade.

5.7.2.3. Lote aprovadas – Norma NF B52-001:2007

O quadro 5.17 isola os resultados obtidos para o módulo de elasticidade dos 17 provetes aprovados pela norma NF B52-001:2007, cujos valores foram tratados estatisticamente (ver quadro 5.18).

Quadro 5.17 - Lote aprovadas - Norma NF B52-001:2007: módulo de elasticidade.

Amostra	b (mm)	h (mm)	l (mm)	a (mm)	$F_2 - F_1$ (N)	$w_2 - w_1$ (mm)	R^2	E_0 (GPa)
N3	48,00	84,83	1530,0	510,0	7739,2	21,0	0,996	9,6
N5	47,00	84,83	1530,0	510,0	9095,6	20,7	0,998	11,7
N7	48,00	84,67	1530,0	510,0	7880,2	20,5	0,994	10,1
N9	48,00	84,83	1530,0	510,0	9503,9	20,7	0,997	12,0
N11	48,00	84,67	1530,0	510,0	8711,5	20,9	0,996	10,9
N14	48,00	84,33	1530,0	510,0	5848,2	20,3	0,998	7,6
N16	47,67	84,83	1530,0	510,0	7471,9	20,8	0,998	9,4
N19	48,00	84,50	1530,0	510,0	5177,3	15,8	0,996	8,6
N21	48,00	85,00	1530,0	510,0	9081,0	20,8	0,998	11,3
N30	48,00	84,83	1530,0	510,0	8181,6	20,5	0,997	10,4
N32	48,00	85,00	1530,0	510,0	8176,8	20,8	0,998	10,2
N35	48,00	84,50	1530,0	510,0	8439,3	20,7	0,998	10,7
N40	47,83	85,00	1530,0	510,0	6660,0	15,8	0,999	11,0
N41	48,00	85,00	1530,0	510,0	4457,8	10,0	0,999	11,6
N46	47,50	84,67	1530,0	510,0	6266,3	16,1	0,995	10,3
N48	47,83	65,00	1170,0	390,0	7311,4	18,0	0,996	10,5
N51	47,33	65,00	1170,0	390,0	9173,3	20,8	0,996	11,6

Quadro 5.18 - Lote aprovadas - Norma NF B52-001:2007: módulo de elasticidade - Valores estatísticos.

Média	Desvio Padrão	Coefficiente Variação	Valor Característico	Máximo	Mínimo
$E_{0,mean}$	σ	CV	$E_{0,05}$	$E_{0,máx}$	$E_{0,mín}$
(GPa)	(GPa)	(%)	(GPa)	(GPa)	(GPa)
10,4	1,1	11,0	8,6	12,0	7,6

O valor médio do módulo de elasticidade para o subconjunto de amostras aprovadas pela norma NF B52-001:2007 é superior ao valor homólogo para o caso do conjunto total, acontecendo o inverso no caso de desvio padrão, facto que traduz um valor característico superior. Comparativamente ao subconjunto de amostras aprovadas pelo método *Amorim Faria* verifica-se exactamente o mesmo. Porém, neste caso, as variações são ainda mais ténues. Em todo o caso, apesar de uma exigência superior oferecida pela norma NF B52-001:2007, a dispersão é praticamente igual.

Analisando a figura 5.35, verifica-se que três vigas aprovadas de classe 3 evidenciaram um módulo de elasticidade inferior a 11,0 GPa e duas vigas aprovadas de classe 2 não atingiram os 9,0 GPa, ambos os valores propostos pela norma NF B52-001:2007 para cada uma das classes. Apesar do referido, não se pode pôr em causa os valores propostos pela norma citada para o módulo de elasticidade, visto que os resultados obtidos se aproximarem bastante dos valores atrás mencionados.

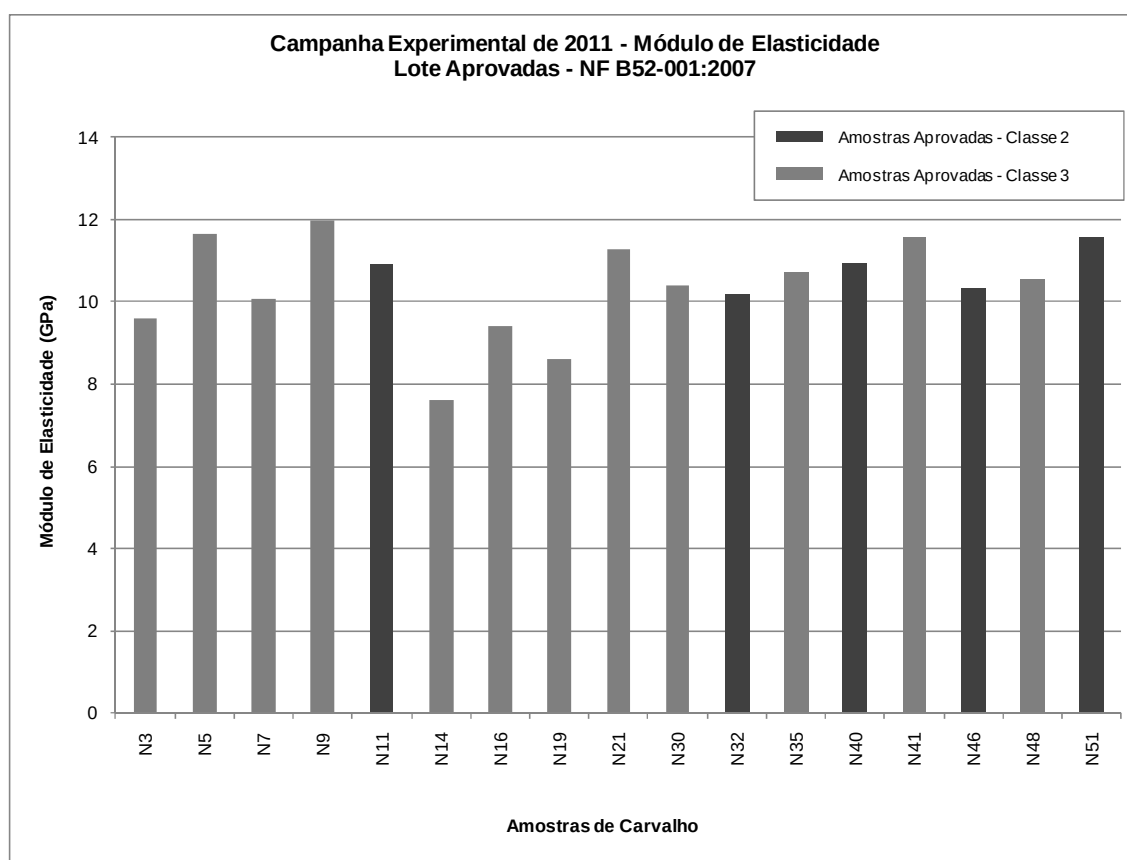


Fig. 5.35 - Lote aprovadas - Norma NF B52-001:2007: módulo de elasticidade.

5.7.3. SÍNTESE DE RESULTADOS

Depois do tratamento estatístico realizado para o conjunto total dos provetes e para os subconjuntos de amostras aprovadas pelo método *Amorim Faria* e pela norma NF B52-001:2007, tanto para a resistência à flexão (f_m) como para o módulo de elasticidade (E_0), interessa agora sintetizar todos os valores obtidos de forma a poder tirar conclusões precisas e pertinentes. O quadro 5.19 engloba todas as grandezas estatísticas determinadas anteriormente para ambas as propriedades citadas.

Quadro 5.19 - Campanha experimental de 2011 - Síntese de resultados.

Campanha 2011	Propriedades mecânicas					
	f_m (MPa)			E_0 (GPa)		
	Completo	Aprovadas		Completo	Aprovadas	
Lote		AF	NF		AF	NF
Valor máximo	86,6	86,6	86,6	12,0	12,0	12,0
Valor mínimo	17,4	26,4	26,9	6,7	7,3	7,6
Valor médio	53,1	55,0	57,0	9,9	10,2	10,4
Desvio padrão	12,7	13,2	13,1	1,3	1,2	1,1
Coefficiente variação	23,9 %	23,4 %	23,0 %	12,6 %	11,7 %	11,0 %
Valor característico	32,3	33,4	35,5	7,9	8,2	8,6

Legenda: AF – Método *Amorim Faria*; NF – Norma NF B52-001:2007.

Analisando o quadro 5.19, verifica-se que, tanto para a resistência à flexão como para o módulo de elasticidade, o valor médio vai subindo da esquerda para a direita, ou seja, apresenta o valor mínimo para o conjunto total e o valor máximo para o subconjunto de amostras aprovadas pela norma NF B52-001:2007. Este facto contribui para que o valor característico também cresça, visto que para ambas as propriedades mecânicas referidas o valor do desvio padrão de mantém praticamente constante.

A exigência da norma NF B52-001:2007 não se reflectiu em grupos mais homogêneos, verificando-se dispersões relativamente mais pequenas em comparação com os restantes conjuntos. No que diz respeito à resistência à flexão e ao módulo de elasticidade, constata-se que o primeiro apresenta coeficientes de variação razoáveis, ao contrário do segundo que evidencia menores variabilidades.

Porém, é importante realçar que o tratamento estatístico foi efectuado sobre conjuntos de diferentes dimensões, ou seja, 51 peças no caso do lote completo, 30 no caso do subconjunto de aprovadas pelo método *Amorim Faria* e 17 no caso do subconjunto de amostras aprovadas pela norma francesa NF B52-001:2007. Seguindo a ordem referida, a representatividade dos valores estatísticos apresentados é assim decrescente.

6

CONCLUSÃO

6.1. RESULTADOS OBTIDOS - CONCLUSÕES

6.1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

A madeira é um material anisotrópico e extremamente heterogêneo e, por isso, a sua utilização na construção de estruturas requer um controlo de qualidade eficaz que exclua peças que possam comprometer a segurança dos utentes. Antigamente, o número de peças rejeitadas era significativo, dado que a sua utilização era empírica e essa era a única forma de garantir a segurança, no entanto, o aparecimento da experimentação mecânica e da estatística contribuiu para inverter essa tendência. A evolução referida conduziu à classificação visual, processo usado actualmente, que permite atribuir valores resistentes às peças de madeira. Contudo, em Portugal, não existe qualquer suporte normativo aplicável a madeira de Carvalho e, por isso, a utilização desta espécie florestal em estruturas está, à partida, muito condicionada.

Conforme já foi referido, a campanha experimental executada no âmbito da presente dissertação incidiu, em particular, sobre madeira de Carvalho português. Porém, em termos estruturais interessa sobretudo o género (Carvalho) e não a espécie (português). Além do Cerquinho (*Quercus faginea*), os Carvalhos predominantes em Portugal são o Negral (*Quercus pyrenaica*) e o Roble (*Quercus robur*), todos pertencentes à mesma família botânica e, por isso, tendo necessariamente uma estrutura anatómica idêntica, evidenciam propriedades físicas e mecânicas semelhantes. Assim, em termos gerais, as conclusões de âmbito estrutural que se apresentam no presente capítulo, e que resultaram do trabalho experimental efectuado, são extensíveis às duas restantes espécies de Carvalho atrás mencionadas.

A análise dos resultados obtidos permitiu tirar algumas conclusões/constatações de carácter geral a diferentes níveis, designadamente:

i. Propriedades físicas e mecânicas

- Os resultados obtidos para a massa volúmica, resistência à flexão e módulo de elasticidade foram elevados, justificando o uso da madeira de Carvalho em estruturas;
- Em termos médios, comparativamente à madeira antiga utilizada nas campanhas precedentes, os valores da massa volúmica e da resistência à flexão evidenciados pela madeira nova de Carvalho são superiores. O mesmo não acontece em relação ao módulo de elasticidade, verificando-se, neste caso, valores semelhantes;

- Verificou-se, em alguns casos, uma boa correspondência entre os valores da resistência à flexão e do módulo de elasticidade, o mesmo não acontecendo entre a resistência à flexão e a massa volúmica.

ii. Mecanismos de rotura

- Os defeitos diminuem claramente a resistência mecânica das peças estruturais de madeira, em particular os nós. A sua presença interrompe ou provoca a inclinação pontual do fio, facto que induz tensões transversais que precipitam a rotura da peça;
- Praticamente todas as roturas do tipo A (esgotamento da capacidade resistente) ocorreram no terço central ou na zona de aplicação de uma das cargas. Uma vez que este tipo de rotura não é induzido por nenhum tipo de defeito, seria de prever que sucedessem no segmento mais esforçado do provete;
- Não se verificou nenhuma rotura por corte.

iii. Comportamento à solicitação

- Todos os provetes evidenciaram o mesmo tipo de comportamento numa primeira fase, ou seja, até se atingir a força limite o diagrama força – deformação é praticamente linear;
- Após se alcançar a carga máxima observam-se dois tipos de comportamento: “plástico” e frágil. O primeiro caracteriza-se por evidenciar uma deformação significativa após se ter atingido o carregamento limite e o segundo por apresentar uma quebra repentina da força aplicada sem qualquer deslocamento associado.

Em síntese, pode-se afirmar que a madeira de Carvalho tem uma capacidade resistente que permite a sua utilização como elemento estrutural, embora se perspetive que essa capacidade venha a diminuir com o tempo. Como consequência do carácter heterogéneo da madeira, o seu comportamento é imprevisível e, apesar de se verificarem tendências, não se consegue antever o mecanismo de rotura e o seu comportamento ao carregamento.

6.1.2. APLICABILIDADE DO MÉTODO *AMORIM FARIA* NA CLASSIFICAÇÃO VISUAL DE MADEIRA NOVA DE CARVALHO

Recorde-se que o método *Amorim Faria* surgiu para dar resposta à inexistência de qualquer suporte normativo a nível nacional que auxiliasse a inspecção de estruturas *in situ*. Contudo, verificou-se que a sua utilização na classificação visual de madeira antiga não é fiável. Assim sendo, a avaliação da capacidade resistente de peças estruturais existentes constitui um trabalho bastante complexo que, em alguns casos, pode ser auxiliado por técnicas não destrutivas. É imperativo que essa análise seja executada por um técnico com conhecimentos estruturais e experiência que permita identificar as peças a avaliar e tirar conclusões que conduzam a uma solução segura e simultaneamente económica.

Uma vez declinada a aplicação do método *Amorim Faria* na avaliação da capacidade resistente de madeira antiga e, tendo em conta as lacunas normativas existentes em Portugal ao nível da classificação visual de peças provenientes da serração, estudou-se a sua aplicabilidade a madeira nova de Carvalho. A campanha experimental executada no âmbito da presente dissertação permitiu fazer as seguintes observações:

- Todas as vigas aprovadas pelo método evidenciaram uma resistência à flexão superior a 21,0 MPa, valor proposto pela via de classificação referida, o que garante total confiança na sua aplicação a madeira nova no que a esta propriedade mecânica diz respeito;
- Em relação ao módulo de elasticidade, constatou-se que apenas dois dos provetes aprovados não atingiram os 8,0 GPa atribuídos pelo método, embora por diferenças pouco significativas, facto que mostra que o valor proposto é adequado.

Perante o exposto, conclui-se que a aplicação do método *Amorim Faria* na classificação visual de madeira nova de Carvalho é aparentemente bastante segura e poderá constituir o primeiro passo para a elaboração de uma futura norma. A sua utilização pretende ser um processo simples e prático que permita atribuir valores às propriedades mecânicas, nomeadamente à resistência à flexão e ao módulo de elasticidade. Apresenta-se de seguida uma nova versão do quadro resumo do método referido após uma ligeira revisão que se julgou necessária, incluindo:

- Retirada da massa volúmica como critério;
- Reformulação do critério dos nós, retirando a limitação inferior (desnecessária). Convém referir que se fizeram simulações de classificação com outras metodologias simples associadas ao critério nós, como por exemplo a percentagem da secção ocupada pelo nó, tendo-se concluído que os efeitos na classificação são reduzidos;
- Retirada do critério “alterações biológicas”.

Quadro 6.1 - Método *Amorim Faria*: classificação visual *in situ* – Carvalho.

Defeitos	Categoria em obra – Aprovada	
Nós	$\varnothing \leq 40$ (mm)	
Descaio	$L_d < 33\%$ de L e $L_d < 100$ 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 ou h)
	Repasadas	$r \geq \max(f_1, f_2)$ e/ou $(f_1 + f_2) \leq 2/3 b$

Legenda (sugere-se a consulta simultânea do quadro 5.4):

b – Largura da peça	$\varnothing$ – Diâmetro dos nós	L_f – Comprimento das fendas
h – Altura da peça	L_d – Comprimento do descaio	f – Profundidade das fendas
L – Comprimento da peça	i – Inclinação do fio	r – Distância entre fendas

6.1.3. APLICABILIDADE DA NORMA FRANCESA NF B52-001:2007 ÀS ESPÉCIES DE CARVALHO EXISTENTES EM PORTUGAL

A norma NF B52-001:2007 está particularmente vocacionada para ser aplicada na classificação visual do Carvalho roble (*Quercus robur*), espécie predominante em França. No entanto, na presente dissertação, o referido documento normativo foi aplicado a outra espécie de *Quercus* e, a verificar-se uma resposta positiva, poderia porventura concluir-se que a utilização da norma em apreço é extensível às duas restantes espécies de Carvalho existentes no nosso país: Cerquinho (*Quercus faginea*) e Negral (*Quercus pyrenaica*).

A campanha experimental realizada no âmbito do presente trabalho permitiu comparar os valores obtidos para as propriedades mecânicas, nomeadamente a resistência à flexão e o módulo de elasticidade, com os propostos pela classificação visual executada previamente. Dessa análise pôde-se verificar vários aspectos, designadamente:

- Todas as vigas aprovadas de classe 2 e 3 obtiveram resistência à flexão superior a 24,0 e 18,0 MPa, respectivamente, o que valida os valores propostos pela norma e revela a sua aplicabilidade a outras espécies de Carvalho;
- No que diz respeito ao módulo de elasticidade, verificou-se que algumas das peças aprovadas de classe 2 e 3 não atingiram os valores propostos de 11,0 e 9,0 GPa, respectivamente. Em relação a esta propriedade mecânica verifica-se que a norma sobrestima a rigidez das peças de madeira.

Conclui-se, portanto, que a norma NF B52-001:2007 é aplicável às três espécies de Carvalho existentes em Portugal, no entanto, demonstrou ser demasiado exigente, conduzindo à rejeição de uma grande quantidade de peças que, no presente caso, atingiu os 67,0 %. Assim sendo, a utilização do documento citado na classificação visual de peças de madeira de Carvalho é um processo muito limitador na perspectiva do interesse económico da utilização desta espécie florestal para fins estruturais. Comparativamente ao método *Amorim Faria*, a via de classificação em apreço é bastante menos tolerante, facto confirmado pela menor variabilidade apresentada pelo subconjunto de amostras aprovadas para ambas as propriedades mecânicas determinadas.

6.1.4. CLASSE DE RESISTÊNCIA ADEQUADA À MADEIRA DE CARVALHO

Conforme se referiu no capítulo 3, a norma EN 338:2009 propõe um conjunto de classes de resistência aplicáveis a todas as madeiras, às quais estão associados valores para as propriedades físicas e mecânicas. Ora, tendo presente os resultados do trabalho experimental realizado no âmbito da presente tese, é possível averiguar quais as classes de resistência adequadas à madeira de Carvalho existente em Portugal.

Os valores da massa volúmica, resistência à flexão e módulo de elasticidade que resultaram do tratamento estatístico efectuado enquadram a madeira de Carvalho português na classe de resistência D30. No entanto, de modo a garantir maior margem de segurança e total fiabilidade, julga-se conveniente subestimar os valores das propriedades mecânicas referidas. Deste modo, entende-se que as classes de resistência adequadas à madeira de Carvalho são: D18 e D24 (tal como definidas na norma NF B52-001:2007), provavelmente devendo em Portugal apenas usar-se a classe D18.

A atribuição das classes de resistência supracitadas diminui a capacidade resistente efectiva das peças estruturais de madeira e também o seu peso, ou seja, aumentamos a segurança por um lado e diminuímos (teoricamente) por outro. Os valores obtidos para a massa volúmica na campanha experimental efectuada no âmbito da presente tese são manifestamente superiores aos propostos no quadro 3.3 para as classes de resistência supracitadas ($\approx 400 \text{ kg/m}^3$). As diferenças não são desprezáveis e, por isso, este dado deve ser tido em conta na determinação do peso próprio de uma estrutura de Carvalho, tendo repercussões nomeadamente ao nível do dimensionamento dos elementos verticais resistentes.

6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

A aplicação do método *Amorim Faria* na classificação visual de madeira antiga constitui um processo pouco fiável e, por isso, não deve ser utilizado nessas condições. Chega assim ao fim a tentativa de ultrapassar de uma forma prática as dificuldades que a inspecção visual *in situ* apresenta, concluindo-se que esse trabalho deve ser executado por um técnico com conhecimentos estruturais e experiência que conduza a uma solução segura e ao mesmo tempo económica.

Com o desenvolvimento da presente dissertação, o método *Amorim Faria* ganhou uma nova vida na medida em que se abriu uma nova porta para a sua aplicação. Conforme se concluiu anteriormente, a via de classificação referida é aplicável de forma segura e prudente na classificação visual de madeira nova de Carvalho. Este é, porventura, o caminho que o método seguirá, usufruindo das lacunas existentes em Portugal ao nível normativo.

A campanha experimental executada no âmbito do presente trabalho utilizou amostras de Carvalho português (*Quercus faginea*) e, tal como se mencionou, as conclusões estenderam-se às duas restantes espécies de Carvalho predominantes em Portugal: Negral (*Quercus pyrenaica*) e Roble (*Quercus robur*). Para a engenharia de estruturas apenas é relevante o género, justificando a “generalização” mencionada que se sustenta no facto das espécies referidas terem uma estrutura anatómica idêntica. Perante o exposto, sugere-se que sejam realizadas novas campanhas experimentais que utilizem amostras das duas espécies citadas com os seguintes objectivos:

- Reforçar a adequação do método *Amorim Faria* a madeira nova de Carvalho;
- Confirmar a aplicabilidade da norma NF B52-001:2007 às espécies existentes em Portugal;
- Sustentar as classes de resistência sugeridas;
- Incrementar o conhecimento sobre a espécie utilizada, complementando o conhecimento adquirido nesta tese sobre o Carvalho português.

Juntamente com os resultados obtidos na presente dissertação, os estudos citados permitiriam avançar com uma base sólida de conhecimento no sentido de se poder propor uma norma que viesse colmatar as lacunas de classificação visual existentes em Portugal. A verificar-se, este seria um importante passo na valorização dos Carvalhais e na consciencialização das entidades públicas e privadas no sentido de tomarem medidas que conduzissem à exploração sustentada desses bosques.

É sabido que os sistemas estruturais antigos utilizavam soluções mistas de madeira de Carvalho e Castanho e, por isso, o método *Amorim Faria* tentava atribuir na sua origem valores resistentes a ambas as espécies referidas. Assim, à semelhança do trabalho efectuado na presente tese e tendo em conta que as campanhas experimentais precedentes ensaiaram provetes de Castanho, julga-se oportuno avaliar também a aplicabilidade do método a madeira nova dessa espécie florestal.

Deste modo, desenvolve-se o processo de classificação visual de peças novas de madeira de Carvalho e Castanho que possam vir a ser usadas na substituição ou reforço de estruturas existentes em obras de reabilitação. Saliente-se, porém, que o tipo de intervenção a realizar passará sempre pelo parecer de um técnico após uma correcta avaliação da capacidade resistente das peças em pior estado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arriaga, F., Peraza, F., Esteban, M., Bobadilla, I., Garcia, F. (2002). *Intervencion en estructuras de madera*. Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera (AITIM), Madrid.
- Benoit, Y. (1997). *Le guide des essences de bois*. Centre Technique du Bois et de l'Ameublement (CTBA), Paris.
- Botelho, J. (2006). *Avaliação não destrutiva da capacidade resistente de estruturas de madeira de edifícios antigos*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Cachim, P. (2007). *Construções em madeira – A madeira como material de construção*. Publindústria, Porto.
- Candian, M. (2007). *Estudo da classificação não destrutiva de peças serradas de espécies cultivadas no Brasil para uso em estruturas*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de São Carlos.
- Carvalho, A. (1996). *Madeiras Portuguesas – Vol. 1*. Instituto Florestal. Lisboa.
- Catry, F., Bugalho, M., Silva, J. (2007). *Recuperação da Florestal após o Fogo – O caso da Tapada Nacional de Mafra*. Instituto Superior de Agronomia, Lisboa.
- Clémence, J., Péron, F. (1995). *Le Chêne*. Actes Sud, Arles.
- Coutinho, J. (1999). *Sebenta de materiais de construção 1 – Madeiras*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Dias, T. (2008). *Pavimentos de Madeira em Edifícios Antigos. Diagnóstico e Intervenção Estrutural*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- DIN 4074-1:2008. *Sortierung von Nadelholz nach der Tragushingkeit*. Deutsches Institut für Normung (DIN). Berlin.
- EN 1310:1997. *Round and sawn timber – Method of measurement of features*. Comité Européen de Normalização (CEN). Bruxelas.
- EN 14081-1:2005. *Timber structures – Strength graded structural timber with rectangular cross section – Part 1: General requirements*. Comité Européen de Normalização (CEN). Bruxelas.
- EN 14081-2:2010. *Timber structures – Strength graded structural timber with rectangular cross section – Part 2: Machine grading; additional requirements for initial type testing*. Comité Européen de Normalização (CEN). Bruxelas.
- EN 14081-3:2005. *Timber structures – Strength graded structural timber with rectangular cross section – Part 3: Machine grading; additional requirements for factory production control*. Comité Européen de Normalização (CEN). Bruxelas.
- EN 14081-4:2009. *Timber structures – Strength graded structural timber with rectangular cross section – Part 4: Machine grading – Grading machine settings for machine controlled systems*. Comité Européen de Normalização (CEN). Bruxelas.
- EN 1611-1:1999. *Sawn timber – Appearance grading of softwoods – Part 1: European spruces, firs, pines and Douglas firs*. Comité Européen de Normalização (CEN). Bruxelas.
- EN 1912:2004. *Structural timber – Strength classes – Assignment of visual grades and species*. Comité Européen de Normalização (CEN). Bruxelas.

EN 1995-1-1:2004. *Eurocode 5 – Design of timber structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings*. Comité Européu de Normalização (CEN). Bruxelas.

EN 338:2009. *Structural timber – Strength classes*. Comité Européu de Normalização (CEN). Bruxelas.

EN 384:2010. *Structural timber – Determination of characteristics values of mechanical properties and density*. Comité Européu de Normalização (CEN). Bruxelas.

EN 408:2003. *Timber structures – Structural timber and glued laminated timber – Determination of some physical and mechanical properties*. Comité Européu de Normalização (CEN). Bruxelas.

EN 975-1:2009. *Sawn timber – Appearance grading of hardwoods – Part 1: Oak and beech*. Comité Européu de Normalização (CEN). Bruxelas.

EN 975-2:2004. *Sawn timber – Appearance grading of hardwoods – Part 2: Poplars*. Comité Européu de Normalização (CEN). Bruxelas.

Franco, S. (2008). *Proposta de Atribuição de Propriedades Mecânicas a Elementos Estruturais de Madeira por Inspeção Visual IN SITU*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

INSTA 142:2009. *Nordic visual strength grading rules for timber*. Internordic Standardization (INSTA).

Louzada, J., Gaspar, M., Bento, E. (2005). *Uso do Pilodyn para a estimativa da densidade da madeira de Eucalyptus nitens*. V Congresso Florestal Nacional – A floresta e as gentes, Maio de 2005, Viseu, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real.

Machado, J. (1996). *Madeira da Folhosas e Resinosas: Nomenclatura comercial*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa.

Machado, J. (2003). *Avaliação da Variação das Propriedades Mecânicas de Pinho bravo (Pinus pinaster Ait.) por meio de Ultra-sons*. Dissertação de Doutoramento, Universidade Técnica de Lisboa.

Martins, S. (2009). *Estruturas de Madeira – Inspeção e Diagnóstico. Aplicação em Caso de Estudo*. Dissertação de Mestrado. Universidade do Minho – Escola de Engenharia.

Negrão, J., Faria, A. (2009). *Projecto de Estruturas de Madeira*. Publindústria, Porto.

NF B52-001:1998. *Règles d'utilisation du bois dans les constructions – Classement visuel pour l'emploi en structure des principales essences résineuses et feuillues*. Association Française de Normalisation (AFNOR). Paris.

NF B52-001:2007. *Règles d'utilisation du bois dans la construction – Classement visuel pour l'emploi en structures des bois sciés français résineux et feuillus*. Association Française de Normalisation (AFNOR). Paris.

NP 4305:1995. *Madeira serrada de pinheiro bravo para estruturas: Classificação visual*. Instituto Português da Qualidade (IPQ). Lisboa.

NP 616:1973. *Determinação da massa volúmica*. Instituto Português da Qualidade (IPQ). Lisboa.

Pedro, J. (1989). *Carta de Distribuição de Carvalhos e Castanheiro*. Direcção-Geral dos Recursos Naturais, Lisboa.

- Pereira, S. (2009). *Avaliação Experimental das Principais Propriedades Mecânicas de Peças Estruturais em Madeira Antiga*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Quoirin, N. (2004). *Diagnóstico de defeitos em madeira por tomografia de raios-X*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba.
- Ramos, A. (2010). *Avaliação do Comportamento Mecânico de Madeira Antiga*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto.
- Ramos, S. (2009). *Caracterização das propriedades mecânicas e durabilidade biológica da madeira de Quercus faginea*. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior de Agronomia.
- Rosa, W. (2007). *Madeiras*. Universidade Federal da Bahia – Escola Politécnica. Bahia.
- Santos, J. (2007). *Estudo de Modelos e Caracterização do Comportamento Mecânico da Madeira*. Dissertação de Doutoramento, Universidade do Minho – Escola de Engenharia.
- Silva, J. (2007a). *Guia de Campo – As árvores e os arbustos de Portugal continental*. Público, Lisboa.
- Silva, J. (2007b). *Os Carvalhais – Um património a conservar*. Público, Lisboa.
- Sousa, V., Cardoso, S., Pereira, H. (2009a). *Caracterização da Composição Química da Madeira de Quercus faginea*. 6º Congresso Florestal Nacional – A floresta num mundo globalizado, Outubro de 2009, Ponta Delgada, SPCF, Lisboa.
- Sousa, V., Cardoso, S., Pereira, H. (2009b). *Estrutura e Caracterização Anatômica da Madeira de Carvalho-Português (Quercus faginea Lam.)*. 6º Congresso Florestal Nacional – A floresta num mundo globalizado, Outubro de 2009, Ponta Delgada, SPCF, Lisboa.
- UNE 56544:2003. *Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural: madera de coníferas*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Madrid.
- UNI 11119:2004. *Beni culturalli. Manufatti lignei. Strutture portanti degli edifici - Ispezione in situ per la diagnosi degli elementi in opera*. Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI). Milão.

ANEXOS

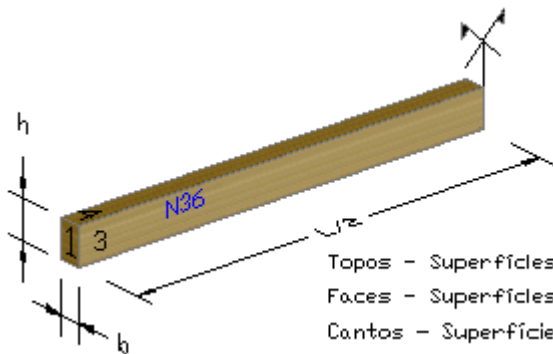
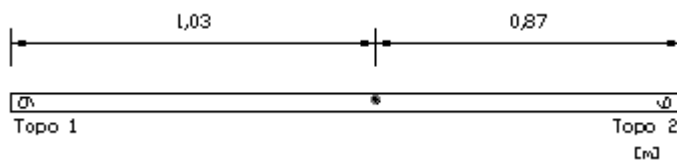
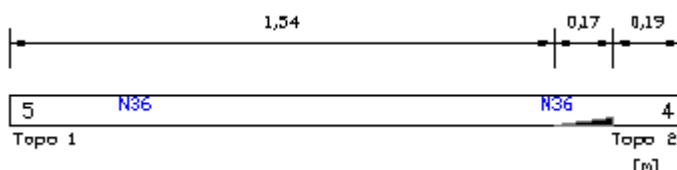
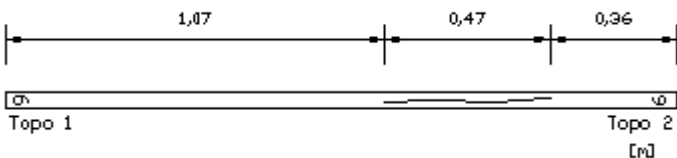
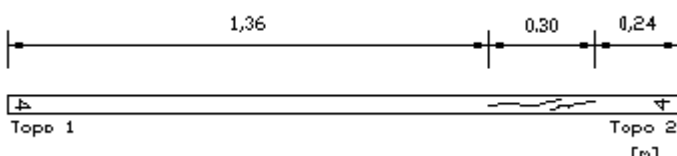
ANEXO I

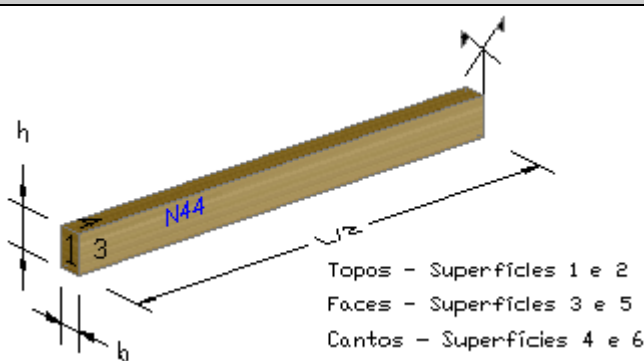
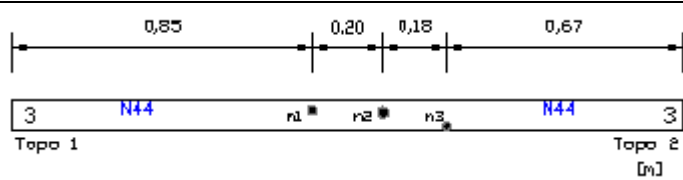
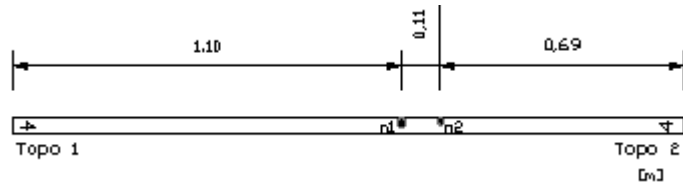
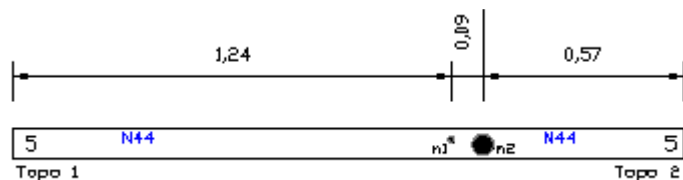
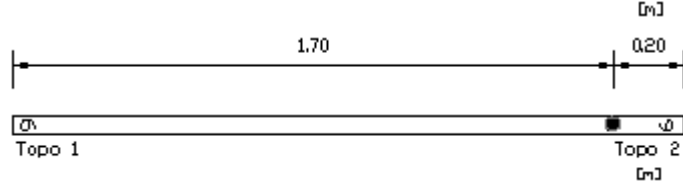
DIMENSÕES DAS AMOSTRAS

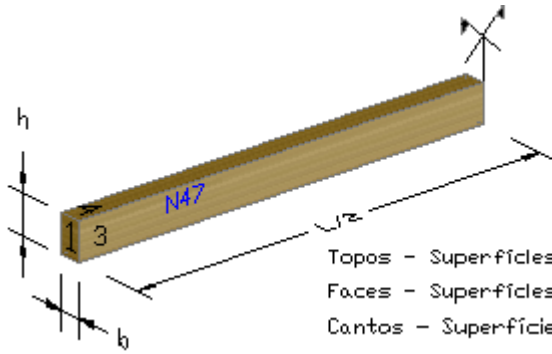
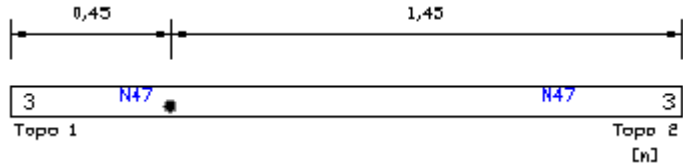
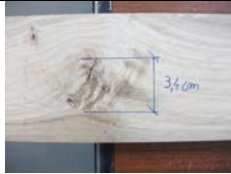
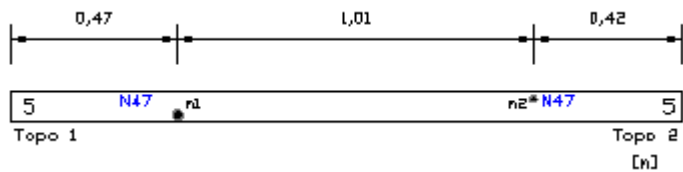
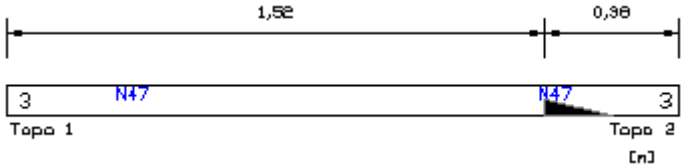
Dimensões das amostras									
Amostra	Secção EE'		Secção CC'		Secção DD'		L (m)	Média	
	b (cm)	h (cm)	b (cm)	h (cm)	b (cm)	h (cm)		b (cm)	h (cm)
N1	4,80	8,45	4,80	8,50	4,80	8,40	1,90	4,80	8,45
N2	4,80	8,50	4,80	8,50	4,80	8,50	1,90	4,80	8,50
N3	4,80	8,45	4,80	8,50	4,80	8,50	1,90	4,80	8,48
N4	4,80	8,50	4,60	8,50	4,70	8,50	1,90	4,70	8,50
N5	4,70	8,45	4,70	8,50	4,70	8,50	1,90	4,70	8,48
N6	4,80	8,45	4,80	8,50	4,80	8,50	1,90	4,80	8,48
N7	4,80	8,45	4,80	8,45	4,80	8,50	1,90	4,80	8,47
N8	4,80	8,50	4,75	8,50	4,80	8,50	1,90	4,78	8,50
N9	4,80	8,50	4,80	8,45	4,80	8,50	1,90	4,80	8,48
N10	4,70	8,40	4,80	8,45	4,80	8,45	1,90	4,77	8,43
N11	4,80	8,45	4,80	8,45	4,80	8,50	1,90	4,80	8,47
N12	4,75	8,50	4,75	8,45	4,80	8,50	1,90	4,77	8,48
N13	4,80	8,45	4,80	8,50	3,80	8,50	1,90	4,47	8,48
N14	4,80	8,30	4,80	8,50	4,80	8,50	1,90	4,80	8,43
N15	4,80	8,50	4,80	8,50	4,80	8,50	1,90	4,80	8,50
N16	4,80	8,45	4,75	8,50	4,75	8,50	1,90	4,77	8,48
N17	4,80	8,45	4,80	8,45	4,80	8,45	1,90	4,80	8,45
N18	4,80	8,50	4,80	8,50	4,80	8,50	1,90	4,80	8,50
N19	4,80	8,45	4,80	8,45	4,80	8,45	1,90	4,80	8,45
N20	4,80	8,50	4,85	8,50	4,80	8,50	1,90	4,82	8,50
N21	4,80	8,50	4,80	8,50	4,80	8,50	1,90	4,80	8,50
N22	4,70	8,40	4,70	8,45	4,80	8,50	1,90	4,73	8,45
N23	4,80	8,50	4,80	8,50	4,80	8,50	1,90	4,80	8,50
N24	4,75	8,50	4,75	8,50	4,80	8,50	1,90	4,77	8,50
N25	4,80	8,50	4,80	8,50	4,80	8,50	1,90	4,80	8,50
N26	4,80	8,50	4,80	8,45	4,80	8,50	1,90	4,80	8,48
N27	4,85	8,50	4,90	8,50	4,85	8,50	1,90	4,87	8,50
N28	4,80	8,50	4,80	8,50	4,85	8,50	1,90	4,82	8,50
N29	4,80	8,45	4,80	8,45	4,80	8,45	1,90	4,80	8,45
N30	4,80	8,50	4,80	8,50	4,80	8,45	1,90	4,80	8,48
N31	4,80	8,50	4,80	8,50	4,80	8,50	1,90	4,80	8,50
N32	4,80	8,50	4,80	8,50	4,80	8,50	1,90	4,80	8,50
N33	4,75	8,50	4,75	8,50	4,75	8,50	1,90	4,75	8,50
N34	4,80	8,50	4,80	8,50	4,80	8,50	1,90	4,80	8,50
N35	4,80	8,45	4,80	8,45	4,80	8,45	1,90	4,80	8,45
N36	4,80	8,50	4,80	8,50	4,80	8,50	1,90	4,80	8,50
N37	4,80	8,45	4,80	8,50	4,80	8,50	1,90	4,80	8,48
N38	4,85	8,50	4,80	8,50	4,80	8,50	1,90	4,82	8,50
N39	4,80	8,50	4,80	8,50	4,80	8,50	1,90	4,80	8,50
N40	4,75	8,50	4,80	8,50	4,80	8,50	1,90	4,78	8,50
N41	4,80	8,50	4,80	8,50	4,80	8,50	1,90	4,80	8,50
N42	4,80	8,50	4,80	8,50	4,80	8,50	1,90	4,80	8,50
N43	4,85	8,45	4,85	8,45	4,85	8,50	1,90	4,85	8,47
N44	4,80	8,50	4,80	8,45	4,80	8,50	1,90	4,80	8,48
N45	4,80	8,50	4,80	8,50	4,80	8,50	1,90	4,80	8,50
N46	4,75	8,45	4,75	8,45	4,75	8,50	1,90	4,75	8,47
N47	4,75	8,50	4,75	8,40	4,75	8,45	1,90	4,75	8,45
N48	4,75	6,50	4,80	6,50	4,80	6,50	1,90	4,78	6,50
N49	4,80	6,50	4,80	6,50	4,80	6,50	1,90	4,80	6,50
N50	4,80	6,45	4,80	6,50	4,85	6,45	1,90	4,82	6,47
N51	4,70	6,50	4,80	6,50	4,70	6,50	1,90	4,73	6,50

ANEXO II

FICHAS DE CLASSIFICAÇÃO VISUAL - EXEMPLOS

FICHA DE CLASSIFICAÇÃO VISUAL (FCV)			
Amostra N.º		36	 Topos - Superfícies 1 e 2 Faces - Superfícies 3 e 5 Cantos - Superfícies 4 e 6
Espécie		Carvalho português	
Dimensões	h (cm)	8,50	
	b (cm)	4,80	
	L (m)	1,90	
M (kg)		7,71	
ρ (kg/m³)		995,10	
MEDIÇÃO DE DEFEITOS (QUADRO 5.4)			
Nós		Exibe apenas um único nó localizado num canto dos cantos.	
Canto 6 Ø = 2,3 cm		 	
DESCAIO		Não apresenta.	
INCLINAÇÃO DO FIO		Não pode ser ignorada e é pontualmente mais acentuada junto ao nó do canto 6.	
Face 5 y = 1,8 cm u = 17,0 cm i = 10,6 %		 	
FENDAS		Contém uma fenda não desprezável na direcção longitudinal da peça.	
Canto 6 Lf = 47,0 cm f _{máx} = 2,0 cm		 	
COMENTÁRIOS		Evidência duas fendas paralelas e desprezáveis.	
Canto 4 Lf = 30,0 cm f _{máx} = 0,6 cm		 	
CLASSIFICAÇÃO VISUAL			
Classe de qualidade – Método Amorim Faria (Aprovada / Rejeitada)			Aprovada
Classe de qualidade – Norma francesa NF B52-001:2007 (Classe 1, 2 ou 3 / Rejeitada)			Rejeitada

FICHA DE CLASSIFICAÇÃO VISUAL (FCV)			
Amostra N.º		44	
Espécie		Carvalho português	
Dimensões	h (cm)	8,48	
	b (cm)	4,80	
	L (m)	1,90	
M (kg)		7,77	
ρ (kg/m³)		1003,84	
MEDIÇÃO DE DEFEITOS (VER QUADRO 5.4)			
Nós		Exibe vários nós distribuídos por diversas superfícies.	
Face 3	Ø ₁ = 2,6 cm Ø ₂ = 3,1 cm Ø ₃ = 2,1 cm		
Canto 4	Ø ₁ = 2,8 cm Ø ₂ = 2,0 cm		
Face 5	Ø ₁ = 1,8 cm Ø ₂ = 6,0 cm		
Canto 6	Ø = 4,0 cm		
DESCAIO		Não apresenta.	
INCLINAÇÃO DO FIO		Desprezável, embora seja pontualmente mais acentuada junto aos nós.	
FENDAS		Não evidência.	
COMENTÁRIOS			
CLASSIFICAÇÃO VISUAL			
Classe de qualidade – Método Amorim Faria (Aprovada / Rejeitada)			Rejeitada
Classe de qualidade – Norma francesa NF B52-001:2007 (Classe 1, 2 ou 3 / Rejeitada)			Rejeitada

FICHA DE CLASSIFICAÇÃO VISUAL (FCV)			
Amostra N.º	47		 Topos - Superfícies 1 e 2 Faces - Superfícies 3 e 5 Cantos - Superfícies 4 e 6
Espécie	Carvalho português		
Dimensões	h (cm)	8,45	
	b (cm)	4,75	
	L (m)	1,90	
M (kg)	7,65		
ρ (kg/m ³)	1002,74		
MEDIÇÃO DE DEFEITOS (VER QUADRO 5.4)			
Nós	Exibe 3 nós localizados nas faces.		
Face 3	$\varnothing = 3,4$ cm  		
Face 5	$\varnothing_1 = 3,0$ cm $\varnothing_2 = 1,8$ cm   		
DESCAIO	Não apresenta.		
INCLINAÇÃO DO FIO	Não pode ser desprezada e é localmente mais acentuada junto aos nós.		
Face 3	$y = 4,2$ cm $u = 19,0$ cm $i = 22,1$ %  		
FENDAS	Não evidência.		
COMENTÁRIOS			
CLASSIFICAÇÃO VISUAL			
Classe de qualidade – Método Amorim Faria (Aprovada / Rejeitada)			Rejeitada
Classe de qualidade – Norma francesa NF B52-001:2007 (Classe 1, 2 ou 3 / Rejeitada)			Rejeitada

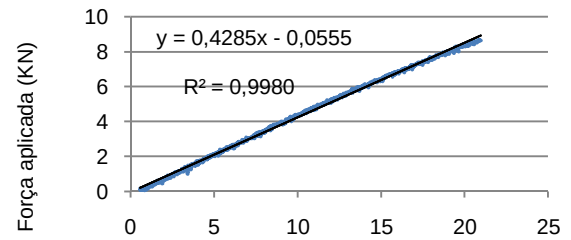
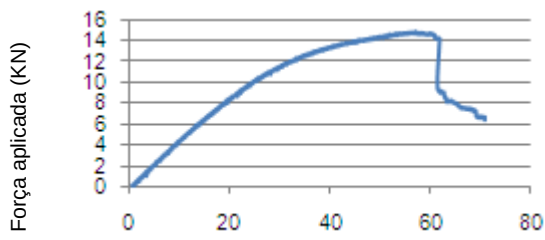
ANEXO III

GRÁFICOS FORÇA - DEFORMAÇÃO

GRÁFICO FORÇA - DEFORMAÇÃO

ANÁLISE DE REGRESSÃO

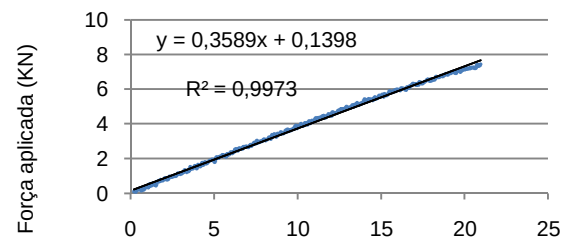
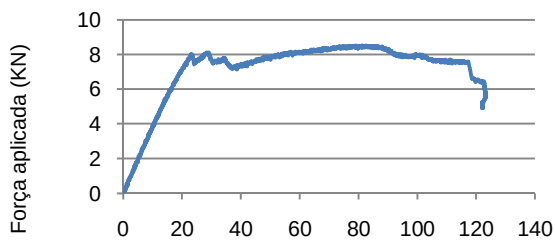
N1



Deformação a meio vão (mm)

Deformação a meio vão (mm)

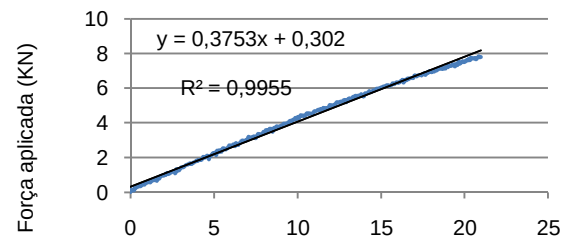
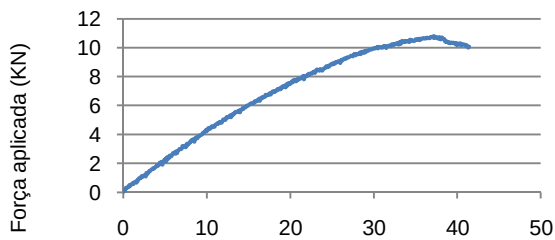
N2



Deformação a meio vão (mm)

Deformação a meio vão (mm)

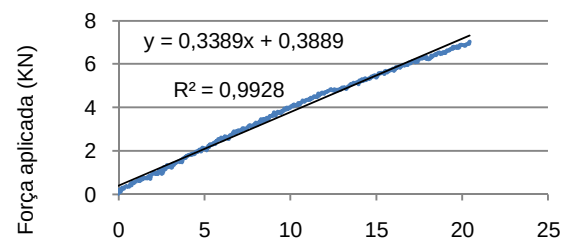
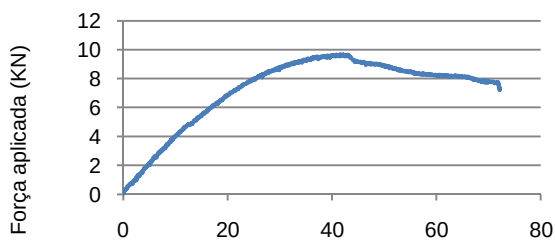
N3



Deformação a meio vão (mm)

Deformação a meio vão (mm)

N4



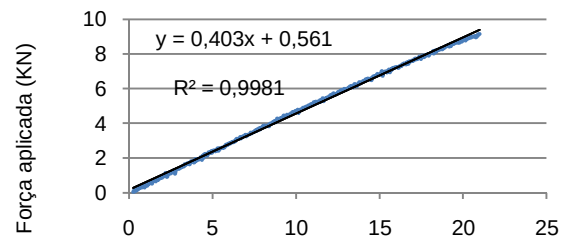
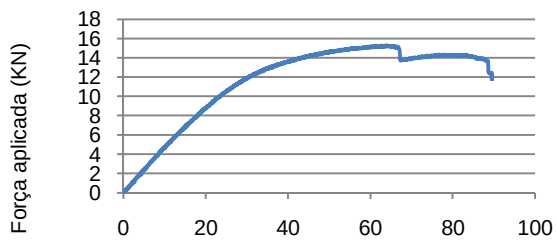
Deformação a meio vão (mm)

Deformação a meio vão (mm)

GRÁFICO FORÇA - DEFORMAÇÃO

ANÁLISE DE REGRESSÃO

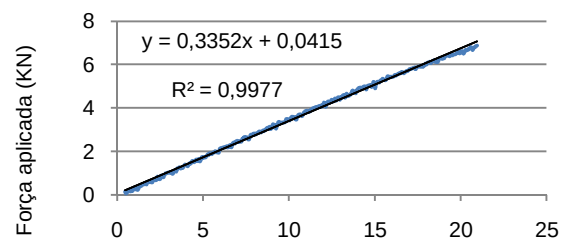
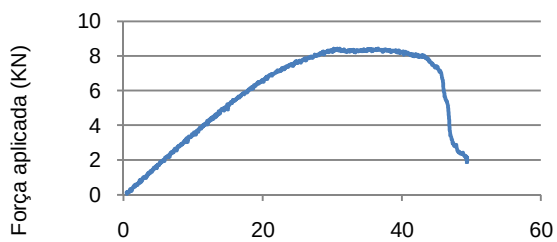
N5



Deformação a meio vão (mm)

Deformação a meio vão (mm)

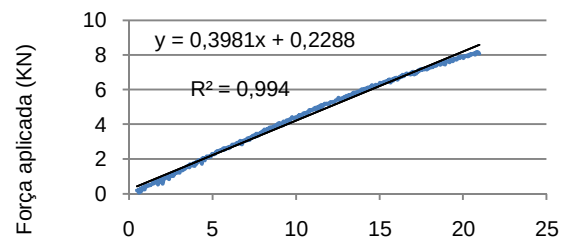
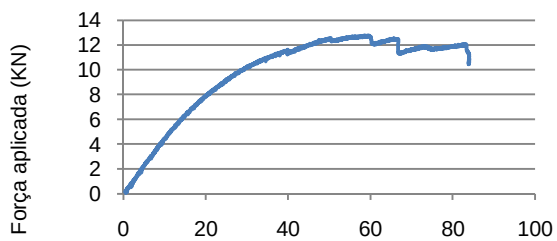
N6



Deformação a meio vão (mm)

Deformação a meio vão (mm)

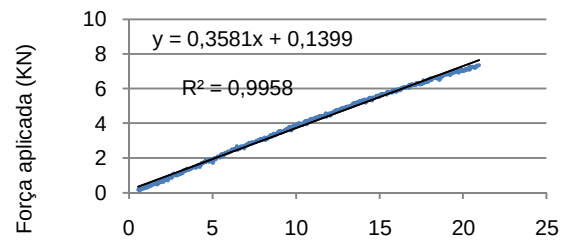
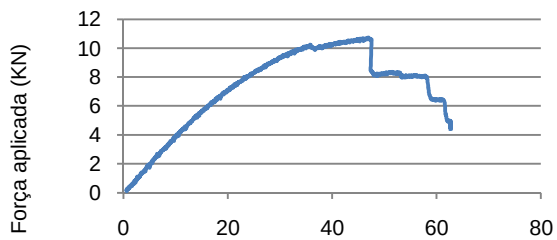
N7



Deformação a meio vão (mm)

Deformação a meio vão (mm)

N8



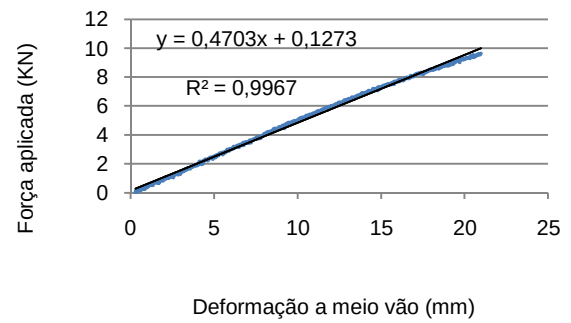
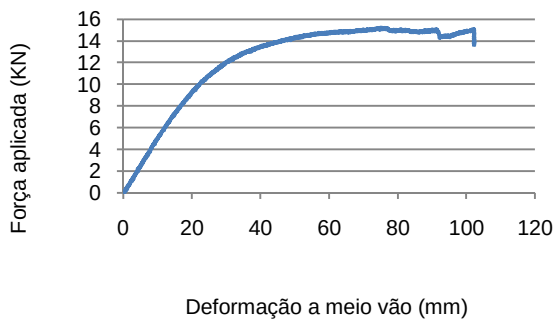
Deformação a meio vão (mm)

Deformação a meio vão (mm)

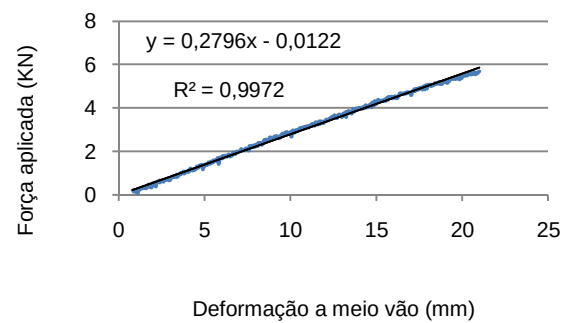
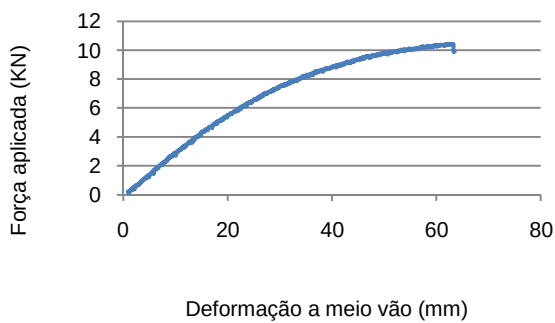
GRÁFICO FORÇA - DEFORMAÇÃO

ANÁLISE DE REGRESSÃO

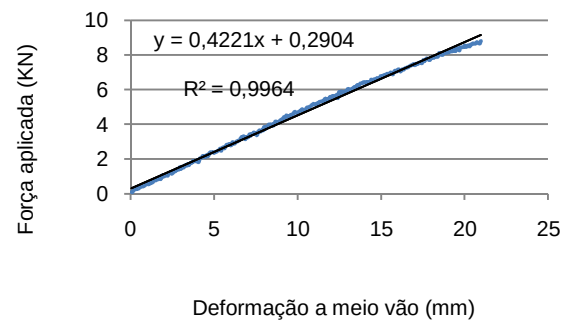
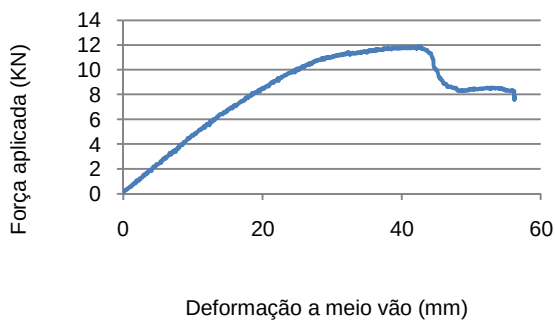
N9



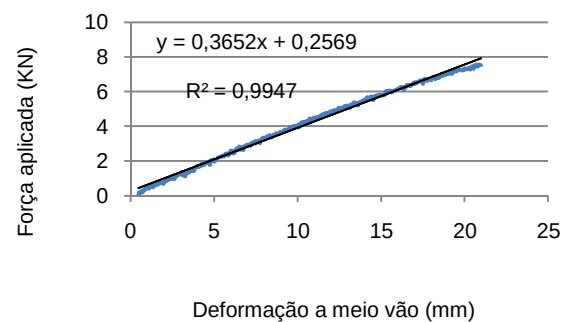
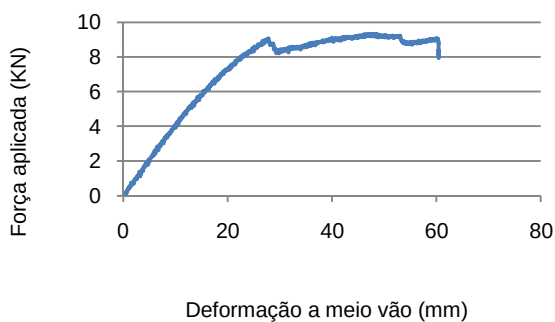
N10



N11



N12



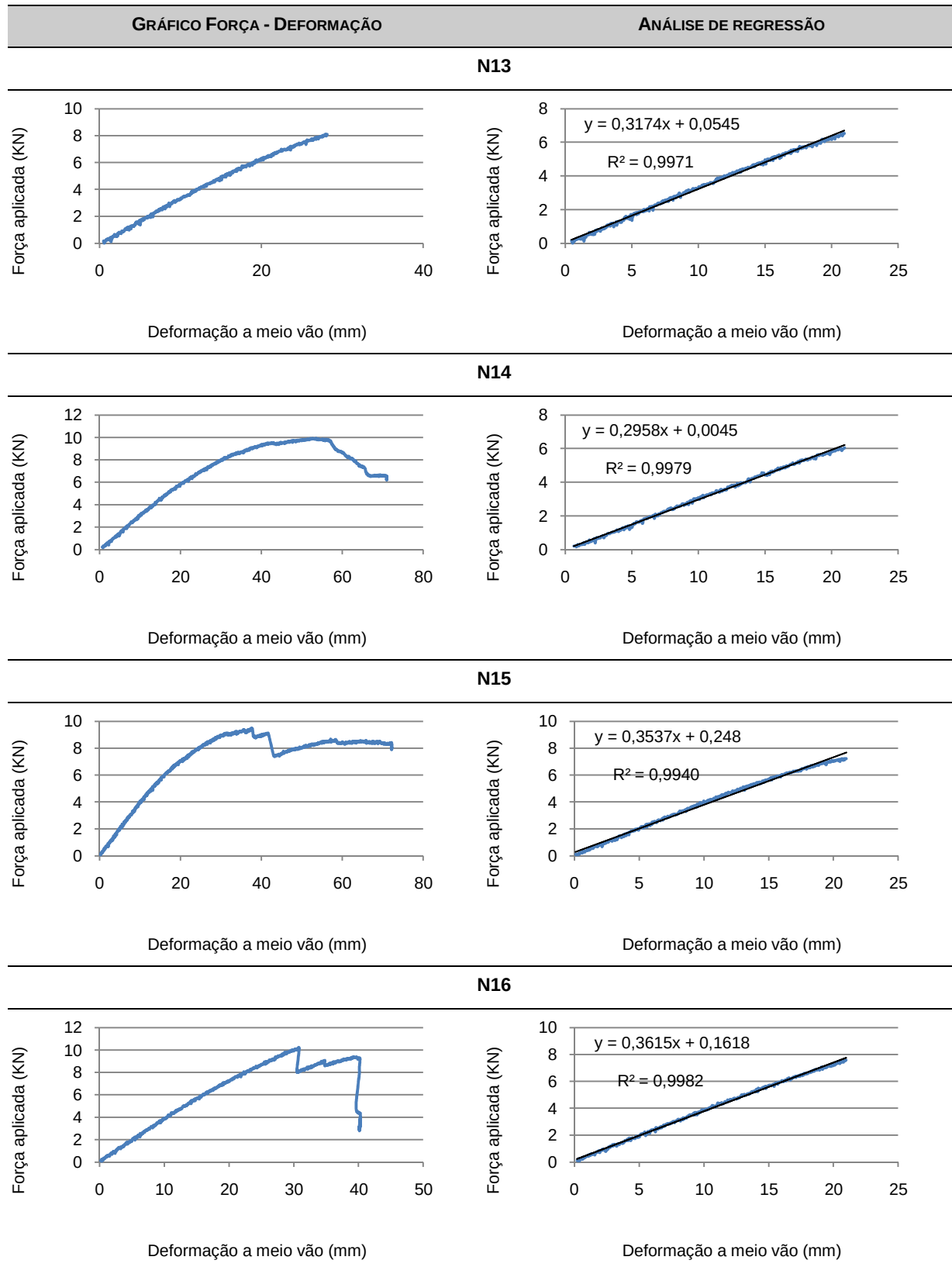
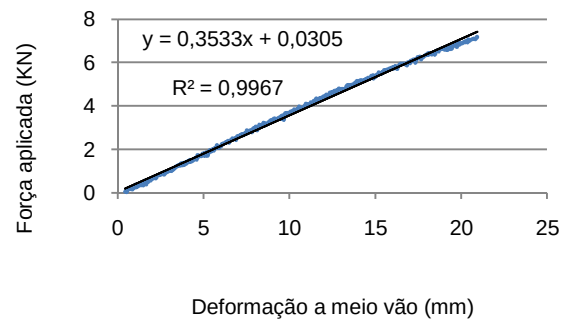
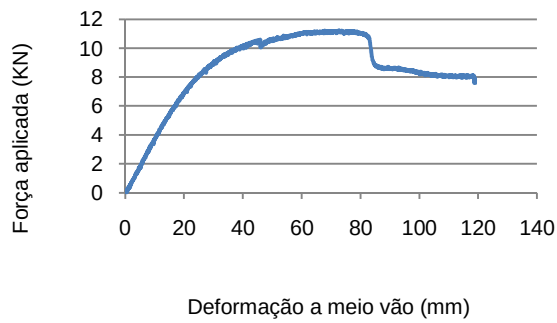


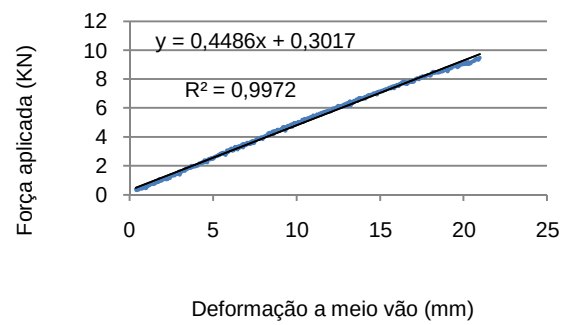
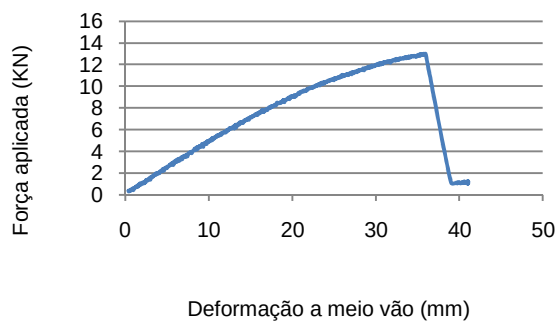
GRÁFICO FORÇA - DEFORMAÇÃO

ANÁLISE DE REGRESSÃO

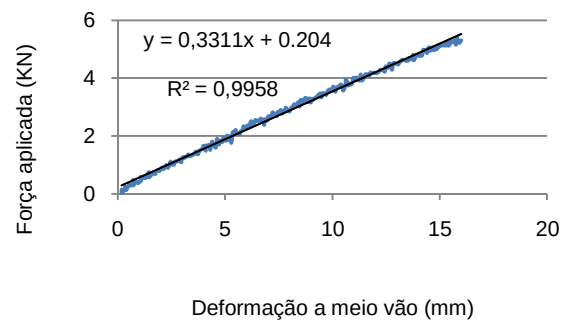
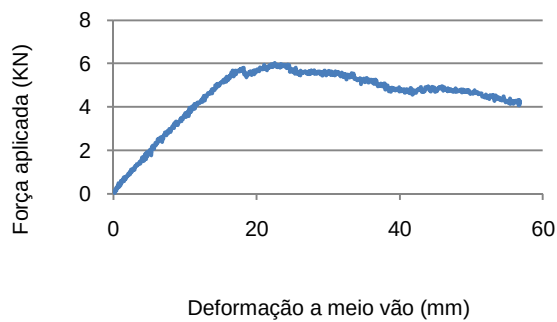
N17



N18



N19



N20

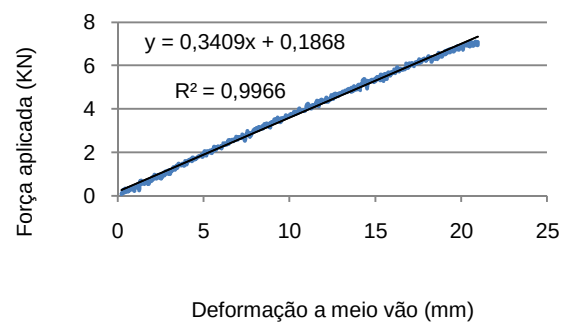
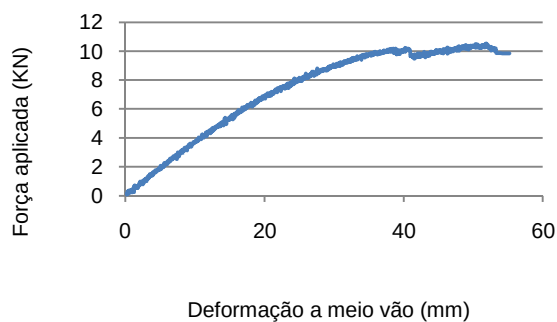
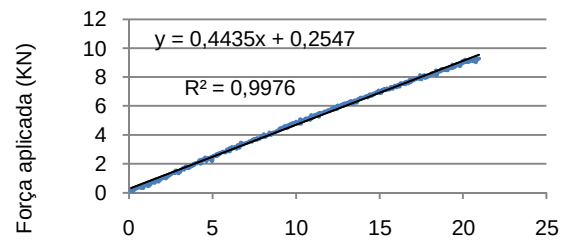
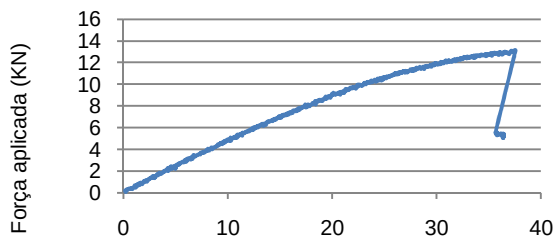


GRÁFICO FORÇA - DEFORMAÇÃO

ANÁLISE DE REGRESSÃO

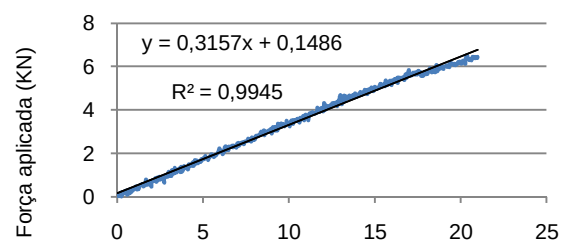
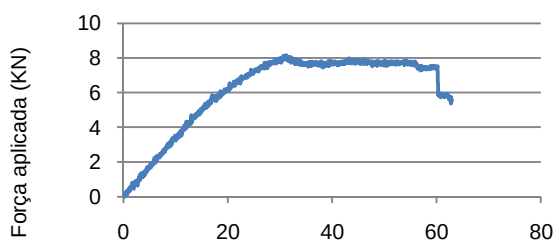
N21



Deformação a meio vão (mm)

Deformação a meio vão (mm)

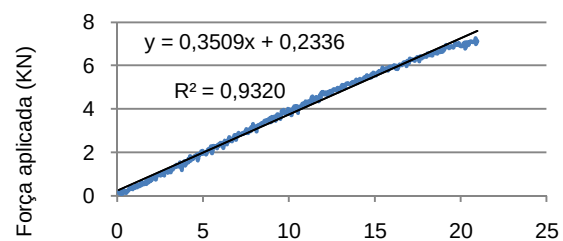
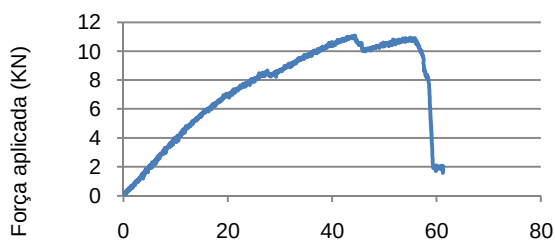
N22



Deformação a meio vão (mm)

Deformação a meio vão (mm)

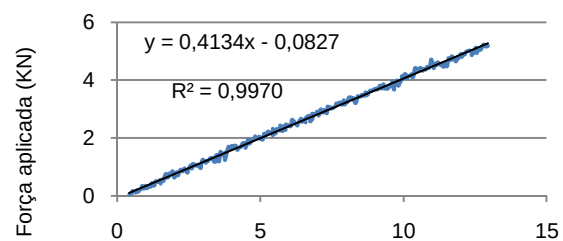
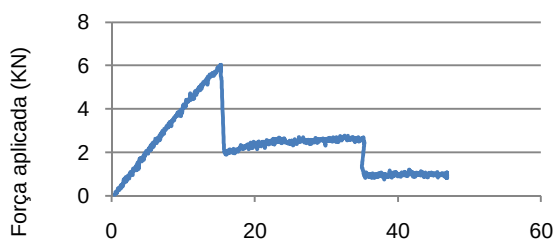
N23



Deformação a meio vão (mm)

Deformação a meio vão (mm)

N24



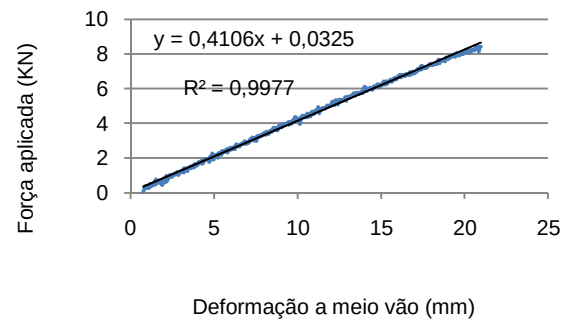
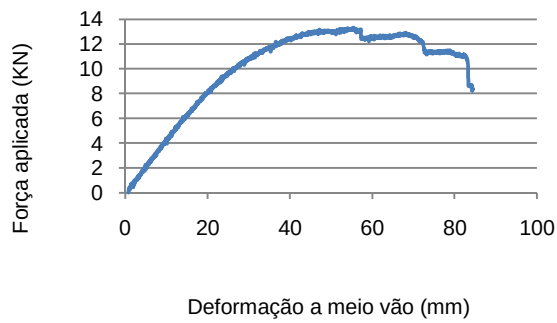
Deformação a meio vão (mm)

Deformação a meio vão (mm)

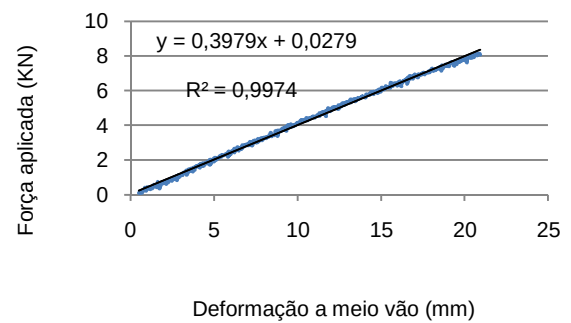
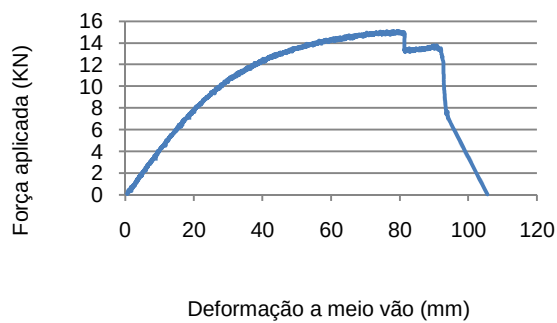
GRÁFICO FORÇA - DEFORMAÇÃO

ANÁLISE DE REGRESSÃO

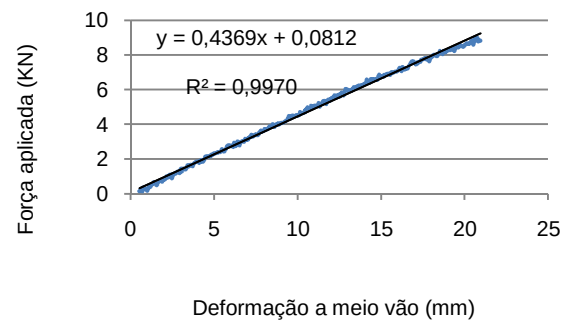
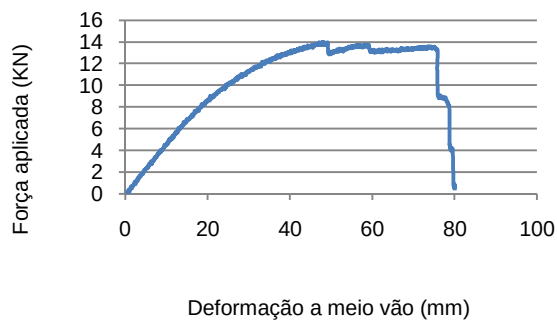
N25



N26



N27



N28

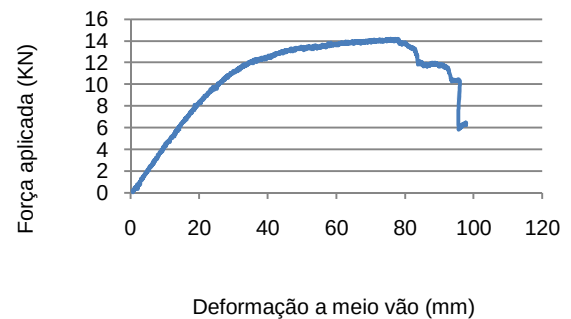
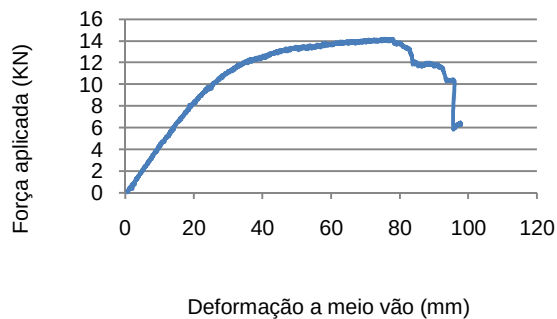
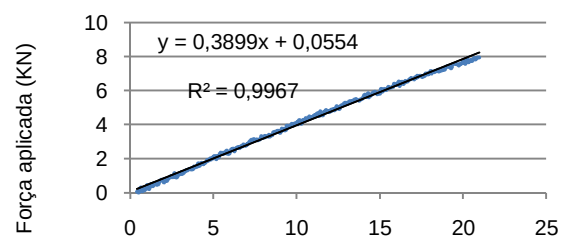
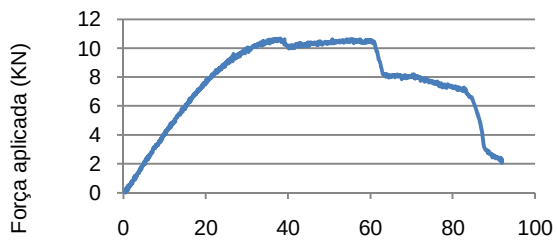


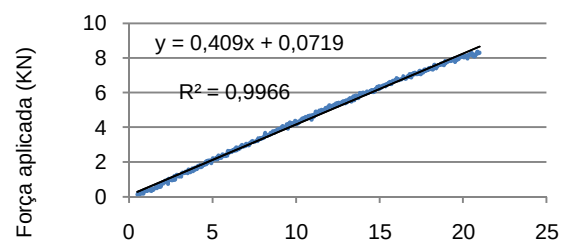
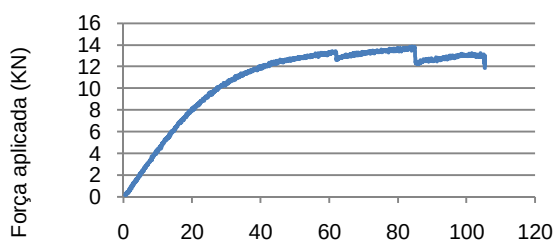
GRÁFICO FORÇA - DEFORMAÇÃO

ANÁLISE DE REGRESSÃO

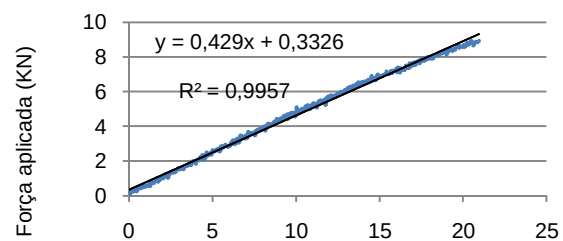
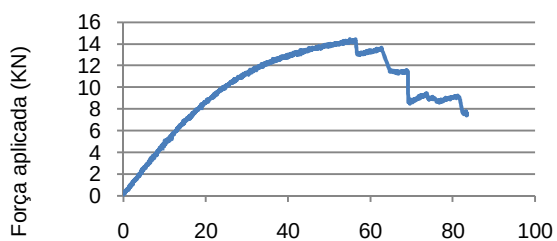
N29



N30



N31



N32

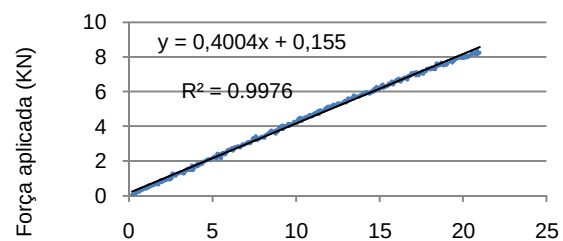
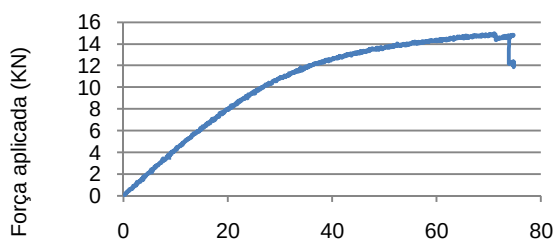
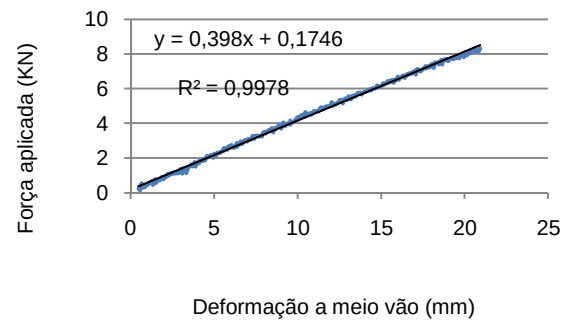
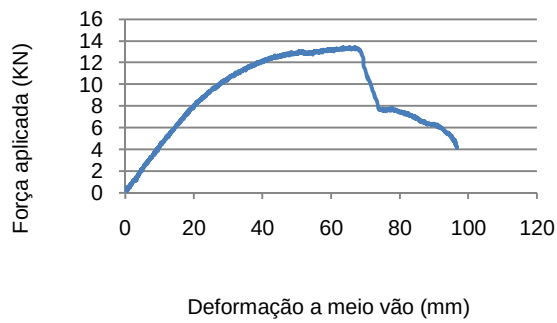


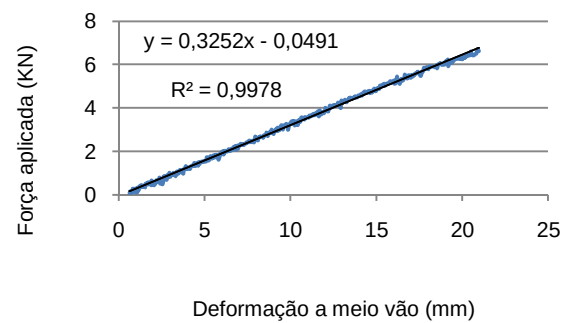
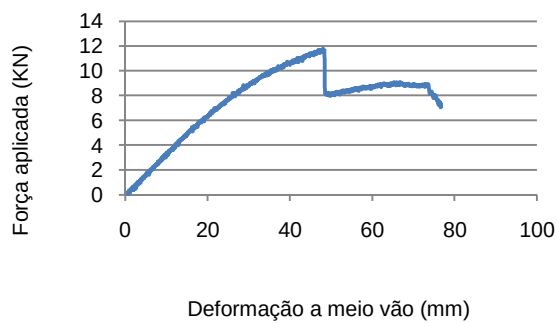
GRÁFICO FORÇA - DEFORMAÇÃO

ANÁLISE DE REGRESSÃO

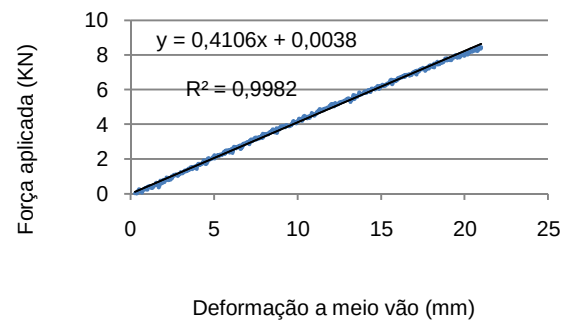
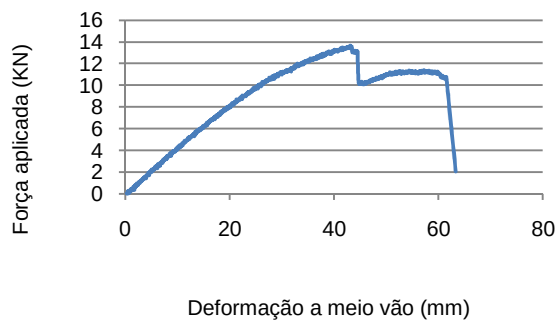
N33



N34



N35



N36

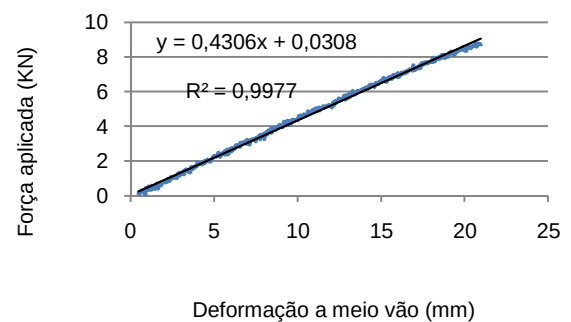
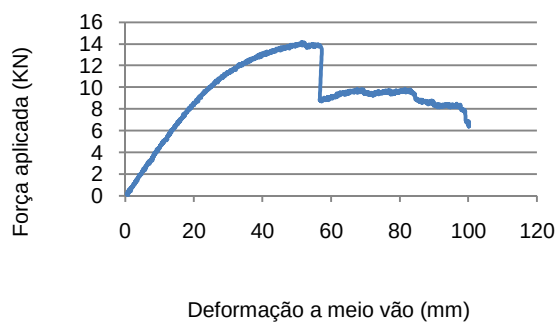
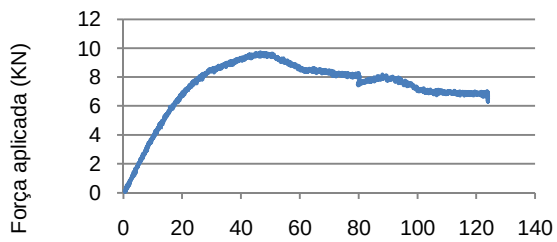


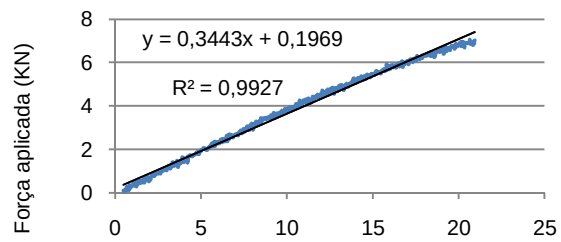
GRÁFICO FORÇA - DEFORMAÇÃO

ANÁLISE DE REGRESSÃO

N37

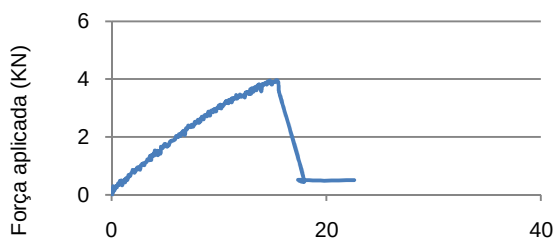


Deformação a meio vão (mm)

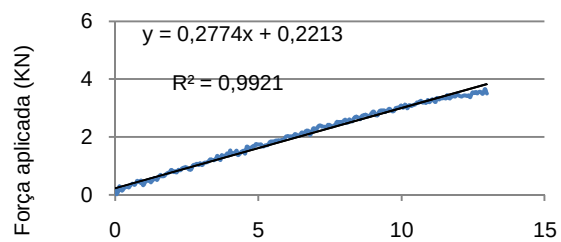


Deformação a meio vão (mm)

N38

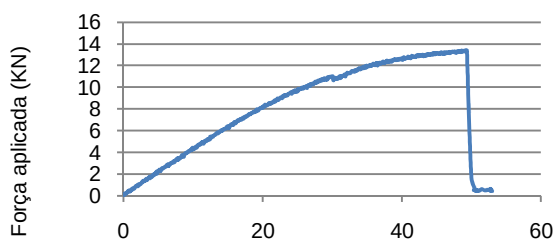


Deformação a meio vão (mm)

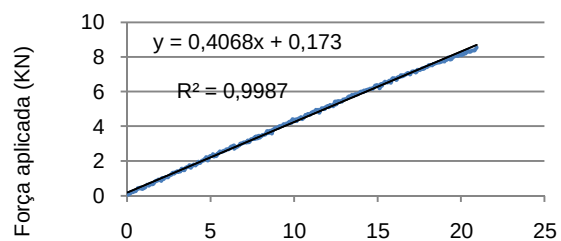


Deformação a meio vão (mm)

N39

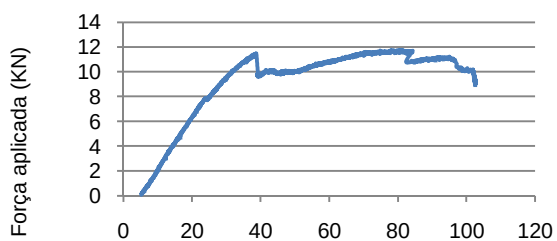


Deformação a meio vão (mm)

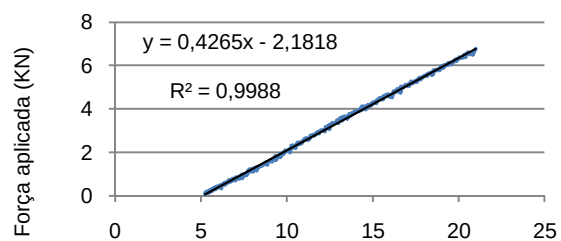


Deformação a meio vão (mm)

N40



Deformação a meio vão (mm)

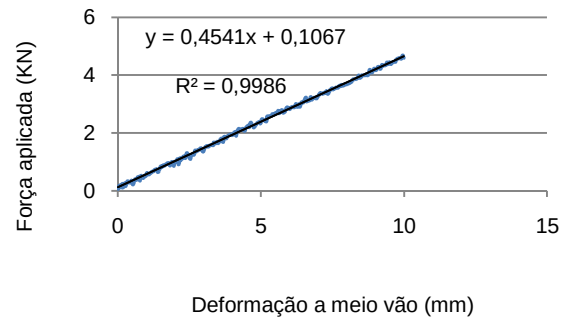
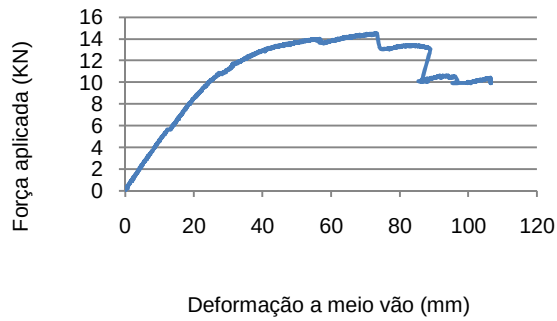


Deformação a meio vão (mm)

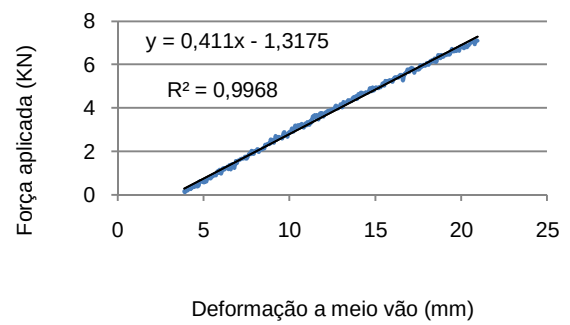
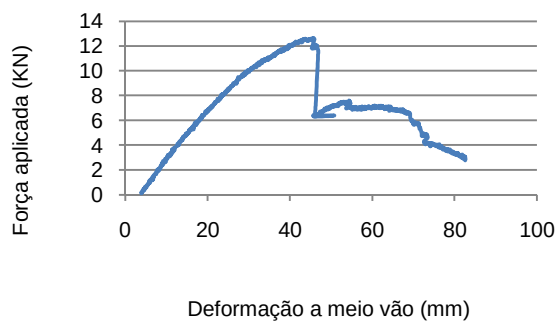
GRÁFICO FORÇA - DEFORMAÇÃO

ANÁLISE DE REGRESSÃO

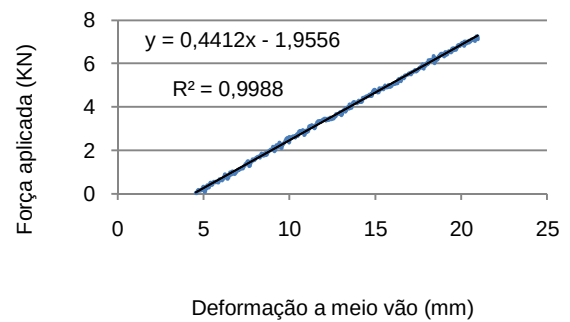
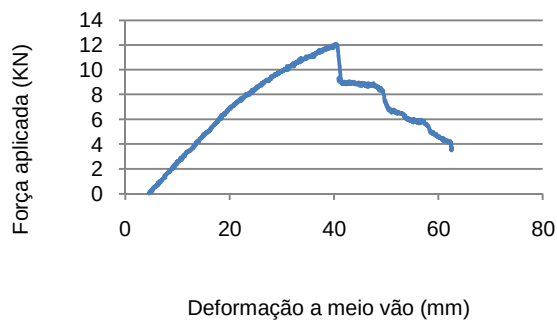
N41



N42



N43



N44

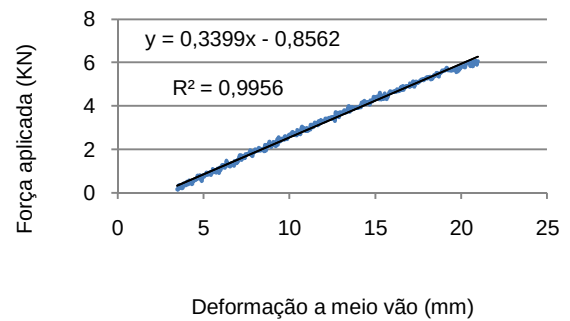
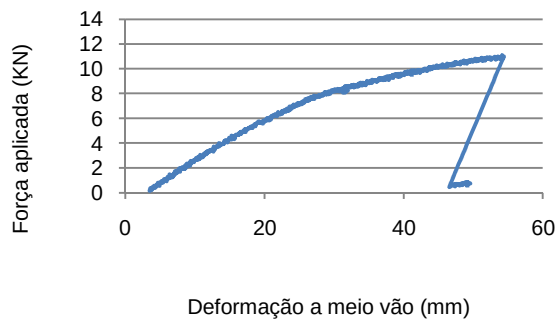
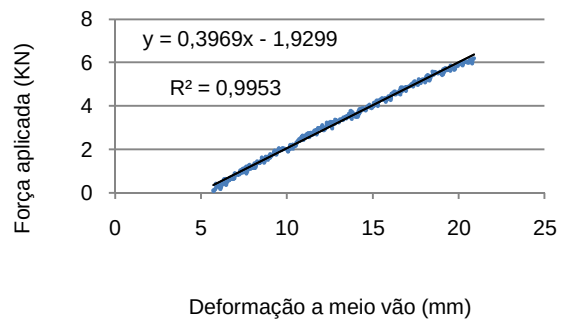
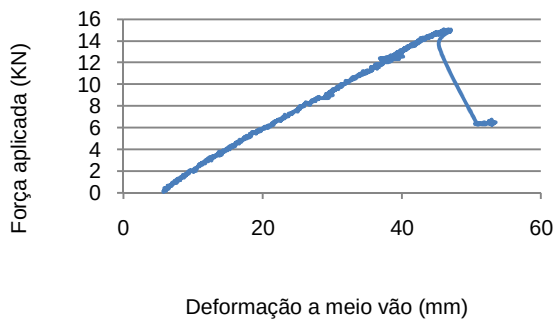


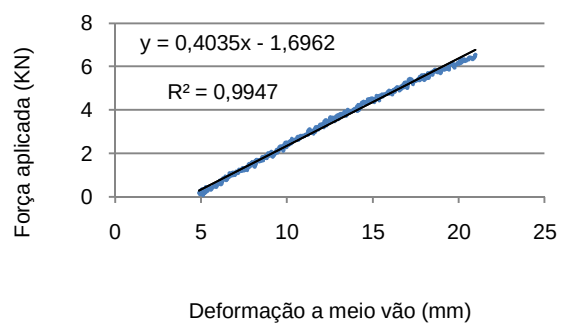
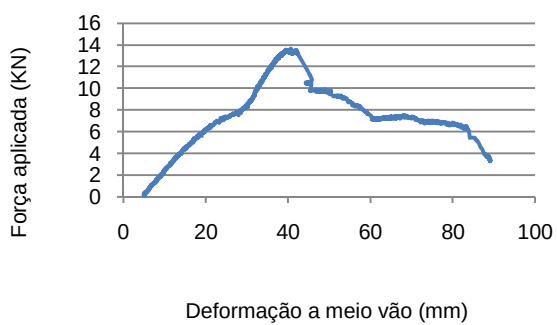
GRÁFICO FORÇA - DEFORMAÇÃO

ANÁLISE DE REGRESSÃO

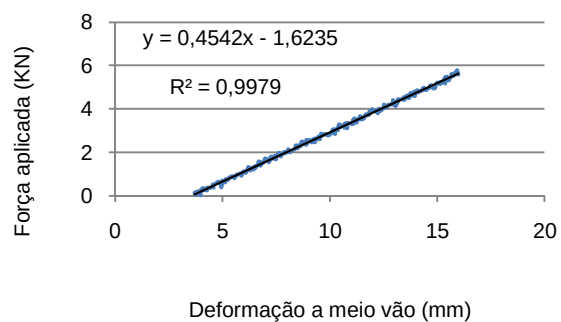
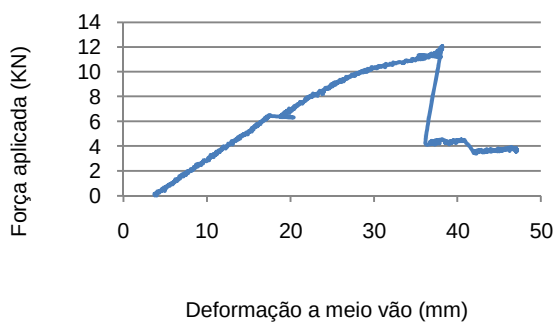
N45



N46



N47



N48

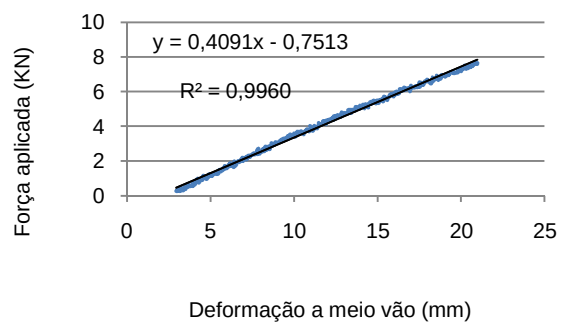
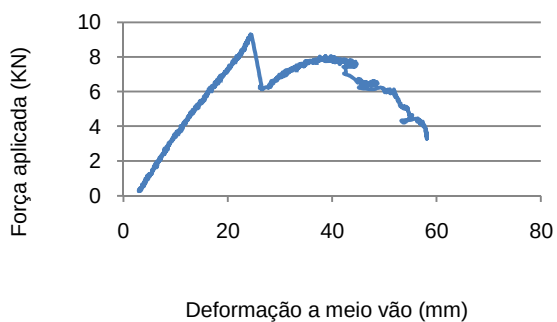
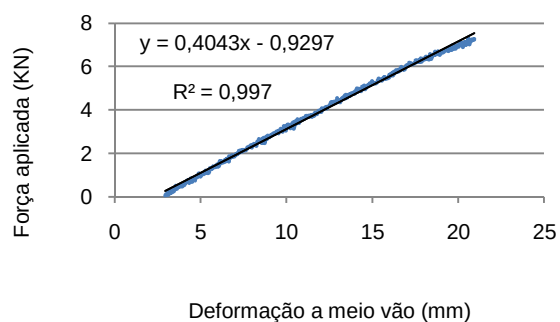
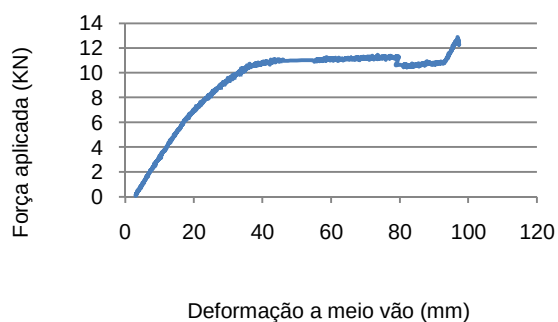


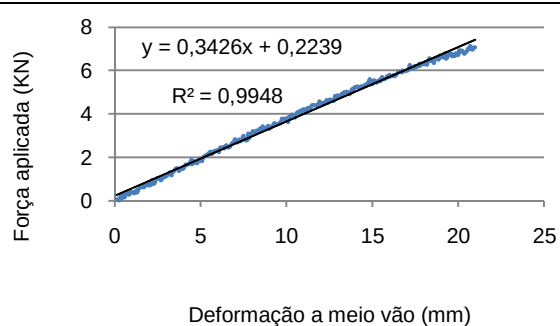
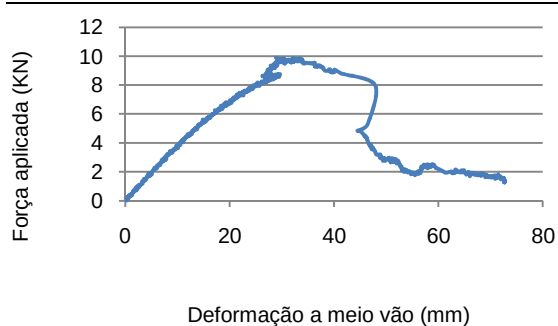
GRÁFICO FORÇA - DEFORMAÇÃO

ANÁLISE DE REGRESSÃO

N49



N50



N51

