



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Avaliação destrutiva e não destrutiva de elementos retangulares de madeira de pinho bravo

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Especialidade de Estruturas

Autor

João Pedro Rocha Balsa

Orientador

Alfredo Manuel Pereira Geraldês Dias

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

Coimbra, Julho, 2013

AGRADECIMENTOS

Ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra, pela formação de excelência com que me presenteou ao longo destes últimos anos.

Ao Professor Doutor Alfredo Dias, orientador da dissertação, agradeço todo o apoio, paciência, disponibilidade e orientação prestados no decorrer da elaboração deste trabalho.

Aos meus colegas Carlos Martins e Pedro Gil, pelo apoio, a partilha do saber, disponibilidade e amizade que sempre me dispensaram. O meu mais profundo agradecimento pelo contributo imprescindível que me deram na realização desta dissertação.

A todos os meus colegas e amigos com quem tive o enorme prazer de partilhar este ciclo de estudos. Todos eles, cada um à sua maneira, foram extremamente importantes no meu desenvolvimento pessoal e profissional.

À minha irmã, Joana, com quem tive o privilégio de crescer, por ter sido, para mim, um exemplo que sempre pretendi seguir. O meu muito obrigado por todo o carinho e incentivo que me deu ao longo de todos estes anos.

Aos meus pais por toda o apoio, paciência e generosidade com que me criaram. Um meu muito obrigado por acreditarem sempre em mim e naquilo que faço e por todos os ensinamentos de vida. Espero que esta etapa, que agora termino, possa, de alguma forma, retribuir e compensar todo o apoio, carinho e dedicação com que diariamente me presenciaram.

A todos, o meu mais sincero e profundo obrigado.

RESUMO

O presente trabalho resultou de uma análise, realizada a elementos de madeira maciça de Pinho Bravo (*Pinus pinaster* Ait.), com o objetivo de estudar os diferentes processos e parâmetros envolvidos na classificação visual e mecânica deste tipo de madeira. Esta análise foi composta por três fases distintas: classificação visual, ensaios mecânicos e ensaios estáticos.

A primeira fase, relativa à caracterização e classificação visual, consistiu na análise visual dos diferentes elementos de madeira em estudo. Esta, foi feita de acordo com os pressupostos indicados na norma europeia prEN 1310 (CEN, 1995) e na norma portuguesa NP 4305 (LNEC, 1995).

Na segunda fase, relativa aos ensaios mecânicos, procedeu-se à realização de ensaios não destrutivos com o objetivo de fazer uma classificação mecânica dos elementos de madeira em estudo. Para esta classificação determinou-se o módulo de elasticidade mecânico recorrendo a métodos envolvendo a vibração longitudinal, nomeadamente através de: *Timber Grader* MTG e Acelerómetro (mede a aceleração da onda induzida por um impacto de um martelo).

Na terceira fase, correspondente aos ensaios estáticos, foram realizados ensaios não-destrutivos e ensaios destrutivos. Os ensaios não-destrutivos tiveram como objetivo a determinação do módulo de elasticidade estático dos elementos estudados. No que respeita aos ensaios destrutivos, o seu objetivo foi o da determinação da resistência à flexão da peça. Estes ensaios foram realizados de acordo com o pressuposto na norma europeia EN 408 (CEN, 2012) .

Posteriormente, foram analisados os resultados obtidos, nomeadamente através do cálculo de correlações (simples e múltiplas) entre as diversas propriedades e parâmetros analisados. Com base nesta análise serão avaliados quais os processos e seus respetivos parâmetros que melhor permitem estimar propriedades de rigidez e resistência deste tipo de madeira.

ABSTRACT

The preset thesis resulted from an analysis, of the elements of sawn wood maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.), in order to study the different processes and parameters involved in visual and mechanical grading. This analysis was done in three different steps: visual grading, mechanical tests and static tests.

The first step, regarding the characterization and visual classification, consists in visually analysing the different elements of wood in study. This analysis was made according to the conditions indicated in European standard prEN 1310 (CEN, 1995) and the Portuguese standard NP 4305 (1995).

In the second step, for mechanical tests, we carried out non-destructive tests in order to sort wood elements in terms of mechanical rating. For this, were determined the mechanical elasticity modulus using longitudinal vibration methods as *Timber Grader* MTG and Accelerometer (measures waves acceleration induced by the hammer impact).

In the third step, which corresponds to the static tests, there were developed non-destructive and destructive tests according to the European standard EN 408 (CEN, 2012). The first ones determine the static elasticity modulus and the second ones the bending strength.

Finally, the results were subsequently analysed by calculating correlations (single and multiple) between several proprieties and parameters. Based on this analysis it will determine which processes and parameters that best estimate stiffness and strength proprieties of this wood.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
ÍNDICE.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE QUADROS	viii
SIMBOLOGIA	ix
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Enquadramento geral	1
1.2 Descrição geral das etapas realizadas	1
1.3 Organização da dissertação.....	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E ESTADO DE ARTE.....	4
2.1 Introdução	4
2.2 Madeira de Pinho Bravo (<i>Pinus pinaster</i> Ait.)	4
2.3 Enquadramento normativo.....	6
2.4 Estudos relativos à classificação visual de elementos de madeira.....	7
2.5 Estudos relativos a ensaios não-destrutivos de elementos de madeira	9
2.5.1 Vibração.....	10
2.5.2 Ultra-sons	11
2.5.3 Esforços mecânicos	13
2.6 Estudos relativos a ensaios estáticos (destrutivos e não destrutivos) de elementos de madeira.	16
3 MATERIAL	18
3.1 Introdução	18
3.2 Amostra Analisada.....	18
3.3 Caracterização visual da amostra.....	19
3.3.1 Aspetos gerais.....	19
3.3.2 Nós.....	19
3.3.3 Fio.....	22
3.3.4 Taxa de Crescimento	23
3.3.5 Fendas	24
3.3.6 Bolsas de Resina.....	25

3.3.7	Descaio	26
3.3.8	Empenos	27
3.3.9	Medula	29
3.4	Classificação visual da amostra	29
4	ENSAIOS EXPERIMENTAIS	31
4.1	Introdução	31
4.2	Ensaio dinâmico	31
4.2.1	Aspectos gerais	31
4.2.2	<i>Timber Grader</i> MTG	31
4.2.3	Acelerómetro	35
4.2.4	Comparação de resultados	37
4.3	Ensaio estático	38
4.3.1	Aspectos gerais	38
4.3.2	Módulo de elasticidade estático	38
4.3.3	Resistência à flexão	41
4.4	Teor de água	44
4.5	Massa volúmica	46
4.6	Correção das propriedades mecânicas	48
5	ANÁLISE E COMPARAÇÃO DE RESULTADOS	51
5.1	Introdução	51
5.2	Comparação dos diferentes lotes de madeira serrada de Pinheiro Bravo	52
5.3	Relações estatísticas entre características	53
5.3.1	Aspectos gerais	53
5.3.2	Propriedades visuais	53
5.3.3	Módulo de elasticidade dinâmico	59
5.3.4	Módulo de elasticidade estático	61
5.3.5	Massa volúmica	62
6	CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO	64
6.1	Trabalho futuro	66
	Referências bibliográficas	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Distribuição do pinheiro bravo em Portugal (Morgado, 2012).....	5
Figura 2.2 – Inclinação das fibras devido à presença de nós (Larsen, 2001)	8
Figura 2.3 – Vibração através de impacto longitudinal (Vries, Gard et al., 2006)	11
Figura 2.4 – <i>Timber Grader MTG</i> (Vries, Gard et al., 2006).....	11
Figura 2.5 – Ultra-Sons: Método Direto (Feio, Machado et al., 2004)	12
Figura 2.6 – Ultra-Sons: Método Indireto (Machado e Palma, 2011).....	12
Figura 2.7 – Esquema de funcionamento da máquina MSR (Carreira, Cheung et al., 2003) .	14
Figura 2.8 – <i>Pilodyn 6J Forest</i> (Íñiguez, Arriaga et al., 2008).....	15
Figura 3.1 – Nós isolados (LNEC, 1997)	19
Figura 3.2 – Nós agrupados (LNEC, 1997).....	19
Figura 3.3 – Medição do KAR Total	20
Figura 3.4 – Medição do KAR Marginal.....	20
Figura 3.5 – Medula presente no elemento	21
Figura 3.6 – Medula ausente do elemento	21
Figura 3.7 – Utilização do Riscador (LNEC, 1997).....	22
Figura 3.8 – Medição do Fio (CEN, 1995).....	22
Figura 3.9 – Medula ausente do topo	23
Figura 3.10 – Medula presente no topo	23
Figura 3.11 – Medição das fendas (LNEC, 1997).....	24
Figura 3.12 – Medição do descaio (LNEC, 1997).....	26
Figura 3.13 – Empeno em arco de face (LNEC, 1997)	28
Figura 3.14 – Empeno em arco de canto (LNEC, 1997)	28
Figura 3.15 – Empeno em hélice (LNEC, 1997).....	28
Figura 3.16 – Empeno em meia-cana (LNEC, 1997)	28
Figura 3.17 – Classes de qualidade relativas à madeira de pinho bravo segundo a NP 4305 (1995).....	30
Figura 4.1 – Medição da frequência própria de vibração através do <i>Timber Grader MTG</i> ...	32
Figura 4.2 – Determinação do teor de humidade através de um humidímetro de agulhas.....	32
Figura 4.3 – Distribuição de frequência do teor de água determinado através do humidímetro	33

Figura 4.4 – Distribuição de frequência do módulo de elasticidade dinâmico ($E_{m,dyn}$), determinado através do <i>Timber Grader</i> MTG.....	34
Figura 4.5 – Medição da frequência própria de vibração através do acelerómetro.....	35
Figura 4.6 – Distribuição de frequência do módulo de elasticidade dinâmico ($E_{m,dyn}$), determinado através do Acelerómetro.....	36
Figura 4.7 – Esquema de ensaio para o E_{local} , de acordo com a EN 408 (CEN, 2012)	38
Figura 4.8 – Esquema de ensaio para o E_{global} , de acordo com a EN 408 (CEN, 2012).....	39
Figura 4.9 – Ensaio não-destrutivo para a determinação E_{local} e do E_{global}	40
Figura 4.10 – Distribuição de frequência do módulo de elasticidade estático local (E_{local}) ..	40
Figura 4.11 – Distribuição de frequência do módulo de elasticidade estático local (E_{global})..	41
Figura 4.12 – Esquema de ensaio para f_m , de acordo com a EN 408 (CEN, 2012).....	42
Figura 4.13 – Ensaio destrutivo para a determinação de f_m	43
Figura 4.14 – Distribuição de frequência da resistência à flexão (f_m).....	43
Figura 4.15 – Rotura da peça devido à presença de nós.....	44
Figura 4.16 – Rotura da peça devido à presença de bolsas de resina.....	44
Figura 4.17 – Fornos para secagem dos provetes.....	45
Figura 4.18 – Distribuição de frequência do teor de água de referência (provetes secos)	45
Figura 4.19 – Pesagem dos provetes	46
Figura 4.20 – Distribuição de frequência da massa volúmica dos provetes saturados.....	47
Figura 4.21 – Distribuição de frequência da massa volúmica dos provetes secos	47
Figura 5.1 – Correlação entre o KAR Marginal e f_m [MPa].....	54
Figura 5.2 – Correlação entre o KAR Total e f_m [MPa].....	54
Figura 5.3 – Correlação entre a inclinação do fio e f_m [MPa].....	55
Figura 5.4 – Correlação entre a presença de medula e f_m [MPa].....	57
Figura 5.5 – Correlação entre $E_{m,dyn}^{MTG}$ [MPa] e f_m [MPa].....	59
Figura 5.6 – Correlação entre $E_{m,dyn}^{MTG}$ [MPa] e f_m [MPa].....	59
Figura 5.7 – Correlação entre E_{local} [MPa] e f_m [MPa].....	61
Figura 5.8 – Correlação entre E_{global} [MPa] e f_m [MPa].....	61
Figura 5.9 – Correlação entre a massa volúmica [kg/m^3] e f_m [MPa].....	63

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Valores característicos de algumas propriedades mecânicas da madeira de pinho bravo (Gonçalves, 2010).....	5
Quadro 3.1 – Dimensões por lote dos elementos de madeira [mm].....	18
Quadro 3.2 – KAR Total dos elementos de cada lote [mm ²]	21
Quadro 3.3 – KAR Marginal dos elementos de cada lote [mm ²].....	21
Quadro 3.4 – Inclinação do Fio [%]	23
Quadro 3.5 – Taxa de crescimento [mm]	24
Quadro 3.6 – Número e comprimento das fendas não-repassadas	25
Quadro 3.7 – Número e comprimento das bolsas de resina	26
Quadro 3.8 – Importância do descaio [%].....	27
Quadro 3.9 – Empenos [mm]	28
Quadro 3.10 – Percentagem de peças com presença de medula [%]	29
Quadro 3.11 – Número de peças correspondentes a cada classe de qualidade	30
Quadro 4.1 – Dimensões [mm], massa [kg] e teor de água [%] dos elementos	33
Quadro 4.2 – Frequência própria de vibração [Hz] obtida através do <i>Timber Grader MTG</i> ..	34
Quadro 4.3 – Frequência própria de vibração [Hz] obtida através do Acelerómetro.....	36
Quadro 4.4 – Comparação de resultados entre o <i>Timber Grader MTG</i> e o acelerómetro	37
Quadro 4.5 – Propriedades obtidas experimentalmente, por lote, para os elementos de madeira em estudo	49
Quadro 4.6 – Propriedades obtidas experimentalmente, correspondente a amostra total, para os elementos de madeira em estudo.....	50
Quadro 5.1 – Limites de correlações.	51
Quadro 5.2 – Comparação, por lote, entre as propriedades mecânicas e físicas médias.....	52
Quadro 5.3 – Comparação entre as propriedades mecânicas e físicas médias da amostra.....	52
Quadro 5.4 – Correlações múltiplas utilizando os empenos	58
Quadro 5.5 – Correlações múltiplas utilizando o descaio	58
Quadro 5.6 – Correlações múltiplas utilizando o $E_{m,dyn}$	60
Quadro 5.7 – Correlações múltiplas utilizando o E	62

SIMBOLOGIA

E_m – Módulo de elasticidade;

$E_{m,dyn}$ – Módulo de elasticidade dinâmico;

$E_{m,global}$ – Módulo de elasticidade global;

$E_{m,local}$ – Módulo de elasticidade local;

E_{mean} – Valor característico médio do módulo de elasticidade;

E_w – Módulo de elasticidade com o teor de água de ensaio;

$E_{0,05}$ – Valores correspondentes ao percentil de 5% do módulo de elasticidade;

F – Força aplicada pelas cabeças de carga;

F_a – Força máxima aplicada pelas cabeças de carga;

G – Módulo de distorção;

I – Inércia da secção transversal em relação ao eixo de flexão;

L_f – Comprimento de fendas e bolsas de resina;

V – Volume de um elemento;

V_L – Velocidade de onda ultra-sónica;

W – Deslocamento provocado pela aplicação de F , medidos através de defletómetros;

X – Desvio das fibras;

Y – Comprimento sobre o qual o desvio das fibras é medido;

a – Distância entre cabeças de carga;

a_f – Distância normalizada entre cabeças de carga;

a_{fe} – Distância entre cabeças de carga no ensaio;

b – Espessura do elemento;

f – Frequência própria de vibração;

$f_{c,0,k}$ – Compressão paralela às fibras;

$f_{c,90,k}$ – Compressão perpendicular às fibras;

f_m – Resistência à flexão;

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

$f_{m,05}$ – Valores correspondentes ao percentil de 5% da resistência à flexão:

$f_{t,0,k}$ – Tração paralela às fibras;

$f_{t,90,k}$ – Tração perpendicular às fibras;

h – Largura do elemento;

k_h – Fator de ajuste devido a desvios entre as alturas de ensaio e as normalizadas;

k_l – Fator de ajuste devido a desvios entre as distâncias de ensaio e as normalizadas;

k_s – Fator que permite a menor variabilidade dos valores característicos entre classificação mecânica e visual;

k_v – Fator de ajuste do número de peças na amostra e das amostras;

l – Comprimento do elemento;

l_a – Distância normalizada entre apoios;

l_e – Distância entre apoios no ensaio;

m – Massa de um elemento;

m_1 – Massa inicial de um provete;

m_2 – Massa final de um provete seco (variação entre massas consecutivas inferior a 0,5%);

n – Número de elementos de uma amostra;

r – Coeficiente de correlação;

s – Desvio padrão;

w – Teor de água de ensaio;

w_{12} – Teor de água de referência (12%);

ρ – Massa volúmica;

ρ_k – Valor característico da massa volúmica;

ρ_{mean} – Valor médio da massa volúmica;

ρ_w – Massa volúmica com teor de água de ensaio;

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento geral

Sendo a madeira um recuso natural e renovável, a sua utilização surge como instrumento essencial para o combate às diversas alterações climáticas que hoje urgem, podendo por esta via dar um enorme contributo à denominada construção sustentável.

O presente trabalho tem por base a utilização de madeira proveniente do pinheiro bravo português. Dadas as suas características tecnológicas e sendo o pinheiro bravo uma das espécies mais representativas de madeira, presentes no território português, não é de estranhar que esta espécie seja utilizada para diversos tipos de fins, nomeadamente no sector da construção. Relativamente a este sector, esta madeira apresenta características próprias com inúmeras vantagens para aplicações estruturais e não estruturais.

Devido às exigências pretendidas pela indústria de construção, nomeadamente as diversas exigências regulamentares existentes e marcação CE, na utilização da madeira de pinho bravo, surge a necessidade de estudar previamente as características deste tipo de madeira. Para isto, deve-se antes de mais analisar e classificar a madeira, visualmente ou com o auxílio a ensaios mecânicos e estáticos.

Assim, no decorrer deste trabalho, pretendeu-se fazer uma análise visual e mecânica de elementos retangulares de madeira de pinho bravo.

1.2 Descrição geral das etapas realizadas

Inicialmente analisaram-se os elementos de madeira de pinho bravo tendo em atenção as suas características visuais. Nesta análise pretendeu-se fazer uma classificação visual com o objetivo de definir uma classe de qualidade para a madeira, separando os elementos em duas classes distintas: E (Estruturas) e EE (Especial para Estruturas), de acordo com os limites definidos na NP 4305 (LNEC, 1995). No decorrer desta análise foi realizada uma apreciação das características (massa volúmica e medula), dos defeitos da madeira associados à sua estrutura (nós, inclinação do fio, bolsas de resina, casca inclusa), do corte praticado (descaio) e das alterações da madeira (empenos, fendas e degradação biológica). Todas estas medições seguiram o indicado na norma europeia prEN 1310 (CEN, 1995).

Após a classificação visual, passou-se à realização dos ensaios dinâmicos dos elementos de madeira em análise. Estes ensaios tiveram como objetivo determinar o módulo de elasticidade dinâmicos dos diferentes elementos em estudo. Para a determinação deste parâmetro, recorreu-se a métodos de vibração longitudinal. Foram realizados dois tipos de ensaios de vibração longitudinal: um recorrendo ao *Timber Grader* MTG e o outro utilizando o Acelerómetro.

Seguidamente realizaram-se ensaios estáticos com o objetivo de obter o módulo de elasticidade estático (local e global) e a resistência à flexão dos referidos elementos de madeira de pinho bravo. Para a obtenção do módulo de elasticidade estático foram realizados ensaios não-destrutivos, enquanto, para a obtenção da resistência à flexão, recorreu-se a ensaios destrutivos. Estes ensaios foram realizados de acordo com o preconizado na norma europeia EN 408 (CEN, 2012).

Por fim, foram tratados e analisados os resultados obtidos. Determinaram-se diversas correlações simples e múltiplas entre as diferentes propriedades e parâmetros que foram estudados. Esta análise teve como intenção determinar quais os parâmetros que, quando analisados, apresentam uma melhor aproximação dos valores da resistência à flexão das peças de madeira.

1.3 Organização da dissertação

Esta dissertação foi organizada em 7 capítulos, incluindo os respeitantes à Introdução e Referência Bibliográficas.

No Capítulo 2 pretendeu-se fazer uma pesquisa relativa aos estudos desenvolvidos com relevância para o trabalho desenvolvido. Começou por fazer-se um pequeno enquadramento relativo à existência do pinheiro bravo em Portugal e sua importância. De seguida abordaram-se várias investigações relativas à classificação visual, enumerando os defeitos que, para os diferentes investigadores, mais afectam o comportamento da madeira. Finalmente fez-se um levantamento de ensaios não-destrutivos e destrutivos, relativos a elementos de madeira, desenvolvidos nos últimos anos.

No Capítulo 3 realizou-se uma pequena descrição relativa à amostra de elementos de madeira de pinho bravo estudada, apresentando os aspectos visuais analisados no decorrer da

caracterização visual destes elementos. Apresentam-se também as considerações tomadas no que respeita à classe de qualidade dos elementos. A caracterização visual foi realizada de acordo com o previsto na prEN 1310 (CEN, 1995), sendo a determinação da classe de qualidade dos elementos efectuada de acordo com a NP 4305 (LNEC, 1995).

No Capítulo 4 pretende-se descrever os ensaios experimentais realizados ao longo deste trabalho. Estes ensaios tiveram como objetivo a determinação das propriedades de flexão dos elementos de madeira, nomeadamente o módulo de elasticidade dinâmico, o módulo de elasticidade local e global e a resistência à flexão. Para isto foram realizados ensaios dinâmicos e estáticos, através de métodos destrutivos e não-destrutivos.

No Capítulo 5 analisam-se e comparam-se os resultados obtidos para as diferentes propriedades e parâmetros analisados nos capítulos anteriores, apresentando as diversas correlações, simples e múltiplas, existentes entre eles. A análise efectuada teve como intenção principal determinar quais os parâmetros que, quando analisados, apresentam uma melhor aproximação dos valores da resistência à flexão das peças de madeira.

No Capítulo 6 apresentam-se as conclusões retiradas ao longo da elaboração deste trabalho, bem como os possíveis trabalhos futuros a desenvolver para complementar este estudo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E ESTADO DE ARTE

2.1 Introdução

No presente capítulo pretende-se realizar uma compilação dos vários estudos realizados relativos a elementos de madeira. Para uma organização de ideias mais clara e eficaz, este capítulo foi subdividido em diferentes subcapítulos. No subcapítulo 2.2, fez-se uma pequena abordagem relativa ao material madeira, nomeadamente em relação à madeira de pinho bravo (*Pinus pinaster* Ait.). No subcapítulo 2.3 fez-se o enquadramento normativo onde se apresentaram as normas que serviram de orientação para a realização deste trabalho. No subcapítulo 2.4, foi feita uma análise de estudos relacionada com a classificação visual dos elementos de madeira, incidindo principalmente nos elementos de madeira serrada. No subcapítulo 2.5 trataram-se os estudos relacionados com os ensaios não-destrutivos mais utilizados em elementos de madeira, pretendendo dar-se uma maior ênfase naqueles que foram utilizados no decorrer desta dissertação. Finalmente, no subcapítulo 2.6, abordaram-se estudos relativos a ensaios estáticos em elementos de madeira, conforme o previsto na norma EN 408 (CEN, 2012).

2.2 Madeira de Pinho Bravo (*Pinus pinaster* Ait.)

O pinheiro bravo é uma espécie florestal que está presente principalmente nas regiões mediterrâneas, nomeadamente em Portugal, França, Espanha e Itália (Gonçalves, 2010). Relativamente à realidade Portuguesa, o pinheiro bravo é considerada uma das espécies florestais mais importantes, ocupando 35% do total da sua região florestal, estando concentrado essencialmente na região norte-centro do país (Cruz, Nunes et al., 1998). Por causa das suas propriedades tecnológicas e devido ao facto de ser uma madeira muito abundante no território nacional, o pinho bravo é uma espécie muito utilizada pela indústria de madeira.

A Figura 2.1 ilustra a distribuição do pinheiro bravo em Portugal continental, observando-se uma concentração mais acentuada desta espécie na zona centro e norte do país.

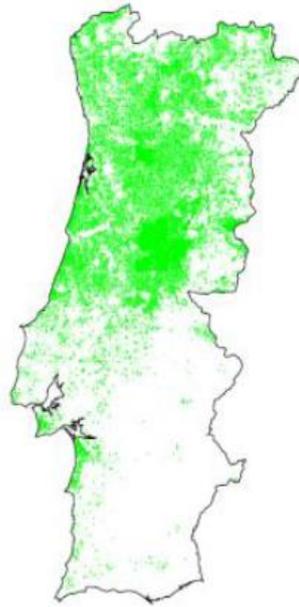


Figura 2.1 – Distribuição do pinheiro bravo em Portugal (Morgado, 2012)

Gonçalves (2010) realizou um estudo em que verificou os valores característicos limites de algumas propriedades mecânicas da madeira de pinho bravo. No Quadro 2.1 apresentam-se, por classe de qualidade, algumas dessas características.

Quadro 2.1 – Valores característicos de algumas propriedades mecânicas da madeira de pinho bravo (Gonçalves, 2010)

Propriedades Mecânicas (Valores Característicos) [MPa]	Classe de Qualidade	
	EE	E
Tração paralela às fibras $[f_{t,0,k}]$	21	10,8
Tração perpendicular às fibras $[f_{t,90,k}]$	0,49	0,46
Compressão paralela às fibras $[f_{c,0,k}]$	24,7	18
Compressão perpendicular às fibras $[f_{c,90,k}]$	7,3	6,9
Corte $[f_{v,k}]$	3,4	2

Sendo a madeira um material ortotrópico, obtido através do processo de crescimento de um ser vivo (árvore), existem diversos fatores que podem afectar o comportamento deste tipo de matéria-prima, nomeadamente fatores externos (solo e vento) e fatores internos (genética). Esta diversidade é também reflectida na variabilidade das propriedades mecânicas, afectada pela presença de defeitos, tais como a presença de nós, inclinação do fio, bolsas de resina e casca inclusa. A diversidade da madeira pode ser um fator penalizador para a utilização deste tipo material quando comparados com outros tipos de materiais de construção como o aço e o betão (Morgado, Machado et al., 2010). Devido ao facto de, contrariamente à madeira, o aço e o betão serem materiais produzidos pelo homem, a qualidade obtida por alteração da composição das matérias-primas nestes materiais faz com que algumas das suas propriedades mecânicas sejam alteradas, melhorando-as significativamente, tornando-os mais atrativos para a indústria de construção (Larsen, 2001). No entanto, a madeira, em relação a este tipo de materiais de construção, tem a vantagem de ser um material renovável, fácil de utilizar e reutilizar, e bastante ecológico (Morgado, 2012).

Para aumentar a competitividade da madeira em relação a outro tipo de materiais de construção, ao longo dos últimos anos, surgiu a necessidade de alargar a oferta relativa a este material, correspondendo a um aumento da qualidade e de utilização por parte da indústria de construção (Machado, 2004).

2.3 Enquadramento normativo

Em termos de enquadramento regulamentar, existem normas europeias, elaboradas pelo Comité Europeu de Normalização (CEN), que estabelecem diversos requisitos para os elementos de madeira. A norma EN 408 (CEN, 2012) indica os procedimentos para a determinação das propriedades físicas e mecânicas, recorrendo a ensaios experimentais, para madeira serrada. Relativamente a determinação dos valores característicos da amostra, deve seguir-se o pressuposto na norma EN 384 (CEN, 2004). A classificação visual da amostra de madeira é realizada de acordo com o descrito na norma prEN 1310 (CEN, 1995).

Para complementar as normas europeias existem normas portuguesas com grande importância. Em termos de pinheiro bravo para aplicação estrutural existe a norma portuguesa NP 4305 (LNEC, 1995), que define as regras de classificação de madeira serrada de secção rectangular. A norma portuguesa NP 614 (IPQ, 1973) indica o procedimento para a determinação do teor em água da madeira.

O aparecimento de todas estas normas veio fazer com que a madeira se tornasse um material ainda mais competitivo na indústria da construção, aumentando consideravelmente a sua exigência e qualidade.

2.4 Estudos relativos à classificação visual de elementos de madeira

Para definir os valores da resistência e atribuir uma rigidez aos elementos de madeira é necessário realizar uma avaliação da qualidade. Geralmente o procedimento adoptado para este fim baseia-se na classificação visual dos elementos de madeira, definida através das suas características: declive das fibras, nós, densidade, taxa de crescimento, etc. Esta classificação não pode ser efectuada da mesma maneira que a dos produtos feitos pelo homem (aço, betão, entre outros), devendo ser classificada com o máximo detalhe, uma vez que estes elementos de madeira não sofrem, ao contrário dos outros, qualquer tipo de alteração da composição da matéria-prima (Larsen, 2001).

A classificação visual baseia-se numa inspeção visual, com o objetivo de garantir que os elementos de madeira não apresentam defeitos que ultrapassam o especificado nas normas de classificação utilizadas, tentando garantir dessa forma padrões mais uniformes em termos de propriedades mecânicas (Larsen, 2001). A presença de defeitos da madeira associados à sua estrutura (nós, inclinação do fio, bolsas de resina, casca inclusa), ao corte praticado (descaio) e às alterações da madeira (empenos, fendas e degradação biológica) diminuem consideravelmente a resistência e a rigidez dos elementos de madeira.

Para Larsen (2001), a madeira é composta por zonas localizadas fracas, onde a sua resistência é claramente inferior. Estas zonas de fraqueza presentes nos elementos de madeira correspondem a nós ou grupo de nós, distribuídos aleatoriamente ao longo dos seus comprimentos. Um nó é um ramo que se encontra incorporado no tronco principal da árvore, sendo o defeito mais comum e influente encontrado em elementos de madeira. Se os ramos são vivos, no momento da inclusão, os nós são denominados por vivos; se o ramo morre, a continuidade dos tecidos quebra, originando um nó morto. A quantidade, tamanho e qualidade dos nós em elementos de madeira dependem das espécies genéticas, ambiente de crescimento e da gestão florestal. Os nós internos apresentam características (dimensões, qualidade e distribuição ao longo do elemento) que contribuem fortemente para a diminuição da resistência e da rigidez dos elementos de madeira. Devido ao facto dos nós serem consideravelmente mais densos do que a restante madeira, provocam, geralmente, um desvio

das fibras na zona do nó (Figura 2.2) e nas zonas adjacentes, fazendo com que algumas propriedades da madeira original se alterem.

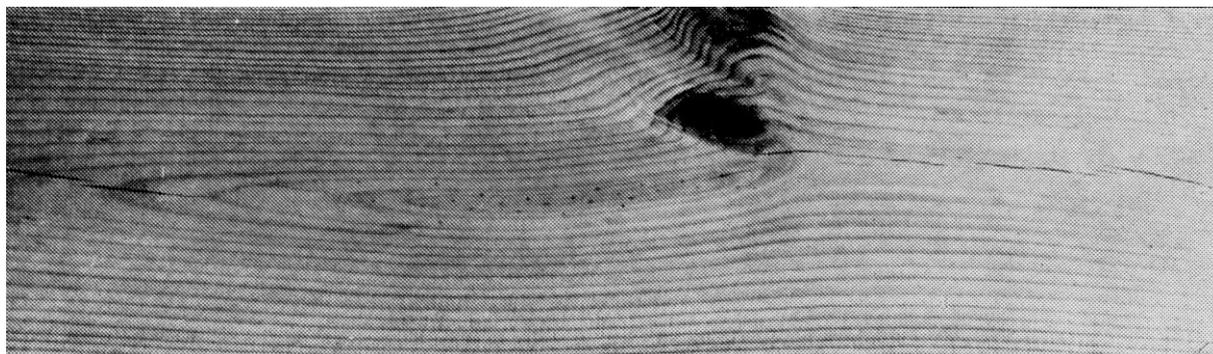


Figura 2.2 – Inclinação das fibras devido à presença de nós (Larsen, 2001)

Assim, é de extrema importância estimar o tamanho, o tipo e a posição de um nó em elementos de madeira serrada, visto que estes são o principal motivo da rejeição destes elementos, particularmente devido aos seus efeitos relacionados com a alteração das propriedades mecânicas e estéticas (Pinto, 2004).

Segundo Morgado, Machado et al. (2010) a classificação visual em madeiras apresenta inúmeras limitações. Neste estudo fez-se uma correlação entre as propriedades mecânicas da madeira e as suas características visuais, tendo-se obtido resultados muito fracos (coeficientes de correlação de cerca de 0,5 para nós e de 0,4 para a taxa de crescimento). A elevada variabilidade registada nas diferentes classes de qualidade (coeficientes de variação geralmente entre 20% e 40%) e a necessidade da classificação visual ter que ser realizada por profissionais qualificados são as principais desvantagens deste tipo de processo de classificação da madeira.

Apesar disso, segundo outros autores como Vries, Gard et al. (2006), todas as características visuais são relevantes desde que apresentem uma boa relação com a rigidez e resistência dos elementos de madeira, isto é, desde que haja uma boa correlação entre essas características e as propriedades da madeira.

Ao longo dos últimos 60 anos foram várias as regras de classificação desenvolvidas, apresentando critérios de avaliação muito diferentes, dependendo da espécie, da qualidade e do fim construtivo a que os elementos de madeira se destinam (Larsen, 2001). De acordo com

Glos (1995), todas estas regras de classificação apresentam a mesma limitação, comum a todos os métodos de avaliação visual: apenas as características visualmente reconhecíveis podem ser consideradas, fazendo com que existam características, tal como a densidade, dos elementos de madeira que não possam ser avaliadas de forma satisfatória. Segundo Vries, Gard et al. (2006) é impossível escrever um conjunto de regras de classificação que permitam abranger todas as complexidades e as diversas combinações de características presentes nos elementos de madeira.

Para combater as limitações relativas à classificação visual, surgiram métodos de análise de imagem. Estes métodos consistem, essencialmente, no uso de técnicas que permitem a obtenção de imagens internas ou da superfície dos elementos de madeira com o objetivo de detetar os defeitos dos elementos (Morgado, 2012). Para a obtenção destas imagens recorrem-se aos mais diversos tipo de técnicas: câmara de vídeo, termografia, ressonância nuclear magnética e radiografia.

Hoje em dia, para melhorar a precisão da avaliação das propriedades mecânicas da madeira recorrem-se a resultados obtidos em ensaios não-destrutivos e destrutivos cruzando-os com as características analisadas durante a classificação visual. Estes ensaios possibilitam a medição direta do módulo de elasticidade, o qual oferece uma correlação com a resistência dos elementos de madeira (coeficiente de correlação geralmente entre 0,6 e 0,8) mais aceitável que as obtidas através das características visuais (Morgado, Machado et al., 2010).

Embora as diversas técnicas de avaliação não-destrutiva sejam mais eficazes e rigorosas que as técnicas de classificação visual, a falta de diretrizes relativas a estas técnicas, faz com que a avaliação visual continue a ser a técnica mais utilizada (Machado e Palma, 2011). Segundo Mohamad, Ahmad et al. (2012) é impossível criar um modelo de diretrizes ideal relativo às avaliações não-destrutivas, visto que a madeira é um material caracterizado pela sua grande variabilidade, apresentando uma distribuição espacial de defeitos muito diversificada de elemento para elemento.

2.5 Estudos relativos a ensaios não-destrutivos de elementos de madeira

A avaliação não-destrutiva permite a determinação da condição e propriedades de um material sem prejudicar o seu uso futuro. Cada técnica não-destrutiva apresenta vantagens e desvantagens que afetam a sua aplicabilidade. Um uso adequado deste tipo de técnicas

permite realizar uma avaliação bastante satisfatória das propriedades do material, salvaguardando a sua integridade estrutural (Morgado, 2012).

Os ensaios não-destrutivos como método de classificação de elementos de madeira surgem pela primeira vez em 1950, simultaneamente nos Estados Unidos da América e na Austrália. O seu aparecimento teve como principal objetivo melhorar a precisão dos processos de classificação de elementos de madeira existentes, com a finalidade de alcançar um melhor aproveitamento das qualidades da madeira (Larsen, 2001). Segundo Machado (2011), o aparecimento deste tipo de ensaios possibilitou realizar avaliações relativas a elementos de madeira mais precisas, perspetivando valores de resistência e rigidez mais próximos dos reais.

Ao longo de todos estes anos, muitos foram os métodos e técnicas de análise não-destrutiva desenvolvidos. Segundo Morgado (2012), as técnicas de vibração, o método dos ultra-sons e a introdução de esforços mecânicos são exemplos deste grande desenvolvimento ocorrido nestes últimos anos.

2.5.1 Vibração

As técnicas de vibração baseiam-se na teoria de que todos os materiais têm uma frequência natural e que vibram (Morgado, 2012). Relativamente à madeira, estas técnicas têm sido utilizadas para determinar o módulo de elasticidade dinâmico através da indução de um movimento vibratório no elemento de madeira (Bell, Peck et al., 1954)

Para Vries, Gard et al.(2006), as técnicas de vibração são uma forma relativamente barata e eficaz de medição da rigidez de um elemento de madeira, consistindo na relação entre a sua frequência própria de vibração e a sua elasticidade. Este método é baseado na teoria da vida de Euler para vibrações livres de vigas prismáticas. Pode então obter-se o módulo de elasticidade dinâmico de um elemento de madeira através da derivada da equação diferencial fundamental da teoria de Euler:

$$E_{m,dyn} (MPa) = 4l^2 f^2 \rho \quad (2.1)$$

Para o cálculo do módulo de elasticidade dinâmico, Vries, Gard et al.(2006) utilizaram dois métodos diferentes. O primeiro método consiste em provocar uma vibração no elemento de madeira através de um impacto longitudinal, em que a aceleração é medida através de um transdutor piezoelétrico (Figura 2.3). No segundo método utilizado, determinou-se o módulo

de elasticidade dinâmico, recorrendo a um equipamento comercial denominado *Timber Grader MTG* (Figura 2.4); para a aplicação deste método é necessário determinar o peso e o teor de humidade dos elementos de madeira previamente. Nestes ensaios foram testados elementos redondos de madeira de larício, proveniente da zona leste dos Países Baixos.

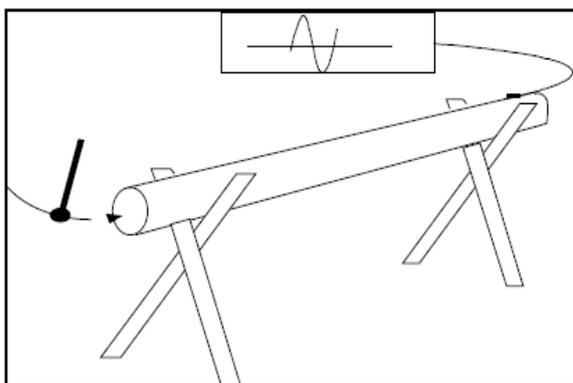


Figura 2.3 – Vibração através de impacto longitudinal (Vries, Gard et al., 2006)



Figura 2.4 – *Timber Grader MTG* (Vries, Gard et al., 2006)

Os módulos de elasticidade dinâmicos foram correlacionados com a resistência à flexão dos elementos estudados, tendo obtido coeficientes de correlação na ordem dos 0,76. Estes autores consideram que, para o módulo de elasticidade dinâmico, o ideal seria obter correlações na ordem dos 0,88, o que permite afirmar que, relativamente a esta correlação ($E_{m,dyn}$ e f_m) os resultados obtidos foram satisfatórios, próximos dos resultados ideais.

2.5.2 Ultra-sons

Machado e Palma (2011), para prever o módulo de elasticidade dinâmico, propõem um outro método baseado nos ultra-sons. Neste tipo de métodos, o $E_{m,dyn}$ depende da velocidade da onda ultra-sónica que se propaga ao longo da peça e da sua densidade, sendo calculado através da seguinte equação:

$$E_{m,dyn} (MPa) = \rho V_L^2 \quad (2.2)$$

Os métodos baseados nos ultra-sons são os mais utilizados para a classificação de madeira serrada, consistindo na medição das propriedades de onda sonora que atravessa o material

(Morgado, 2012). Durante este estudo foram utilizados dois diferentes métodos baseados nos ultra-sons: o método direto e o indireto. O método direto (Figura 2.5) consiste na propagação de uma onda ultra-sónica ao longo das fibras de madeira, isto é, na direção longitudinal da peça; neste método os transdutores (emissor e recetor) são colocados um em cada topo do elemento. O método indireto (Figura 2.6) surge como alternativa ao método direto, visto que este por vezes, em elementos de madeira em serviço, é impossível de aplicar, pois os topos do elemento nem sempre são acessíveis; este método é muito semelhante ao direto, diferindo apenas na posição dos transdutores (passam a ser colocados numa face do elemento). O aparelho utilizado para medir os ultra-sons foi o *Pundit Plus*. Nestes ensaios foram testadas várias vigas de madeira de pinho bravo português.

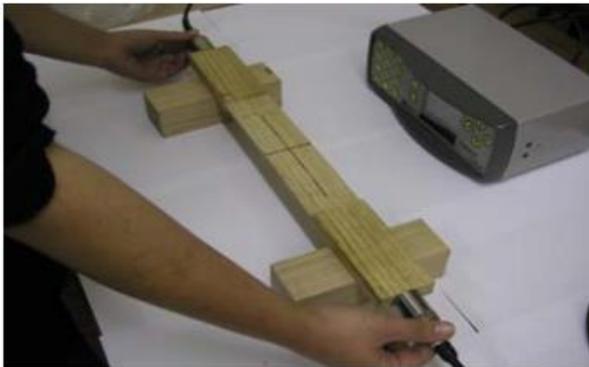


Figura 2.5 – Ultra-Sons: Método Direto
(Feio, Machado et al., 2004)



Figura 2.6 – Ultra-Sons: Método Indireto
(Machado e Palma, 2011)

Machado e Palma (2011) consideram a interpretação dos coeficientes de determinação (alto, médio ou baixo) muito subjetiva no que respeita a elementos de madeira, devido a variabilidade do material. Portanto, neste estudo, seguiram-se os princípios adotados pela *Joint Committee on Structural Safety* relativamente aos coeficientes de correlação: $0,8 \leq r$ correlação alta; $0,6 \leq r \leq 0,8$ correlação média; $0,4 \leq r \leq 0,6$ correlação baixa; $0,2 \leq r \leq 0,4$ correlação muito baixa; $0 \leq r \leq 0,2$ não existe correlação. Através deste estudo concluiu-se que a correlação obtida entre o módulo de elasticidade dinâmico e o módulo de elasticidade global (determinado através de ensaios estáticos posteriormente realizados) nos elementos de madeira era média (coeficiente de correlação aproximadamente 0,76). Também foi possível verificar que, quando não é possível utilizar o método direto, o método indireto é uma excelente alternativa para ajudar a avaliar a resistência e a rigidez das zonas de madeira clara de elementos de dimensão estrutural.

Também Íñiguez, Arriaga et al. (2008) estudaram métodos não-destrutivos que têm por base os ultra-sons em elementos de madeira serrada (pinho radiata, pinho silvestre e pinho larício). No entanto, estes autores utilizam este teste para, através da frequência própria de vibração, determinar apenas velocidade de propagação longitudinal da onda através da seguinte fórmula:

$$V_L = 2 \cdot l \cdot f \quad (2.3)$$

Através deste teste, Íñiguez, Arriaga et al. (2008) concluíram que existe uma razoável relação entre a velocidade de vibração e as propriedades mecânicas da madeira (o coeficiente de correlação, r , toma valores de aproximadamente 0,72). Analisando estes resultados verificou-se que é possível utilizar análises de vibração longitudinal como bom indicador para a qualidade geral das peças, no entanto são obtidos melhores coeficientes de determinação quando é utilizado o módulo de elasticidade dinâmico em vez da velocidade de onda. Concluiu-se também que, devido aos diversos defeitos locais existentes nos elementos de madeira em estudo, obteve-se uma fraca correlação entre a tensão de rotura estimada e o módulo de elasticidade dinâmico determinado experimentalmente, o que permitiu concluir que, neste caso, este módulo de elasticidade não é um bom índice para a determinação da resistência do material.

2.5.3 Esforços mecânicos

A introdução de esforços mecânicos é um teste não-destrutivo também muito utilizado e que consiste em estimar as propriedades mecânicas dos elementos de madeira com base na sua resposta à aplicação de um determinado esforço (Morgado, 2012). Tendo por base este tipo de técnica foi desenvolvida uma máquina denominada MSR (*Machine Stress Rated*), cujo seu funcionamento consiste na passagem dos elementos de madeira por uma série de rolos que, indiretamente, provocam uma força de flexão perpendicular ao eixo de menor inércia da secção transversal da peça, implicando uma ligeira deformação da mesma (Figura 2.7). Essa deformação é contabilizada e é posteriormente utilizada no cálculo do módulo de elasticidade. A resistência da peça é estimada por correlação com o módulo de elasticidade determinado. Esta máquina pode ainda ser composta por *scanners* de microondas que têm como objetivo a obtenção de parâmetros adicionais de classificação, permitindo aumentar a correlação com a resistência da peça (Nguyen, Leicester et al., 2002). A sua grande limitação surge devido ao facto de esta só ser dimensionada para a classificação de materiais finos, com espessura

máxima de 38mm (Carreira, Cheung et al., 2003). A sua aplicação nos elementos de madeira que se irão estudar no decorrer desta dissertação seria impossível, pois seria necessário uma máquina com uma capacidade mais elevada.

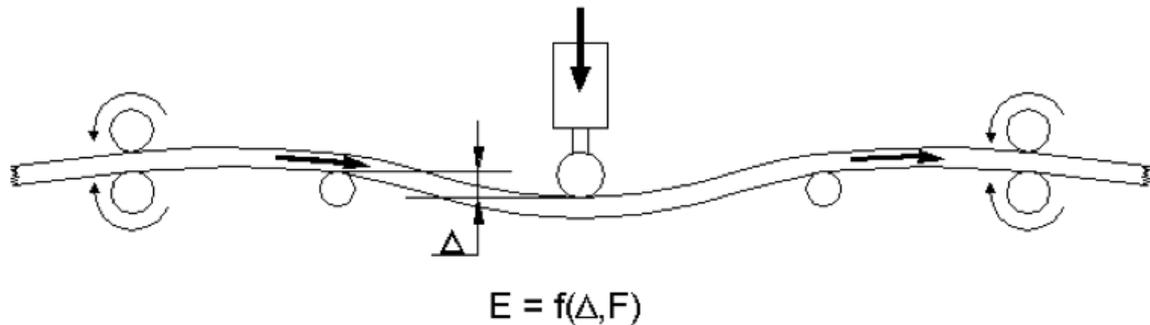


Figura 2.7 – Esquema de funcionamento da máquina MSR (Carreira, Cheung et al., 2003)

Existe uma outra técnica baseada na introdução de esforços denominada por emissões acústicas. Esta técnica consiste em emitir ondas de pequena amplitude ao longo de um elemento de madeira, derivadas da energia cinética libertada quando este está sujeito a um carregamento. As ondas são medidas através de sensores posicionados na superfície do material. Como as emissões acústicas são extremamente sensíveis a concentrações de esforços em torno de defeitos, pode ser considerado um método eficaz para avaliar a madeira com nós ou outras irregularidades (Malik, Al-Mattarneh et al., 2002). Este método pode ainda ser usado para minimizar os efeitos de secagem, detetar apodrecimento e estimar propriedades mecânicas (Morgado, 2012). Para Kawamoto e Williams (2002) esta técnica não-destrutiva apresenta, também, algumas limitações: na medição das ondas sonoras é difícil distinguir os sinais reais das emissões do ruído de fundo; pode haver situações em que a emissão de ondas acústicas não surge até o material ser carregado até ao limite proporcional de deformação; na madeira, as emissões acústicas mais pequenas são extremamente difíceis de detetar devido à atenuação das ondas durante a propagação; as técnicas convencionais que assumem a velocidade isotrópica não podem ser usadas na madeira, uma vez que a velocidade de propagação das ondas na madeira difere consoante a direção (longitudinal, radial e tangencial).

Íñiguez, Arriaga et al.(2008), propõem ainda outro tipo de ensaio não-destrutivo com introdução de esforços mecânicos, utilizando a perfuração nos elementos de madeira, embora esta técnica seja mais utilizada em elementos estruturais de madeira e para a avaliação da qualidade de árvores vivas. Este ensaio tem como objetivo a determinação da densidade da

madeira e consiste na medição da profundidade de penetração através de uma ferramenta especialmente desenvolvida para o efeito: o *Pilodyn 6J Forest* (Figura 2.8). Este equipamento permite que através do lançamento de uma mola, utilizada para transformar a energia potencial elástica em energia de impacto, seja possível medir a penetração de uma agulha de aço com 2,5mm de diâmetro. Como a profundidade de penetração é inversamente proporcional à densidade da madeira, quanto maior a profundidade menor a densidade.



Figura 2.8 – *Pilodyn 6J Forest* (Íñiguez, Arriaga et al., 2008)

Embora este ensaio provoque uma pequena perfuração nos elementos de madeira, esta perfuração é insignificante para causar danos significativos à madeira, sendo por isso considerado um ensaio não-destrutivo.

Este ensaio teve, ainda, como finalidade determinar a correlação existente entre a densidade de cada amostra com a distância de perfuração da agulha. Para cada elemento, foram registadas duas leituras de penetração: uma na direção radial e outra numa direção tangencial. Os resultados obtidos foram muito satisfatórios, tendo-se um aceitável coeficientes de correlação, $r = 0,73$. Concluiu-se que o ideal, para obter uma correlação mais elevada, seria utilizar a média das duas leituras de penetração (radial e tangencial). Verificou-se também, como seria de esperar, que a profundidade de penetração varia significativamente consoante as diferentes espécies de madeira.

2.6 Estudos relativos a ensaios estáticos (destrutivos e não destrutivos) de elementos de madeira.

A determinação da resistência à flexão de um elemento de madeira, bem como o seu módulo de elasticidade são dois fatores cruciais para determinar a rigidez e resistência destes elementos. Segundo Vries, Gard et al. (2006) estes fatores são fortemente influenciados por características como a densidade, a presença de nós, fissuras presentes na madeira, principalmente quando estas se encontram a meio da peça. Para determinar estes fatores pode-se recorrer a ensaios estáticos, destrutivos e não-destrutivos, de elementos de madeira, seguindo as indicações descritas na norma europeia EN408 (CEN, 2012).

Segundo Ravenshorst e Kuilen (2009), a norma EN 408 (CEN, 2012) fornece-nos dois métodos não-destrutivos para a determinação do módulo de elasticidade estático: um para o cálculo do módulo de elasticidade local e outro para o cálculo do módulo de elasticidade global. Complementando, Morgado (2012) diferencia estes dois parâmetros, afirmando que as diferenças entre $E_{m,local}$ e $E_{m,global}$, resultam principalmente da diferença de propriedades dos defeitos presentes na zona central em relação aos presentes no restante elemento de madeira, bem como, no caso do E_{global} , da existência de esforço transversal a atuar no elemento.

Relativamente ao $E_{m,local}$, segundo Ravenshorst e Kuilen (2009), é necessário ter em atenção algumas considerações importantes: as deformações são muito pequenas (entre 1 e 2 mm) o que faz com que as medições estejam sujeitas a possíveis erros de precisão; no caso de a madeira ser do tipo resinosa a secção do elemento visivelmente mais fraca (devido à presença de defeitos) deverá ser colocada entre os dois pontos de carga. No que respeita ao $E_{m,global}$, Ravenshorst e Kuilen (2009) consideram que as medições das deformações devem ser realizadas no lado inferior da viga, sendo estas deformações são bastantes superiores às verificadas no $E_{m,local}$ (entre 15 e 25 mm).

Ravenshorst e Kuilen (2009), através destes ensaios, concluíram que o rácio entre o módulo de elasticidade global e o módulo de elasticidade local em diversos tipos de madeira estudados apresentam valores muito próximos, sempre superiores a um, o que permite afirmar que, tipicamente, o módulo de elasticidade global é superior ao local. Para além disto, obtiveram-se correlações consideravelmente boas entre o $E_{m,local} / E_{m,dyn}$ e $E_{m,global} / E_{m,dyn}$.

Vries, Gard et al. (2006) realizaram ensaios com o objetivo de determinar e relacionar o módulo de elasticidade (E_m) e a resistência à flexão em elementos redondos de madeira de larício, proveniente da zona leste dos Países Baixos. Também estes autores seguiram o pressuposto na norma EN408 (CEN, 2012) para madeira serrada. Para o cálculo de E_m a peça foi sujeita a uma força máxima que corresponde a 40% da carga de rotura prevista na peça, sendo medidos o deslocamento em três diferentes pontos da peça ao longo do seu carregamento.

Depois de realizados os ensaios para o cálculo dos módulos de elasticidade dinâmicos e estáticos, foram comparados estes dois fatores fazendo uma regressão linear dos resultados obtidos, determinando o respetivo coeficiente de correlação. O coeficiente de correlação obtido foi de 0,75. Para Vries, Gard et al. (2006) este resultado não foi satisfatório, visto que os autores esperavam correlações na ordem dos 0,88.

Mohamad, Ahmad et al. (2012), ensaiaram 200 peças de madeira de pinho bravo com o objetivo de determinar o módulo de elasticidade (global e local) e a resistência à flexão. A correlação obtida entre o módulo de elasticidade global e a resistência à flexão das peças foi de 0,78. Ao realizar correlações múltiplas os autores verificaram que os coeficientes de correlação aumentavam ligeiramente (cerca de 7% superiores). Neste estudo conclui-se ainda que, para a maior parte das peças que apresentam nós na zona central do elemento de madeira, a rotura ocorre junto a esses nós.

3 MATERIAL

3.1 Introdução

No presente capítulo pretende-se realizar uma pequena descrição relativa à amostra de elementos de madeira de pinho bravo estudada, apresentando os aspetos visuais analisados no decorrer da caracterização visual destes elementos. São igualmente apresentadas as considerações tomadas no que respeita à classe de qualidade dos elementos. A caracterização visual foi realizada de acordo com o previsto na prEN 1310 (CEN, 1995), sendo a determinação da classe de qualidade dos elementos efetuada de acordo com a NP 4305 (LNEC, 1995). Por uma questão de organização e de compreensão, dividiu-se este capítulo em diferentes subcapítulos, optando-se por apresentar os resultados obtidos ao longo do texto.

3.2 Amostra Analisada

A amostra analisada no decorrer deste estudo é composta por 93 peças de madeira, separadas em quatro lotes diferentes, consoante os seus comprimentos e respetivas secções transversais: Lote 1, Lote 2, Lote 3 e Lote 4. No Quadro 3.1 estão apresentados os diferentes lotes com as suas respetivas dimensões padrão.

Quadro 3.1 – Dimensões por lote dos elementos de madeira [mm]

Lote	N	Comprimento [mm]	Secção Transversal	
			b [mm]	h [mm]
1	30	2000	70	100
2	20	2000	70	70
3	20	2000	70	100
4	23	2000	60	80

As dimensões apresentadas no Quadro 3.1 são as dimensões nominais dos elementos, não correspondendo exatamente às dimensões reais, devido às tolerâncias de fabrico. Para avaliar as pequenas variações existentes nas dimensões dos elementos, mediram-se, para cada peça, as secções transversais nos topos e a meio vão, utilizando, para efeitos de cálculos, o valor médio das três medições.

3.3 Caracterização visual da amostra

3.3.1 Aspectos gerais

Os elementos de madeira de pinho bravo foram caracterizados visualmente segundo o preconizado na norma prEN 1310 (CEN, 1995). Esta análise consistiu na apreciação das características (massa volúmica e presença de medula), dos defeitos da madeira associados à sua estrutura (nós, inclinação do fio, bolsas de resina, casca inclusa), do corte praticado (descaio) e das alterações da madeira (empenos, fendas e degradação biológica). Todos estes aspectos foram analisados, pois podem influenciar as propriedades mecânicas dos elementos. Não ser seguidamente descritos os procedimentos adotados no decorrer da análise de cada uma destas propriedades.

3.3.2 Nós

Um nó corresponde à porção da base de um ramo que se encontra incorporado no tronco principal da árvore. Ao longo deste trabalho considerou-se a existência de nós isolados e nós agrupados. Diz-se que um nó está agrupado sempre que dois ou mais nós se encontram tão próximos que as fibras envolventes estão infletidas em torno do grupo por eles formado (Figura 3.2). Caso contrário o nó é avaliado isoladamente, sendo denominado de nó isolado (Figura 3.1).

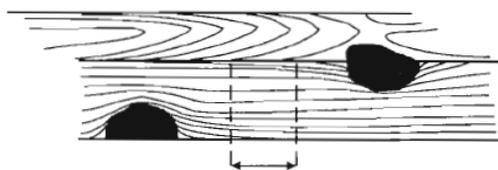


Figura 3.1 – Nós isolados (LNEC, 1997)

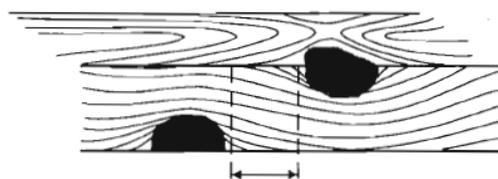


Figura 3.2 – Nós agrupados (LNEC, 1997)

Os nós, ou grupos de nós, distribuem-se aleatoriamente ao longo do comprimento da madeira, podendo ser responsáveis por uma considerável diminuição da resistência desta. Devido a este facto, as zonas onde existem nós podem denominar-se por zonas fracas. Este efeito negativo dos nós, relativamente à resistência mecânica, surge do facto destes elementos corresponderem a um material inserido num elemento de madeira, cujas fibras são aproximadamente perpendiculares à direcção geral das fibras das peças. A elevada anisotropia

da madeira, traduzida aproximadamente por uma resistência à tração na direção normal às fibras (facilmente da ordem de trinta vezes inferior à da direção paralela) permite concluir que, independentemente de se tratar de nós ou grupos de nós aderentes, soltos ou buracos de nós, é desprezável a contribuição destes, para a resistência mecânica, da secção transversal correspondente.

A avaliação dos nós é realizada com base na área da secção transversal que estes ocupam. A norma prEN 1310 (CEN, 1995) distingue dois métodos diferentes para a avaliação destes: método geral e método alternativo. No decorrer desta avaliação foi utilizado o método alternativo, que considera os nós presentes nas faces ou nos cantos onde estes aparecem, medindo a sua maior distância perpendicular ao eixo longitudinal da peça.

A avaliação dos nós só se encontra completa através da determinação do KAR total e do maior KAR marginal. Para determinar o KAR Total e o KAR Marginal seguiu-se o descrito na norma NP 4305 (1995). Esta norma considera que o KAR total ou índice de nós correspondente à secção transversal é definido pela área da secção transversal de uma peça ocupada pela projeção de um nó ou de um grupo de nós (Figura 3.3). A mesma norma considera o KAR Marginal ou índice de nós na secção marginal como a área de uma secção marginal de uma peça ocupada pela projeção de um nó ou de um grupo de nós (Figura 3.4). As zonas marginais podem ser definidas como zonas vizinhas dos cantos de uma secção transversal, cada uma das quais ocupando um quarto da superfície transversal total da peça.

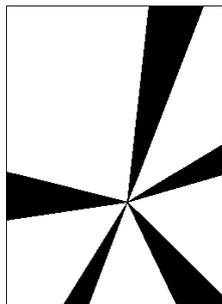


Figura 3.3 – Medição do KAR Total

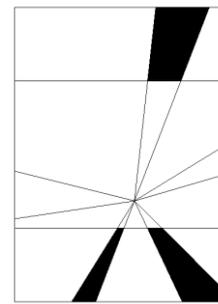


Figura 3.4 – Medição do KAR Marginal

Assim, para a determinação do KAR Total e do KAR marginal, foi necessário determinar as projeções dos diferentes nós constituintes da peça. Estas projeções foram idealizadas admitindo que cada nó tem um desenvolvimento aproximadamente cónico, cujo vértice se encontra localizado na medula. Em situações em que a medula não se encontrava presente no

elemento de madeira, estimou-se a sua posição, considerando os nós a convergir para um ponto exterior à peça (ponto em que supostamente se encontraria a medula). Nas Figuras 3.5 e 3.6 apresentam-se os casos em que a medula se encontra presente e ausente do elemento.

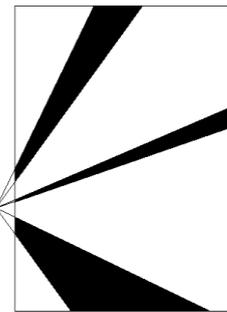
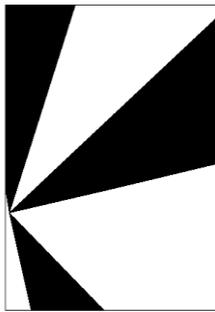


Figura 3.5 – Medula presente no elemento

Figura 3.6 – Medula ausente do elemento

As medições destas grandezas foram realizadas para todas as secções ao longo do comprimento da peça e os resultados obtidos, para cada lote, são apresentados nos Quadros 3.2 e 3.3.

Quadro 3.2 – KAR Total dos elementos de cada lote [mm²]

Lote	N	KAR TOTAL [mm ²]			
		Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo
1	30	0,295	0,078	0,443	0,164
2	20	0,109	0,269	0,863	0
3	20	0,337	0,221	0,814	0
4	23	0,301	0,235	0,614	0

Quadro 3.3 – KAR Marginal dos elementos de cada lote [mm²]

Lote	N	KAR MARGINAL [mm ²]			
		Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo
1	30	0,405	0,113	0,597	0,180
2	20	0,130	0,318	0,936	0
3	20	0,542	0,299	0,975	0
4	23	0,452	0,345	0,957	0

Através da observação dos Quadros 3.2 e 3.3 verifica-se que nos lotes 2, 3 e 4 existem peças que não apresentam qualquer nó na sua constituição, visto que os seus KAR (total e marginal) mínimos correspondentes são 0.

3.3.3 Fio

A avaliação do fio realiza-se em função da inclinação das fibras da madeira, relativamente ao eixo longitudinal da peça, recorrendo a uma ferramenta designada por riscador (Figura 3.7). Um riscador é normalmente uma peça composta por uma haste em que uma das extremidades possui um objeto de ponta afiada e a outra possui um manípulo que roda livremente relativamente a haste, de modo a não influenciar a direção tomada pela agulha. O valor do fio foi medido sobre um comprimento relativamente grande para que fosse possível determinar a inclinação geral das fibras independentemente das deformações locais existentes na peça. Nos casos em que existe simultaneamente fio inclinado num canto e numa face da peça, teve-se em conta o caso com maior desvio, ou seja, o caso em que a inclinação das fibras é mais elevada. Nas secções que apresentam algum tipo de defeito (nós, fendas, bolsas de resina, etc.) a inclinação do fio foi ignorada, visto que foi indiretamente considerada na verificação desses defeitos. Assim sendo, a inclinação do fio medida, em percentagem, é obtida de acordo com a seguinte fórmula:

$$Fio = \frac{X}{Y} \times 100 \quad (3.1)$$

As incógnitas X e Y , apresentadas na equação 3.1 e representadas na Figura 3.8, são o desvio das fibras e o comprimento sobre o qual este desvio é medido, respetivamente. Estas duas incógnitas foram medidas em milímetros.

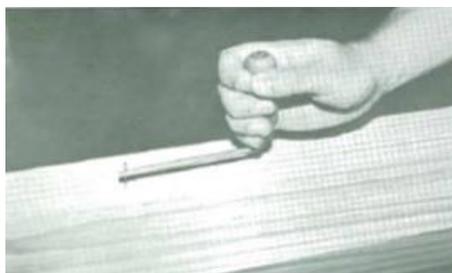


Figura 3.7 – Utilização do Riscador
(LNEC, 1997)

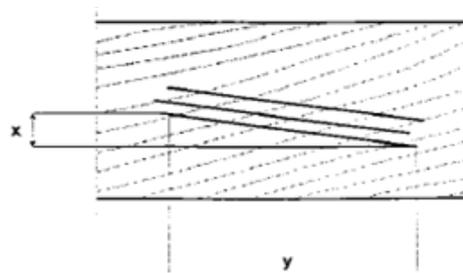


Figura 3.8 – Medição do Fio (CEN, 1995)

As medições desta grandeza foram realizadas ao longo do comprimento da peça e os resultados obtidos, para cada lote, consoante o valor do fio mais inclinado do canto ou da face, são apresentados nos Quadros 3.4.

Quadro 3.4 – Inclinação do Fio [%]

Lote	N	Inclinação do Fio [%]			
		Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo
1	30	6,54	2,80	14,52	1,82
2	20	4,80	2,83	9,46	0,87
3	20	7,98	2,55	13,86	3,65
4	23	7,54	3,58	16,22	1,00

3.3.4 Taxa de Crescimento

A taxa de crescimento é um dos parâmetros que permite estimar de forma expedita a massa volúmica de uma determinada peça de madeira. A avaliação deste parâmetro consiste em, para cada extremidade, traçar a maior linha reta normal aos anéis de crescimento, contando o número de anéis existentes ao longo dessa linha (Figura 3.9). Para os casos em que a medula se encontra presente no topo do elemento de madeira, a norma europeia prEN 1310 (CEN, 1995) define que os anéis só começam a ser contabilizados após um raio de 25mm cujo centro é a medula (Figura 3.10).



Figura 3.9 – Medula ausente do topo

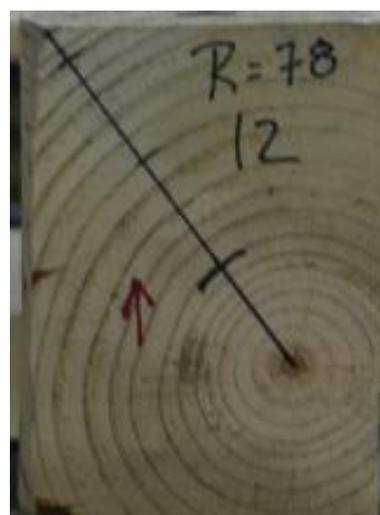


Figura 3.10 – Medula presente no topo

Assim sendo, a taxa de crescimento é dada pela razão entre a soma dos comprimentos das linhas traçadas nas extremidades e a soma do número de anéis de crescimento ao longo dessas linhas. No Quadro 3.5 são apresentados os resultados, em milímetros, correspondentes à medição da taxa de crescimento dos elementos de madeira em estudo.

Quadro 3.5 – Taxa de crescimento [mm]

Lote	N	Taxa de Crescimento [mm]			
		Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo
1	30	4,21	1,78	9,07	1,00
2	20	5,08	1,14	7,35	3,24
3	20	3,54	1,63	7,15	0,85
4	23	3,08	0,85	4,70	1,75

3.3.5 Fendas

As fendas representam descontinuidades no material que, em particular quando associados a outro tipo de defeitos, podem diminuir consideravelmente a resistência das peças de madeira. Pode-se distinguir dois diferentes tipos de fendas: as repassadas e as não repassadas. As fendas repassadas caracterizam-se por ocorrer simultaneamente em duas superfícies opostas da peça.

Para contabilizar as fendas, determinou-se o seu comprimento. O comprimento de uma fenda corresponde à distância entre duas linhas que a delimitam, aproximadamente perpendiculares à direção das fibras (Figura 3.11). Nos casos em que no decorrer do desenvolvimento de uma fenda surgem outras com desenvolvimento que continua após o término da primeira, contabilizou-se o comprimento da fenda como se só de uma se tratasse, medindo-se esse comprimento desde o início da primeira fenda até ao fim da última.

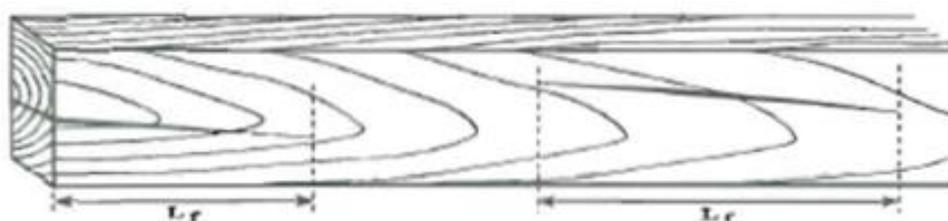


Figura 3.11 – Medição das fendas (LNEC, 1997)

No Quadro 3.6 apresentam-se os resultados obtidos relativos à medição das fendas existentes ao longo do comprimento da peça. São apresentados a média e o desvio padrão do número e do comprimento de fendas por lote, bem como o comprimento da fenda máxima e mínima presentes em cada lote, independentemente da face em que se encontra.

Quadro 3.6 – Número e comprimento das fendas não-repassadas

		Fendas Não-Repasadas					
		Número de Fendas		Comprimento das Fendas - Lf [mm]			
Lote	N	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo
1	30	6	3	503,32	597,50	3244	20
2	20	1	2	163,95	128,71	531	24
3	20	2	3	469,57	813,28	2629	48
4	23	1	2	626,10	638,85	2424	71

No que respeita as fendas repassadas, verificou-se que nenhum dos elementos de madeira analisados apresenta este tipo de fendas, por isso não foram contabilizadas nos resultados apresentados.

3.3.6 Bolsas de Resina

As bolsas de resina, tal como as fendas, representam descontinuidades no material que, em particular quando associados a outro tipo de defeitos, podem diminuir consideravelmente a resistência da madeira. Existem também dois tipos de bolsas de resina: as repassadas e as não repassadas. A avaliação das bolsas de resina nos elementos de madeira é feita utilizando exatamente o mesmo método descrito anteriormente para a avaliação das fendas.

No Quadro 3.7 apresentam-se os resultados obtidos relativamente à medição das bolsas de resina existentes ao longo do comprimento da peça. São apresentados a média e desvio padrão do número e comprimento das bolsas de resina por lote, bem como o comprimento da bolsa de resina máxima e mínima, independentemente da face em que se encontram.

Quadro 3.7 – Número e comprimento das bolsas de resina

		Bolsas de Resina Não-repassadas					
		Número de Bolsas		Comprimento das Bolsas - Lf [mm]			
Lote	N	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo
1	30	2	3	55,90	125,59	1057	10
2	20	3	2	92,45	69,75	429	4
3	20	3	6	83,94	43,29	260	19
4	23	1	2	99,88	131,34	686	7

Durante a avaliação das bolsas de resina, não foram encontradas nenhuma repassadas, logo não foram contabilizadas para os resultados apresentados.

3.3.7 Descaio

O descaio reflete o remanescente da superfície do toro na peça de madeira, sendo considerado um defeito de laboração. A sua influência traduz-se em eventuais dificuldades de fixação, apoio ou colagem dos elementos de madeira. Este defeito é meramente visual, visto que, tipicamente, a perda da resistência devida à redução da secção transversal é relativamente baixa, sendo, na maioria das vezes, desprezável.

A avaliação deste defeito é feita através do quociente entre a projeção do descaio na face (canto) e a largura total dessa face (canto). Na Figura 3.12 apresentam-se diferentes tipos de descaio, bem como os parâmetros a ter em consideração.

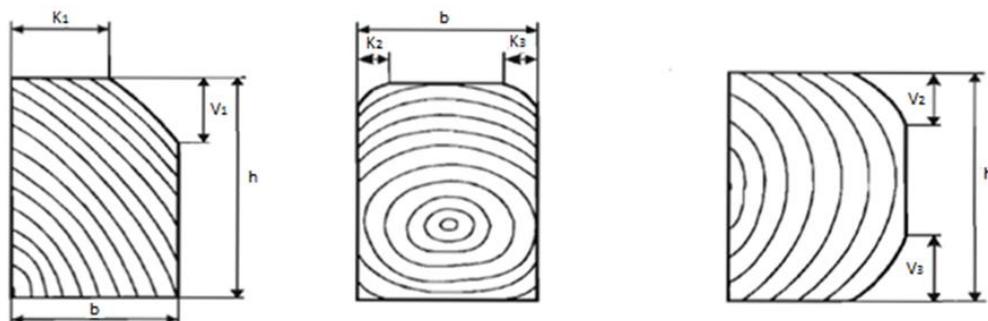


Figura 3.12 – Medição do descaio (LNEC, 1997)

A determinação da importância do descaio na face da peça, em percentagem, foi calculada através da seguinte relação:

$$\frac{V_1}{h} \times 100 \text{ ou } \frac{V_2 + V_3}{h} \times 100 \quad (3.2)$$

A determinação da importância do descaio no canto da peça, em percentagem, foi calculada através da seguinte relação:

$$\frac{b - K_1}{b} \times 100 \text{ ou } \frac{K_2 - K_3}{b} \times 100 \quad (3.3)$$

No Quadro 3.8 apresentam-se, em percentagem, os valores relativos à importância do descaio na face e no canto para cada lote.

Quadro 3.8 – Importância do descaio [%]

		Importância do Descaio [%]			
		Face		Canto	
Lote	N	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
1	30	14	15	22	22
2	20	14	15	13	12
3	20	14	14	21	16
4	23	15	8	20	10

3.3.8 Empenos

Os empenos são as deformações existentes nos elementos de madeira devidas a variações dos seus teores de água, associados à anisotropia do material. A contabilização dos empenos é realizada essencialmente por questões funcionais e de dificuldades de aplicação dos elementos de madeira em obra. Existem quatro tipos de empenos: em arco de face, em arco de canto, em hélice e em meia-cana. Nas Figuras 3.13, 3.14, 3.15 e 3.16 são apresentadas os diferentes tipos de empenos.

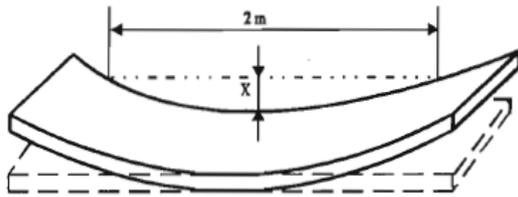


Figura 3.13 – Empeno em arco de face
(LNEC, 1997)

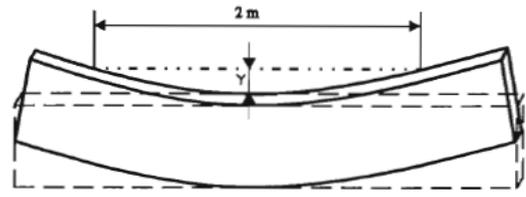


Figura 3.14 – Empeno em arco de canto
(LNEC, 1997)

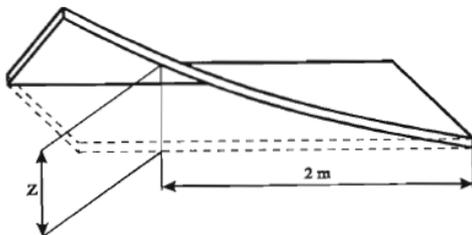


Figura 3.15 – Empeno em hélice (LNEC,
1997)



Figura 3.16 – Empeno em meia-cana
(LNEC, 1997)

Como se observa nas figuras acima apresentadas, os empenos em arco de face, em arco de canto e em hélice são medidos num comprimento de dois metros, enquanto, para o empeno em meia-cana, a medição é feita sobre a largura da peça.

No Quadro 3.9 apresentam-se, em milímetros, os valores obtidos, por lote, relativos aos diversos tipos de empenos presentes nas peças.

Quadro 3.9 – Empenos [mm]

Lote	N	Empenos					
		Arco de face		Arco de canto		Hélice	
		Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
1	30	8,02	2,77	9,62	4,31	4,35	5,44
2	20	5,40	3,43	4,38	2,15	3,02	6,00
3	20	10,32	5,52	10,81	7,95	5,42	7,49
4	23	8,29	6,90	6,90	3,13	2,89	5,29

No Quadro 3.9 não é apresentado os valores relativos aos empenos de meia-cana, devido ao facto de as peças em estudo não apresentarem este tipo de empeno.

3.3.9 Medula

A medula de um elemento de madeira é o núcleo do tronco que se encontra circundado pelas várias camadas de crescimento. Os problemas associados à presença de medula prendem-se com o tipo de madeira que se lhe encontra associado. Este tipo de madeira designa-se por lenho juvenil que, devido às suas características (parede celular menos espessa, fio consideravelmente mais inclinado em relação ao outro lenho), apresenta valores de resistência inferiores aos do lenho adulto.

Para avaliar a medula, apenas se teve em consideração a sua presença, isto é, verificou-se se as peças apresentavam ou não medula na sua constituição. No Quadro 3.10 apresentam-se, em percentagem, os resultados obtidos relativos ao número de peças com presença de medula, por lote.

Quadro 3.10 – Percentagem de peças com presença de medula [%]

Lote	N	Peças com presença de
		Medula [%]
1	30	90
2	20	0
3	20	55
4	23	61

3.4 Classificação visual da amostra

O principal objetivo da classificação visual de madeira é definir uma classe de qualidade para este material. Segundo a norma portuguesa NP 4305 (1995), distinguem-se duas classes de qualidade: E (Estruturas) e EE (Especial para Estruturas). A distinção entre estas duas classificações é feita considerando limites diferenciados para as características descritas nos subcapítulos anteriores. Na Figura 3.17, adaptado da NP 4305 (1995), apresenta-se as diversas características a ter em conta nesta classificação, bem como os seus limites para cada uma das classes.

Características e defeitos da madeira		Classes de Qualidade		
		Classe EE		Classe E
Nós	KAR marginal	<1/5	<1/2	>1/2
	KAR total	<1/5	<1/2	<1/3
Fio		<1/10	<1/6	
Taxa de Crescimento		<6 mm	<10 mm	
Fendas	não repassadas	Fendas superficiais com Lf<300 mm podem ser ignoradas		
		Lf< 1/4L e Lf<600 mm		Lf< 1/4L e Lf<900 mm
Descaio		< 1/4b; < 1/4a no comprimento total	< 1/3b; < 1/3a no comprimento total	
		< 1/3b; < 1/3a ao longo de 300 mm (se cada topo tiver 3 ou 4 arestas vivas)	< 1/3b; < 1/3a ao longo de 300 mm (se cada topo tiver 3 ou 4 arestas vivas)	
Empenos	em arco de face (em 2m)	Se b=35 mm → X<30 mm; Se b>75 mm → X<10 mm (interpoler para valores intermédios)		
	em arco de canto (em 2m)	Se a=60 mm → Y<10 mm; Se a>250 mm → Y<5 mm (interpoler para valores intermédios)		
	em hélice (em 2m)	Z<1,5 mm por cada 25 mm de largura da peça		
Bolsas de Resina	não repassadas	Sem limites caso sejam mais curtos que a largura da peça Se tal não se verificar aplicam-se os limites das fendas		
Medula		Não admitida	Admitida	

Figura 3.17 – Classes de qualidade relativas à madeira de pinho bravo segundo a NP 4305 (1995)

No Quadro 3.11 apresentam-se o número de peças, de cada lote, correspondente a cada classe de qualidade. Nos resultados descritos neste quadro teve-se em conta todas as características apresentadas na Figura 3.15.

Quadro 3.11 – Número de peças correspondentes a cada classe de qualidade

Lote	N	Classes de Qualidade		
		EE	E	Rejeitadas
1	30	0	0	30
2	20	0	8	12
3	20	0	2	18
4	23	2	2	19

No decorrer da avaliação das classes de qualidade verificou-se que a maioria das peças foi rejeitada devido à presença de elevadas fendas e empenos. Estas duas características foram as que mais influenciaram a determinação da classe de qualidade.

4 ENSAIOS EXPERIMENTAIS

4.1 Introdução

Este capítulo incide na determinação das propriedades de flexão dos elementos de pinheiro bravo analisados. Nele serão descritos os métodos de ensaios, bem como apresentados os resultados obtidos. No decorrer destes ensaios as propriedades de flexão em estudo foram o módulo de elasticidade dinâmico ($E_{m,dyn}$), o módulo de elasticidade local e global ($E_{m,local}$ e $E_{m,global}$), e a resistência à flexão (f_m).

Para determinar as propriedades de flexão das peças recorreu-se a ensaios dinâmicos e estáticos, através de métodos destrutivos e não-destrutivos e destrutivos. Os ensaios estáticos foram efetuados de acordo com o preconizado na EN 408 (CEN, 2012).

4.2 Ensaios dinâmicos

4.2.1 Aspetos gerais

No presente subcapítulo pretende-se descrever os ensaios dinâmicos realizados no decorrer deste trabalho. Estes ensaios baseiam-se na relação entre a frequência própria de vibração de uma peça de madeira e o seu módulo de elasticidade. Assim sendo, utilizaram-se métodos de vibração longitudinal, com o objetivo de determinar o módulo de elasticidade dinâmico dos elementos de madeira. Para determinar este parâmetro realizaram-se dois tipos de ensaios de vibração longitudinal, um recorrendo ao *Timber Grader* MTG e o outro utilizando o Acelerómetro. No decorrer deste capítulo apresentam-se as diferenças entre estes dois tipos de ensaios, bem como os resultados obtidos para cada um deles.

4.2.2 *Timber Grader* MTG

Um dos ensaios dinâmicos de vibração longitudinal, relativos a avaliação não destrutiva realizada neste estudo, foi efetuado recorrendo ao equipamento comercial *Timber Grader* MTG; este equipamento permite determinar o módulo de elasticidade dinâmico através da vibração longitudinal dos elementos de madeira. O funcionamento deste aparelho consiste no disparo de uma esfera contra a face da secção transversal da peça, provocando assim uma frequência própria de vibração cuja resposta dinâmica é medida pelo aparelho. Através da

relação entre o valor da frequência própria de vibração medida e os dados previamente introduzidos (geometria e dimensões da peça, espécie de madeira, teor de água e massa), obtém-se o módulo de elasticidade dinâmico. Para aumentar a precisão dos resultados, em cada peça, foram feitas diversas leituras em cada topo até obter três leituras precisamente iguais. Assim tentou-se eliminar possíveis influências de pequenas perturbações externas. A Figura 4.1 pretende ilustrar o modo de utilização do equipamento *Timber Grader* MTG.



Figura 4.1 – Medição da frequência própria de vibração através do *Timber Grader* MTG

Como se referiu anteriormente, para a utilização deste equipamento foi necessário introduzir diversos dados relativos às peças testadas. A geometria e as dimensões das peças já eram conhecidas previamente, bem como a espécie de madeira. Adicionalmente foi necessário determinar a massa e o teor de água das peças. Para a determinação da massa utilizou-se uma balança na qual de pesaram as peças. No que respeita a determinação do teor de humidade, recorreu-se a um humidímetro de agulhas (Figura 4.2), que faz a medição desta característica com base na espécie de madeira e na condutividade elétrica entre as duas agulhas.



Figura 4.2 – Determinação do teor de humidade através de um humidímetro de agulhas

Para cada uma das peças mediram-se os teores de humidade em três pontos, a aproximadamente 20 cm de cada topo e a meio da peça. O teor de água considerado para efeitos de cálculo foi a média das três medições. Na Figura 4.3 apresenta-se um gráfico de distribuição de frequência relativo ao teor de água determinado através do humidímetro.

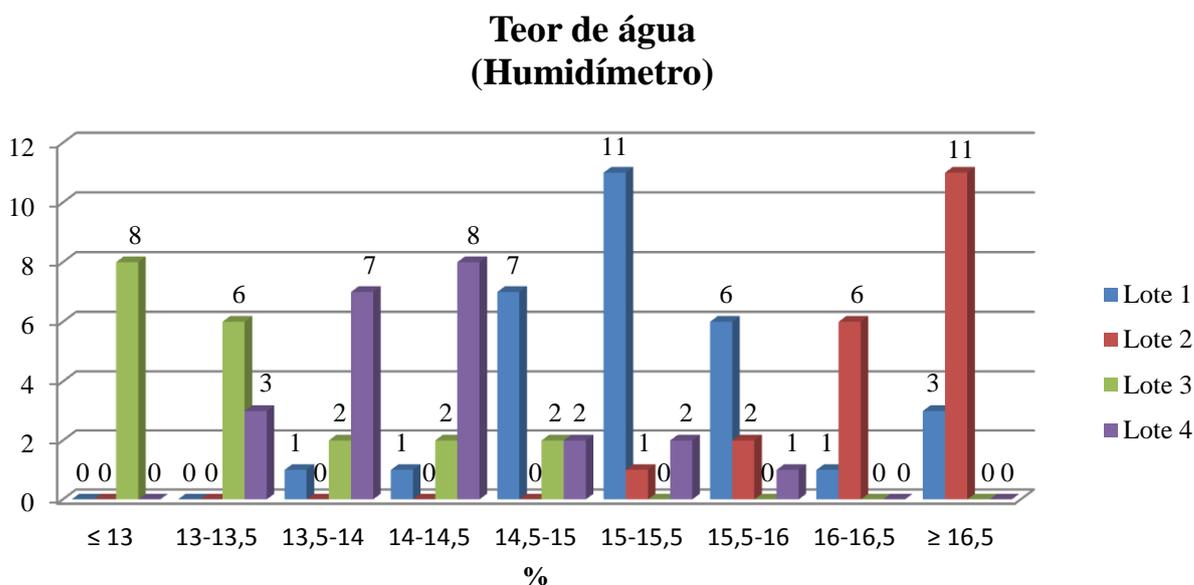


Figura 4.3 – Distribuição de frequência do teor de água determinado através do humidímetro

No Quadro 4.1 apresentam-se os resultados obtidos, por lote, relativos a dimensões, massa e teor de água.

Quadro 4.1 – Dimensões [mm], massa [kg] e teor de água [%] dos elementos

Lote	Dimensões						Massa [kg]		Teor de Água [%]	
	b [mm]		h [mm]		L [mm]		Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão				
1	70,96	0,89	97,83	0,59	2355,5	22,3	8,81	0,74	15,30	0,69
2	69,15	1,51	70,10	0,69	2001,2	0,7	5,98	0,60	16,39	0,43
3	69,62	1,71	100,25	3,35	2417,4	208,0	9,85	2,23	13,20	0,81
4	60,64	1,25	79,83	2,67	2381,8	207,7	7,06	1,40	14,13	0,65

No Quadro 4.2 apresentam-se os resultados obtidos, por lote, relativos à frequência própria de vibração (Hz) determinada através do *Timber Grader* MTG.

Quadro 4.2 – Frequência própria de vibração [Hz] obtida através do *Timber Grader MTG*

		Frequência Própria de Vibração f [Hz]			
Lote	N	Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo
1	30	924,27	75,75	1059	742
2	20	1206,90	89,64	1313	1044
3	20	919,10	95,80	1083	742
4	23	961,83	94,75	1113	776

Na Figura 4.4 é apresentado um gráfico onde se pode verificar a distribuição de frequência relativa aos resultados obtidos para o módulo de elasticidade dinâmico, utilizando o do *Timber Grader MTG*.

Módulo de Elasticidade Dinâmico (*Timber Grader MTG*)

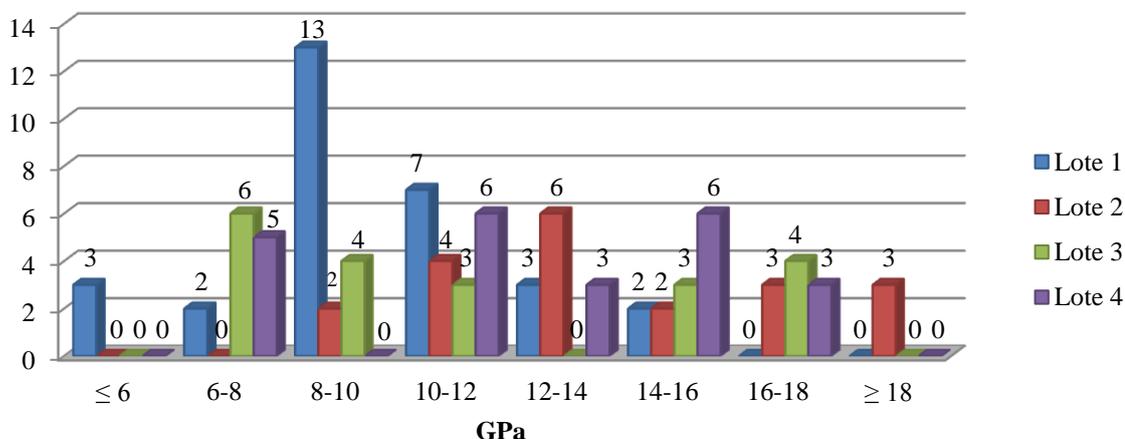


Figura 4.4 – Distribuição de frequência do módulo de elasticidade dinâmico ($E_{m,dyn}$), determinado através do *Timber Grader MTG*

Ao analisar os resultados obtidos expressos na Figura 4.3, verifica-se que os elementos que apresentam maior quantidade de defeitos na sua constituição, elementos pertencentes ao Lote 1, expressam módulos de elasticidade dinâmicos bastante inferiores aos restantes. Isto acontece devido ao facto de defeitos, tais como, nós, bolsas de resina e fendas, diminuírem

significativamente a frequência de vibração da peça e conseqüentemente os seus módulos de elasticidade dinâmicos.

4.2.3 Acelerómetro

O outro ensaio dinâmico de vibração longitudinal, relativo a avaliação não destrutiva realizada neste estudo, foi efetuado recorrendo ao acelerómetro. Este método consiste em provocar uma vibração longitudinal, induzida na viga através de um impacto provocado, neste caso, por um martelo. A resposta dinâmica produzida por este impacto é medida através do acelerómetro. Esta resposta dinâmica é posteriormente tratada no programa *LabView Signal Express*, que fornece a frequência própria de vibração do elemento de madeira ensaiado. A Figura 4.5 pretende ilustrar a medição da frequência própria de vibração de uma peça recorrendo a este aparelho.



Figura 4.5 – Medição da frequência própria de vibração através do acelerómetro

Este tipo de ensaio apenas permite determinar a frequência própria de vibração das peças. No Quadro 4.3 apresenta-se os resultados obtidos, por lote, relativos à frequência própria de vibração (Hz).

Quadro 4.3 – Frequência própria de vibração [Hz] obtida através do Acelerómetro

Lote	N	Frequência Própria de Vibração <i>f</i> [Hz]			
		Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo
1	30	911,70	76,95	1053	731
2	20	1196,40	86,21	1306	1038
3	20	911,40	96,10	1074	729
4	23	946,74	93,00	1097	760

Devido ao facto de a utilização do acelerómetro apenas permitir determinar a frequência própria de vibração, foi necessário calcular o módulo de elasticidade dinâmico correspondente. Para tal, recorreu-se à expressão desenvolvida por Vries, Gard et al. (2006), dada por:

$$E_{m,dyn} (MPa) = 4l^2 f^2 \rho \quad (4.1)$$

Na Figura 4.6 é apresentado um gráfico onde se pode verificar a distribuição de frequência relativa aos resultados obtidos para o módulo de elasticidade dinâmico, utilizando a frequência própria de vibração determinada através do acelerómetro.

Módulo de Elasticidade Dinâmico (Acelerómetro)

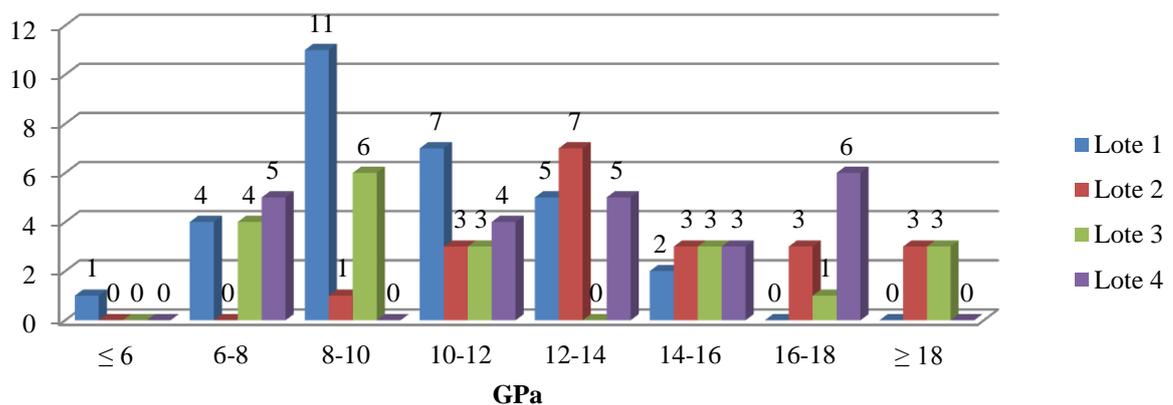


Figura 4.6 – Distribuição de frequência do módulo de elasticidade dinâmico ($E_{m,dyn}$), determinado através do Acelerómetro

Tal como verificado para o módulo de elasticidade dinâmico obtido utilizando o *Timber Grader* MTG, ao analisar os resultados obtidos para este parâmetro utilizando o acelerómetro, verifica-se que os elementos que apresentam maior quantidade de defeitos na sua constituição, elementos pertencentes ao Lote 1, expressão módulos de elasticidade dinâmicos bastante inferiores aos restantes.

4.2.4 Comparação de resultados

Depois de determinados a frequência própria de vibração e o módulo de elasticidade dinâmicos para os dois ensaios de vibração longitudinal efetuados, fez-se a comparação entre os resultados obtidos. No Quadro 4.4 apresentam-se os resultados e as diferenças obtidas entre os dois ensaios de vibração longitudinal realizados (*Timber Grader* MTG e acelerómetro), no que respeita à frequência própria de vibração e o módulo de elasticidade dinâmico.

Quadro 4.4 – Comparação de resultados entre o *Timber Grader* MTG e o acelerómetro

Lote	N	f [Hz]	f [Hz]	Δf	$E_{m,dyn}$ [MPa]	$E_{m,dyn}$ [MPa]	$\Delta E_{m,dyn}$
		MTG	Acelerómetro	[Hz]	MTG	Acelerómetro	[MPa]
		Média			Média		
1	30	924,27	911,70	12,57	9930,10	10114,41	-184,31
2	20	1206,90	1196,40	10,50	13972,75	14269,57	-296,82
3	20	919,10	911,40	7,70	11146,75	11613,99	-467,24
4	23	961,83	946,74	15,09	12317,48	12636,35	-318,87

Analisando os resultados expressos no quadro acima apresentado, verifica-se que os valores obtidos relativos a frequência própria de vibração utilizando o *Timber Grader* MTG, são ligeiramente superiores aos obtidos através do acelerómetro. Relativamente ao módulo de elasticidade dinâmico verifica-se o contrário. Tal acontece devido ao facto de o *Timber Grader* MTG, contrariamente ao acelerómetro, ter em consideração o teor de água das peças, fazendo com que o módulo de elasticidade dinâmico diminua.

4.3 Ensaios estáticos

4.3.1 Aspetos gerais

No presente subcapítulo pretende-se realizar uma pequena descrição relativamente aos ensaios estáticos realizados. Foram realizados ensaios não destrutivos com o objetivo de determinar o módulo de elasticidade estático (local e global) e ensaios destrutivos com o objetivo de determinar a resistência à flexão dos elementos de madeira ensaiados. Estes ensaios foram realizados de acordo com o preconizado na norma europeia EN 408 (CEN, 2012). No decorrer deste capítulo apresentar-se-ão os resultados obtidos para cada um destes parâmetros.

4.3.2 Módulo de elasticidade estático

A determinação do módulo de elasticidade estático foi efetuada, recorrendo a ensaios não-destrutivos de acordo com o previsto na norma europeia EN 408 (CEN, 2012). Esta norma fornece-nos dois métodos para o cálculo do módulo de elasticidade estático: um para o cálculo do módulo de elasticidade local e outro para o cálculo do módulo de elasticidade global. Para a determinação destes parâmetros foi necessário montar um esquema de ensaio apropriado, de acordo com a geometria e dimensões das peças em estudo, seguindo as indicações descritas na norma.

A determinação do módulo de elasticidade local ($E_{m,local}$) foi efetuada com base no esquema de ensaio apresentado na Figuras 4.7, presente na EN 408 (CEN, 2012).

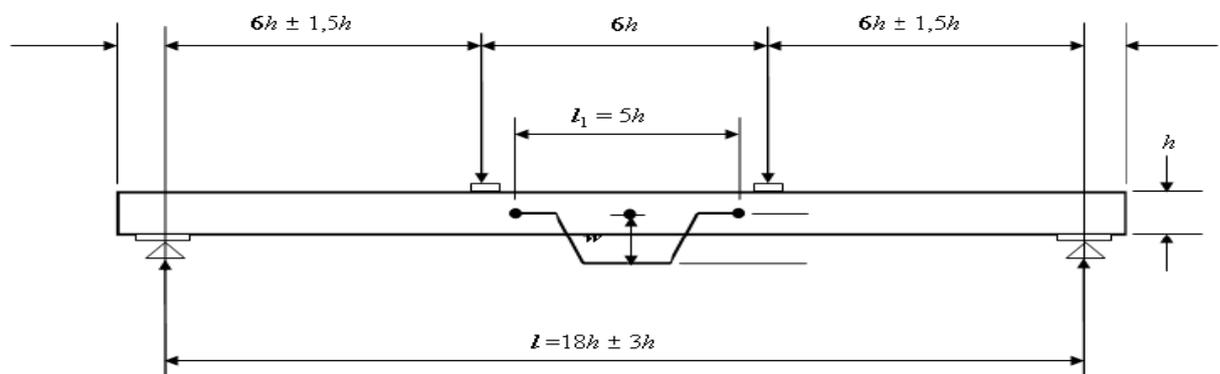


Figura 4.7 – Esquema de ensaio para o $E_{m,local}$, de acordo com a EN 408 (CEN, 2012)

Relativamente ao módulo de elasticidade global ($E_{m,global}$), este parâmetro foi determinado com base no esquema de ensaio apresentado na Figuras 4.8, presente na EN 408 (CEN, 2012).

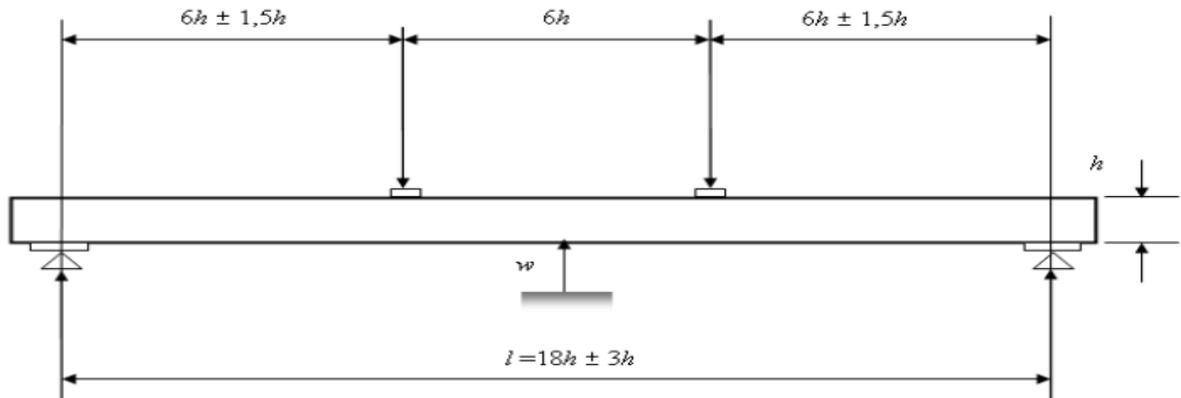


Figura 4.8 – Esquema de ensaio para o $E_{m,global}$, de acordo com a EN 408 (CEN, 2012)

Durante a mediação do $E_{m,local}$ e do $E_{m,global}$, teve-se em atenção a taxa de movimento de cabeça de carga para que esta não ultrapassa-se 0,3% da altura de cada peça por segundo. Considerou-se ainda que a carga máxima aplicada não ultrapassava 40% da força máxima estimada. Estas duas considerações encontram-se definidas na EN 408 (CEN, 2012).

O cálculo do $E_{m,local}$ e do $E_{m,global}$ foi realizado de acordo com as seguintes expressões presentes na EN 408 (CEN, 2012):

$$E_{m,local} (MPa) = \frac{al_1^2 (F_2 - F_1)}{16I (W_2 - W_1)} \quad (4.2)$$

$$E_{m,global} (MPa) = \frac{3al^2 - 4a^3}{2bh^3 \left(2 \frac{W_2 - W_1}{F_2 - F_1} - \frac{6a}{5Gbh} \right)} \quad (4.3)$$

Os deslocamentos, w , foram medidos recorrendo ao uso de defletómetros. Na Figura 4.9 apresenta-se o esquema de ensaio, utilizado durante os ensaios, para a determinação $E_{m,local}$ e do $E_{m,global}$.



Figura 4.9 – Ensaio não-destrutivo para a determinação $E_{m,local}$ e do $E_{m,global}$.

Nas Figuras 4.10 e 4.11 apresentam-se os gráficos relativos às distribuições de frequência obtidas para o módulo de elasticidade estático local e global respetivamente, determinado através dos ensaios estáticos realizados.

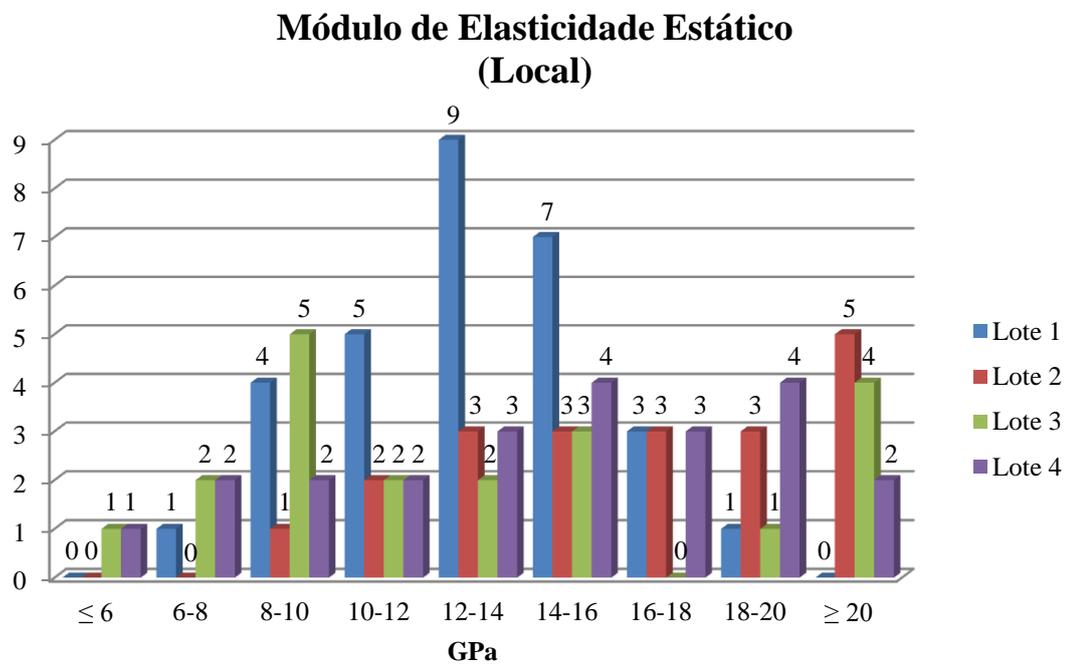


Figura 4.10 – Distribuição de frequência do módulo de elasticidade estático local ($E_{m,local}$)

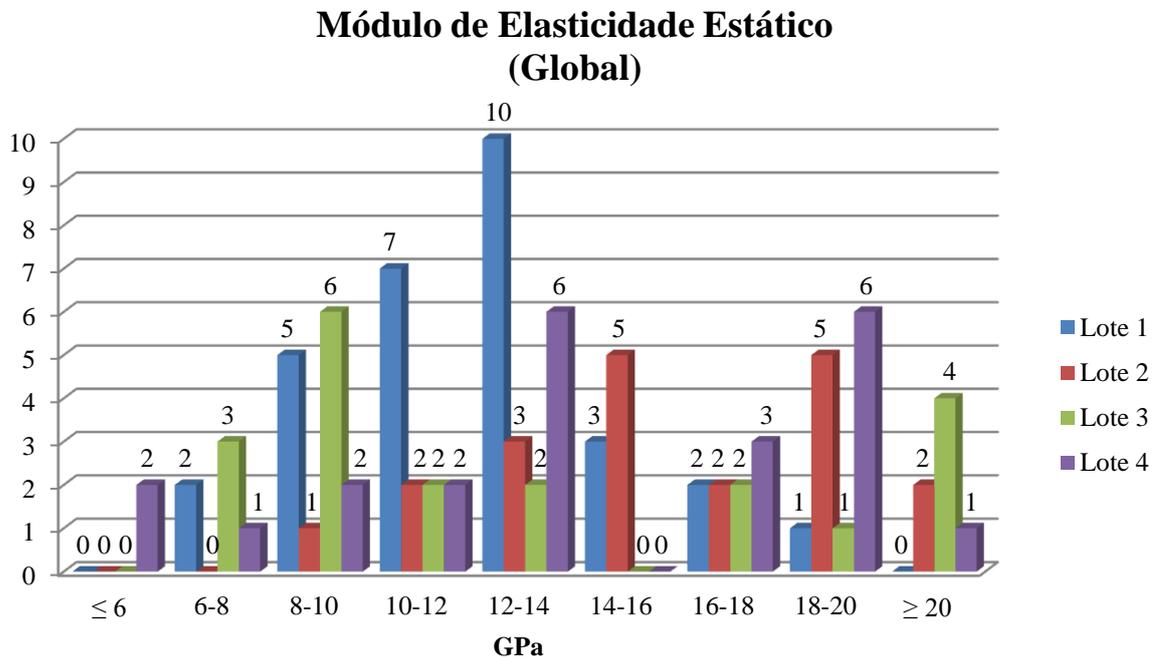


Figura 4.11 – Distribuição de frequência do módulo de elasticidade estático local ($E_{m,global}$)

Através da observação das Figuras 4.10 e 4.11 verifica-se que, tipicamente, o módulo de elasticidade local é ligeiramente superior ao módulo de elasticidade global. Tal acontece devido ao facto de a medição do módulo de elasticidade global ter em consideração a totalidade da peça, o que faz com que os seus valores sejam consideravelmente afetados por defeitos, nomeadamente empenos, que diminuem ligeiramente os resultados obtidos. O módulo de elasticidade local apenas tem em consideração a zona central da peça, fazendo com que o número de defeitos existentes que afetam este parâmetro sejam consideravelmente inferiores, apresentando, por isso, resultados ligeiramente superiores.

4.3.3 Resistência à flexão

O módulo de rotura (f_m) foi determinado recorrendo a ensaios destrutivos de acordo com o previsto na norma europeia EN 408 (CEN, 2012), aproveitando o esquema de ensaio utilizado para o cálculo do módulo de elasticidade estático descrito anteriormente. Assim sendo, a determinação deste parâmetro foi efetuada com base no esquema de ensaio apresentado na Figuras 4.12, sem inclusão das medições de deformações, tal como indicado na EN 408 (CEN, 2012).

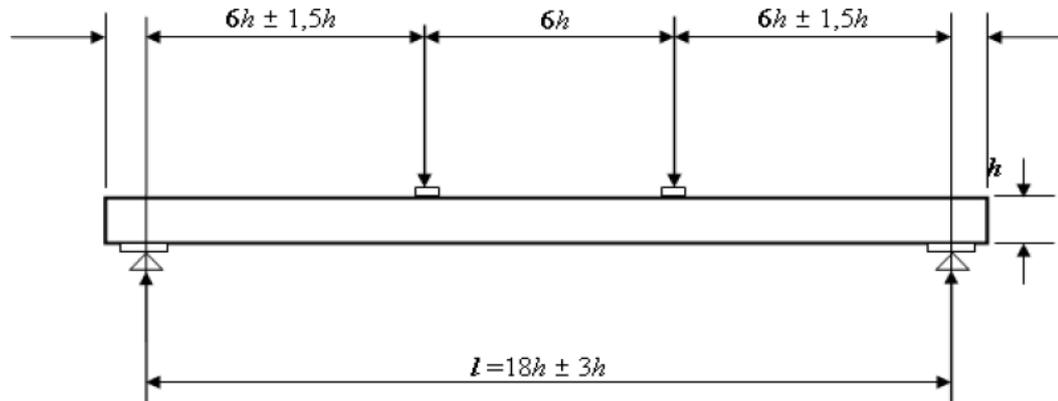


Figura 4.12 – Esquema de ensaio para f_m , de acordo com a EN 408 (CEN, 2012)

Os ensaios destrutivos realizados consistiram em aplicar um carregamento à peça de madeira até esta atingir a rotura, para assim determinar a força resistente de cada elemento. O cálculo da resistência à flexão das peças, f_m , foi realizado de acordo com a seguinte expressão indicada na EN 408 (CEN, 2012):

$$f_m (MPa) = \frac{3F_a}{bh^2} \quad (4.4)$$

No decorrer dos ensaios de rotura das peças teve-se em atenção a velocidade de ensaio, para que o seu tempo de duração fosse superior a 180 segundos e inferior a 420 segundos, tal como referido na EN 408 (CEN, 2012).

Na Figura 4.13 apresenta-se um exemplo de um dos ensaios destrutivos realizados, onde se pode observar a peça sujeita ao carregamento aplicado pelas cabeças de carga, bem como o esquema de ensaio utilizado.



Figura 4.13 – Ensaio destrutivo para a determinação de f_m

Na Figura 4.14 é apresentado um gráfico onde se pode verificar a distribuição de frequência relativa aos resultados obtidos para a resistência à flexão, determinada através da realização de ensaios destrutivos.

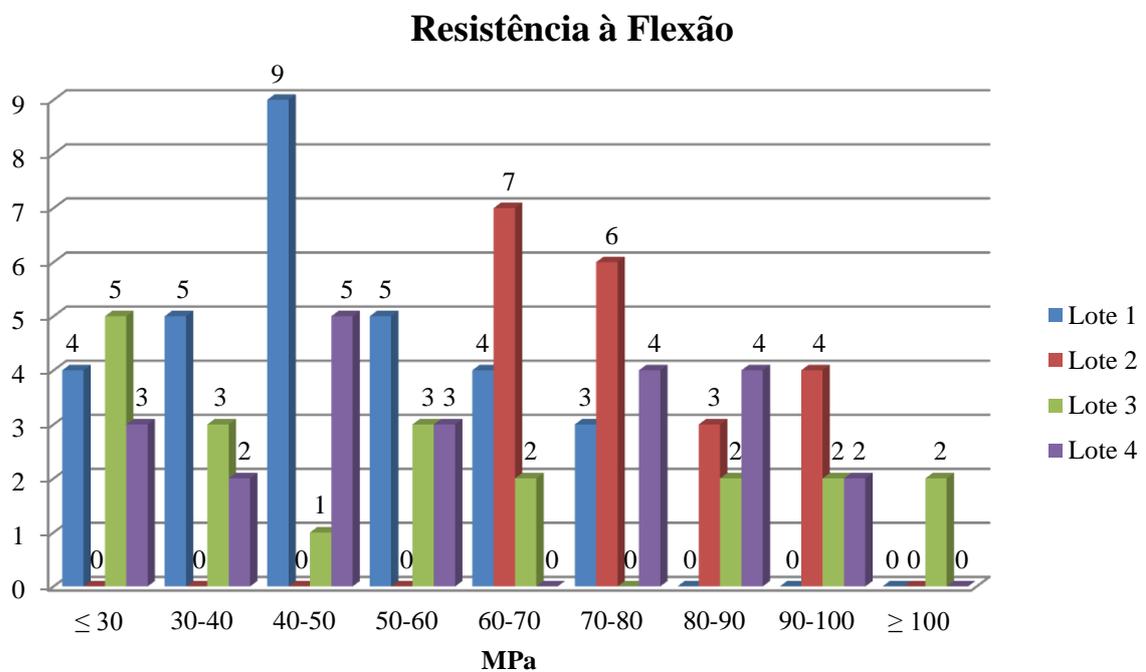


Figura 4.14 – Distribuição de frequência da resistência à flexão (f_m)

Analisando os resultados obtidos, verifica-se que os elementos que contêm maior quantidade de defeitos na sua constituição, elementos pertencentes ao Lote 1, expressam resistências à flexão inferiores aos restantes.

Ao longo da realização destes ensaios verificou-se que, tipicamente, a rotura das peças ocorre nas denominadas zonas fracas, zonas onde estão presentes defeitos (nós, fendas, bolsas de resina, casca inclusa, etc.). Nas Figura 4.15 e 4.16 pode-se observar exemplos de roturas dos elementos devido à presença de nós e de bolsas de resina, respetivamente.



Figura 4.15 – Rotura da peça devido à presença de nós



Figura 4.16 – Rotura da peça devido à presença de bolsas de resina

4.4 Teor de água

O teor de água (w) é uma das propriedades que mais afeta as propriedades mecânicas da madeira de acordo com o Wood Handbook (USDA, 1999). A determinação do teor de água foi feita de acordo a norma portuguesa NP 614 (IPQ, 1973), com o objetivo de determinar o teor de água de referência (w_{12}). Os provetes utilizados para a determinação desta propriedade foram obtidos através do corte das peças ensaiadas, próximo do local de rotura. Estes provetes foram cortados com um comprimento de 50 mm, de acordo com o preconizado na ISO 3133 (ISO, 1975). Após o corte, as peças foram colocadas em tabuleiros, num forno à temperatura de $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ (Figura 4.17), até se obter uma variação de massa, entre duas pesagens consecutivas, intervaladas de 2h, inferior ou igual a 0,5%.



Figura 4.17 – Fornos para secagem dos provetes

O teor de água foi determinado, de acordo com a NP 614 (IPQ, 1973), através da seguinte expressão:

$$w(\%) = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100 \quad (4.5)$$

Na Figura 4.18 apresenta-se o gráfico onde se pode verificar a distribuição de frequência relativa aos resultados obtidos para o teor de água de referência (provetes secos).

Teor de Água (Provetes Secos)

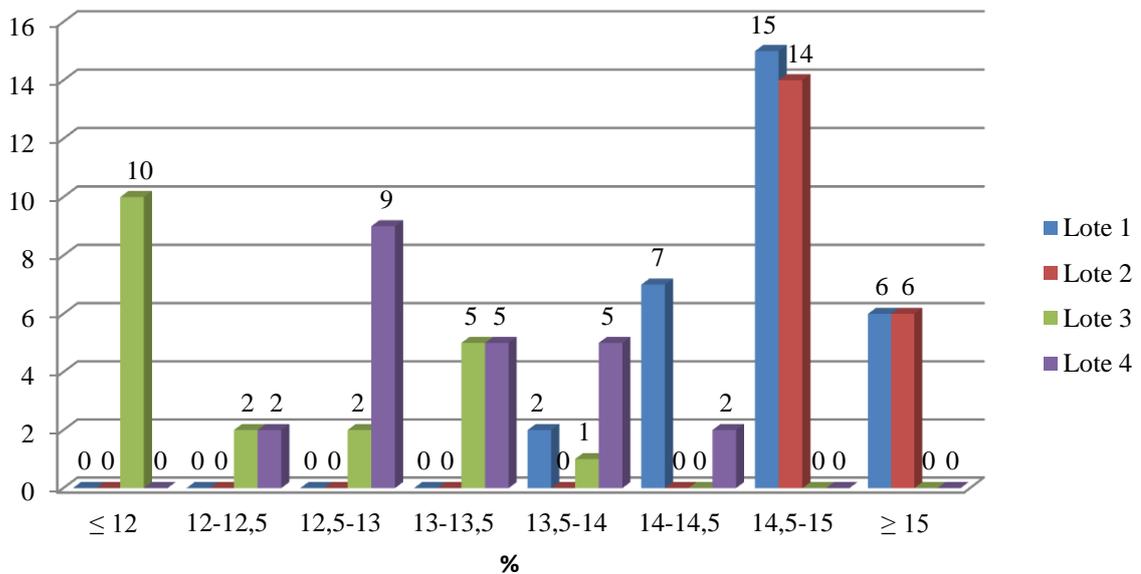


Figura 4.18 – Distribuição de frequência do teor de água de referência (provetes secos)

Comparando os resultados obtidos na medição do teor de água de referência (Figura 4.18) com os obtidos utilizando o humidímetro (Figura 4.3), verifica-se que os resultados obtidos utilizando este aparelho são ligeiramente superiores. Esta ligeira diferença deve-se ao facto de o teor de água medido através do humidímetro corresponder ao teor de água de ensaio, em que a madeira não está sujeita a secagem prévia.

4.5 Massa volúmica

A avaliação da massa volúmica (ρ) foi efetuada com os prismas utilizados para a determinação do teor de água. Para tal, para além do peso do provete foram medidas a altura, largura e espessura, em termos de valores médios, para o cálculo do volume das peças. Na Figura 4.19 apresenta-se uma das pesagens realizadas para os provetes.



Figura 4.19 – Pesagem dos provetes

A determinação da massa volúmica foi feita de acordo com a expressão:

$$\rho \left(\text{kg} / \text{m}^3 \right) = \frac{m}{V} \quad (4.6)$$

Durante a determinação da massa volúmica dos provetes, calculou-se este parâmetro para a madeira saturada (massa volúmica de ensaio) e para a madeira seca. Na Figura 4.20 apresenta-se o gráfico onde se pode verificar a distribuição de frequência relativa aos resultados obtidos para a massa volúmica da madeira saturada. Na Figura 4.21 apresenta-se o gráfico com a distribuição de frequência relativa à massa volúmica dos provetes secos.

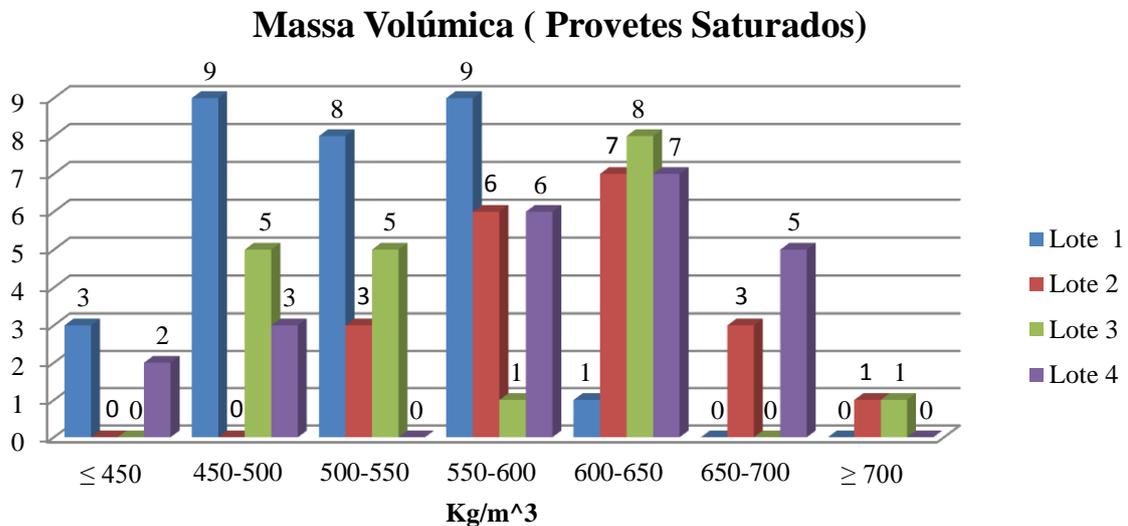


Figura 4.20 – Distribuição de frequência da massa volúmica dos provetes saturados

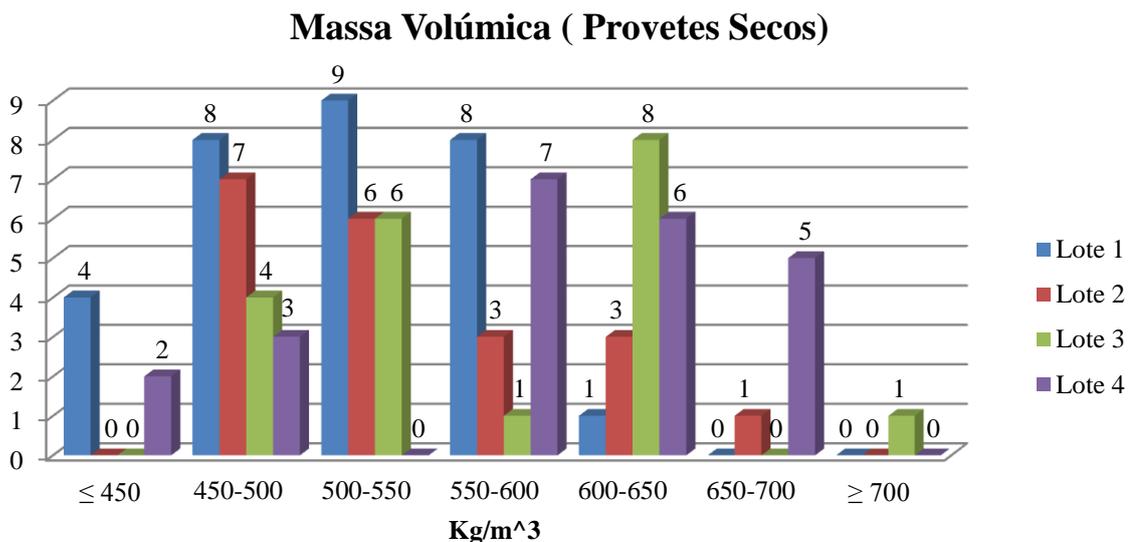


Figura 4.21 – Distribuição de frequência da massa volúmica dos provetes secos

As pequenas variações existentes nas massas volúmicas dos provetes saturados para os provetes secos surgem do facto de, durante a secagem dos provetes, o teor de água diminua, fazendo com que a massa também diminua. Consequentemente a massa volúmica também diminui.

4.6 Correção das propriedades mecânicas

A norma EN 384 (CEN, 2004) considera que os valores obtidos para as propriedades mecânicas devem ser ajustados, devido ao desfasamento existente entre o teor de água medido e a situação de referência de 12%. Segundo esta norma os fatores de correção aplicam-se ao módulo de elasticidade e à massa volúmica dos elementos em estudo.

Após realizada esta correção, foram determinados os valores médios e característicos dos diversos módulos de elasticidade calculados, da resistência à flexão, da massa volúmica e do teor de água, de acordo com a norma EN 384 (CEN, 2004). Os resultados são apresentados nos Quadros 4.5 (resultados por lote) e 4.6 (resultados relativos à amostra total).

Assim, segundo a EN 384 (CEN, 2004), a correção a aplicar aos resultados obtidos anteriormente do módulo de elasticidade e massa volúmica, de acordo com o teor de água de referência, 12%, é dado por:

$$E_0 (MPa) = E_{0,w} \left(1 + 0,02 (w_{provetete} - 12) \right) \quad (4.7)$$

$$\rho (kg / m^3) = \rho_w \left(1 - 0,005 (w_{provetete} - 12) \right) \quad (4.8)$$

A determinação das propriedades da amostra foram determinadas através de:

$$E_{0,mean} (MPa) = \frac{\sum E_i}{n} \times 1,3 - 2690 \quad (4.9)$$

$$E_{0,05} (MPa) = 0,67 E_{0,mean} \quad (4.10)$$

$$f_{m,k} (MPa) = f_{m,05} \times k_s \times k_v \quad (4.11)$$

$$\rho_k (kg / m^3) = (\rho_{mean} - 1,65s) \quad (4.12)$$

Foi ainda necessário, para seguir as indicações da EN 384 (CEN, 2004), aplicar uma nova correção, nos resultados da resistência à flexão pertencentes ao quinto percentil da amostra. Esta correção é dada por $1/(k_h \times k_l)$, estando relacionada com pequenos desvios entre a

geometria de ensaio preconizada na norma e a real (comprimento do vão, distância entre apoios e pontos de aplicação da carga). Os valores de k_h e k_l foram determinados a partir das seguintes expressões:

$$k_h = \left(\frac{150}{h} \right)^{0,2} \quad (4.13)$$

$$k_l = \left(\frac{l_e + 5a_{f_e}}{l_a + 5a_{f_e}} \right)^{0,2} \quad (4.14)$$

Os valores obtidos para as propriedades (resistência à flexão, f_m , módulo de elasticidade, E , teor de água, w , e massa volúmica, ρ) são apresentados nos Quadros 4.5 e 4.6.

Quadro 4.5 – Propriedades obtidas experimentalmente, por lote, para os elementos de madeira em estudo

Valor	f_m [MPa]	$E_{m,local}$ [MPa]	$E_{m,global}$ [MPa]	MTG	Acelerómetro	w [%]	ρ [kg/m ³]
				$E_{m,dyn}$ [MPa]	$E_{m,dyn}$ [MPa]		
Lote 1							
Médio	48,67	13728,98	12946,86	10219,13	10281,61	14,71	510,65
Característico	19,54	9198,41	8674,40	6846,82	6888,68	-	425,23
Mínimo	24,69	6679,90	7053,23	5594,00	5492,65	13,71	629,12
Máximo	76,73	19582,07	18822,77	14517,00	14830,00	15,54	408,23
Desvio Padrão	14,39	2965,27	2787,69	2253,60	2318,82	0,47	51,77
N	30	30	30	30	30	30	30
Lote 2							
Médio	75,26	18667,59	17673,92	15474,58	15595,99	14,86	595,99
Característico	41,09	12507,28	11841,53	10367,97	10449,31	-	502,56
Mínimo	52,18	9463,04	9412,37	9572,00	9741,83	14,52	705,03
Máximo	93,22	22090,93	21221,78	18416,00	18630,51	15,22	519,29
Desvio Padrão	11,79	3878,99	3304,24	2874,14	2870,76	0,21	56,62
N	30	30	30	30	30	30	30

Valor	f_m [MPa]	$E_{m,local}$ [MPa]	$E_{m,global}$ [MPa]	MTG	Acelerómetro	w [%]	ρ [kg/m ³]
				$E_{m,dyn}$ [MPa]	$E_{m,dyn}$ [MPa]		
Lote 3							
Médio	56,40	14131,52	14375,21	11800,78	12378,52	12,29	564,99
Característico	12,22	9468,12	9631,39	7906,52	8293,61	-	449,55
Mínimo	15,52	5895,38	7196,77	6522,00	6904,53	11,05	717,60
Máximo	107,30	21807,47	21726,09	17759,00	18616,47	13,73	471,99
Desvio Padrão	30,11	5206,14	5260,64	4128,77	4273,78	0,81	69,96
N	30	30	30	30	30	30	30
Lote 4							
Médio	60,23	15824,91	15809,40	13322,72	13648,49	13,17	582,96
Característico	14,75	10602,69	10592,30	8926,22	9144,49	-	450,98
Mínimo	17,77	5205,22	4785,25	6074,00	6086,17	12,18	693,19
Máximo	95,47	22638,27	20297,32	16948,00	17379,06	14,40	415,06
Desvio Padrão	23,92	4830,27	4815,09	3459,98	3591,59	0,59	79,99
N	30	30	30	30	30	30	30

Quadro 4.6 – Propriedades obtidas experimentalmente, correspondente a amostra total, para os elementos de madeira em estudo

Valor	f_m [MPa]	$E_{m,local}$ [MPa]	$E_{m,global}$ [MPa]	MTG	Acelerómetro	w [%]	ρ [kg/m ³]
				$E_{m,dyn}$ [MPa]	$E_{m,dyn}$ [MPa]		
Amostra Total							
Médio	58,97	15395,96	14978,54	12457,03	12708,10	13,84	558,57
Característico	18,11	10315,29	10035,63	8346,21	8514,43	-	438,92
Mínimo	15,52	5205,22	4785,25	5594,00	5492,65	11,05	717,60
Máximo	107,30	22638,27	21726,09	18416,00	18630,51	15,54	408,23
Desvio Padrão	22,67	4381,99	4224,21	3463,24	3550,69	1,18	72,52
N	93	93	93	93	93	93	93

5 ANÁLISE E COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

5.1 Introdução

Este capítulo tem como objetivo analisar e comparar os resultados obtidos durante a realização desta dissertação. Apresentar-se-ão as diversas correlações, simples e múltiplas, entre as diferentes propriedades e parâmetros avaliados. A análise efetuada teve como intenção principal determinar quais os parâmetros que, quando considerados, permitem obter uma melhor aproximação dos valores da resistência à flexão das peças de madeira.

A previsão das propriedades mecânicas é fundamental no processo de seleção dos elementos de madeira para fins estruturais. Se obtiverem boas relações entre a resistência à flexão e outras características visuais e mecânicas, será possível estimar a resistência de um elemento de madeira sem haver necessidade de realizar ensaios destrutivos. Como este tipo de ensaios implicam a utilização de vários recursos (físicos e financeiros), incapacitando a utilização dos elementos ensaiados, é de extrema importância adotar técnicas não destrutivas para estimar a resistência dos elementos, a partir de outras propriedades de mais fácil determinação, permitindo diminuições bastante significativas nos custos associados. Assim, estabelecer relações estatísticas entre a resistência à flexão dos elementos e as características visuais e mecânicas (obtidas sem recorrer a ensaios destrutivos), tem grande utilidade, uma vez que a caracterização visual e a realização de ensaios dinâmicos é relativamente rápida quando comparada com o processo de realização dos ensaios estáticos.

No Quadro 5.1 apresentam-se os limites considerados relativos às correlações utilizados no decorrer deste trabalho.

Correlação	r
Inexistente	$\leq 0,20$
Muito Baixa	0,2-0,4
Baixa	0,4-0,6
Média	0,6-0,8
Alta	$\geq 0,8$

Quadro 5.1 – Limites de correlações.

5.2 Comparação dos diferentes lotes de madeira serrada de Pinheiro Bravo

O Quadro 5.2 é um quadro resumo onde se apresenta os resultados médios obtidos para as propriedades mecânicas e físicas, determinadas ao longo deste estudo, correspondentes a cada lote de madeira de pinho bravo.

Lote	N	f_m [MPa]	$E_{m,local}$ [MPa]	$E_{m,global}$ [MPa]	MTG	Acelerómetro	w [%]	ρ [kg/m ³]
					$E_{m,dyn}$ [MPa]	$E_{m,dyn}$ [MPa]		
1	30	48,67	13728,98	12946,86	10219,13	10281,61	14,71	510,65
2	20	75,26	18667,59	17673,92	15474,58	15595,99	14,86	595,99
3	20	56,40	14131,52	14375,21	11800,78	12378,52	12,29	564,99
4	23	60,23	15824,91	15809,40	13322,72	13648,49	13,17	582,96

Quadro 5.2 – Comparação, por lote, entre as propriedades mecânicas e físicas médias

O Quadro 5.3 apresenta os resultados médios obtidos para as propriedades mecânicas e físicas, determinadas ao longo deste estudo, para a amostra de madeira de pinho bravo.

	N	f_m [MPa]	$E_{m,local}$ [MPa]	$E_{m,global}$ [MPa]	MTG	Acelerómetro	w [%]	ρ [kg/m ³]
					$E_{m,dyn}$ [MPa]	$E_{m,dyn}$ [MPa]		
Amostra	93	58,97	15395,96	14978,54	12457,03	12708,10	13,84	558,57

Quadro 5.3 – Comparação entre as propriedades mecânicas e físicas médias da amostra

Através da observação dos Quadros 5.2 e 5.3 verifica-se que, tipicamente, o $E_{m,global}$ é ligeiramente inferior a $E_{m,local}$. Como referido no subcapítulo 4.3.2, tal acontece devido ao facto de a medição do $E_{m,global}$ ter em consideração a totalidade da peça, o que faz com que os seus valores sejam consideravelmente afetados por defeitos, nomeadamente empenos, que diminuem ligeiramente os resultados obtidos. O $E_{m,local}$ apenas tem em consideração a zona central da peça, fazendo com que o número de defeitos existentes que afetam este parâmetro sejam consideravelmente inferiores, aumentando ligeiramente os resultados obtidos relativamente ao $E_{m,global}$.

Relativamente ao módulo de elasticidade dinâmico ($E_{m,dyn}$), os resultados obtidos utilizando o *Timber Grader* MTG foram ligeiramente inferiores aos obtidos utilizando o acelerómetro. Esta diferença deve-se ao facto de o *Timber Grader* MTG, contrariamente ao acelerómetro, ter em consideração o teor de água das peças, o que faz com que o módulo de elasticidade dinâmico diminua.

No que respeita à massa volúmica (ρ) dos elementos, verifica-se que os que apresentam uma massa volúmica mais elevada e mais baixa são, respetivamente, os que compõem o lote 2 e o lote 1. Esta diferença deve-se, provavelmente, ao facto da presença de lenho juvenil (apresenta uma massa volúmica consideravelmente inferior ao lenho adulto) nos elementos, diminuindo este parâmetro significativamente.

Em relação à resistência à flexão da madeira (f_m) verificou-se que esta apresenta uma relação inversamente proporcional com os defeitos da peça, diminuindo consideravelmente com a elevada presença destes. Devido ao facto do lote 2 ser composto por peças com menor número de defeitos que os restantes lotes, estas apresentam valores de resistência à flexão mais elevados.

5.3 Relações estatísticas entre características

5.3.1 Aspetos gerais

Neste subcapítulo apresentar-se-á e analisar-se-á todas as correlações efetuadas entre as características visuais e mecânicas verificadas no decorrer deste trabalho e a resistência à flexão dos elementos. Apenas se apresentam os gráficos, relativos às correlações simples, para aos parâmetros que efetivamente apresentam alguma correlação com a resistência à flexão da peça, visto que só esses é que se consideram relevantes para o presente estudo

Estas correlações foram obtidas para a amostra na sua totalidade, pois verificou-se que as correlações obtidas para cada lote eram muito próximas às obtidas para o total das peças, não havendo necessidade de realizar uma análise estatística por lote.

5.3.2 Propriedades visuais

As primeiras correlações efetuadas foram relativas às características (massa volúmica e medula), aos defeitos da madeira associados à sua estrutura (nós, inclinação do fio e bolsas de

resina), ao corte praticado (descaio) e às alterações da madeira (empenos e fendas) analisados no decorrer da classificação visual.

Na Figura 5.1 e 5.2 apresentam-se gráficos de dispersão onde se demonstram as correlações existente entre o KAR marginal e o KAR total, respectivamente, e a resistência à flexão (f_m) das peças.

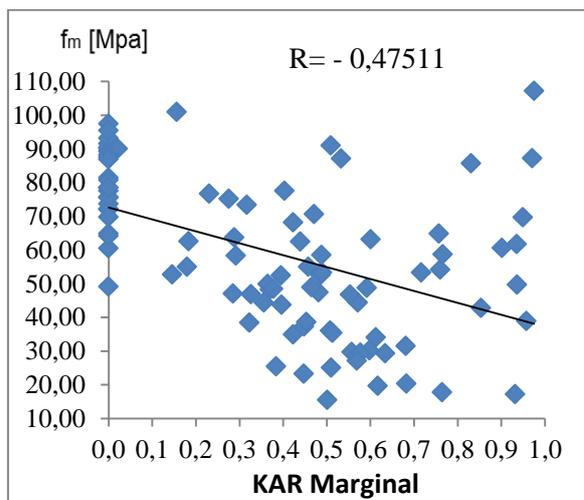


Figura 5.1 – Correlação entre o KAR Marginal e f_m [MPa]

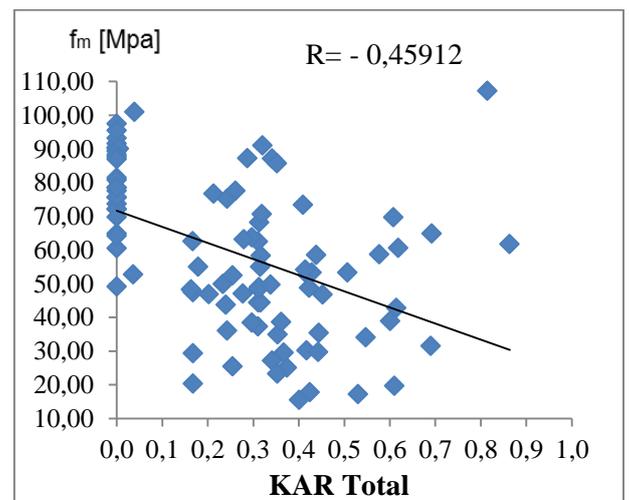


Figura 5.2 – Correlação entre o KAR Total e f_m [MPa]

Analisando a Figuras 5.1 verifica-se que a correlação existente entre o KAR marginal e a resistência à flexão das peças é uma correlação baixa, visto que o coeficiente de correlação, r , é de -0,48. Repetindo a mesma análise para a Figura 5.2 verifica-se que a correlação existente entre o KAR total e a resistência à flexão das peças é também considerada uma correlação baixa ($r = -0,46$). Por fim, fez-se uma correlação múltipla entre os KAR (marginal e total) e a resistência à flexão das peças, tendo-se obtido $r = -0,48$ (correlação baixa). Pode-se assim concluir que a correlação existente entre os nós e a resistência à flexão das peças é baixa.

Na Figura 5.3 apresenta-se um gráfico de dispersão onde se demonstra a correlação existente entre a inclinação do fio e a resistência à flexão (f_m) das peças. Através de observação desta figura verifica-se que a correlação existente entre a inclinação do fio e resistência a flexão da peça é muito baixa, apresentando um coeficiente de correlação de -0,33.

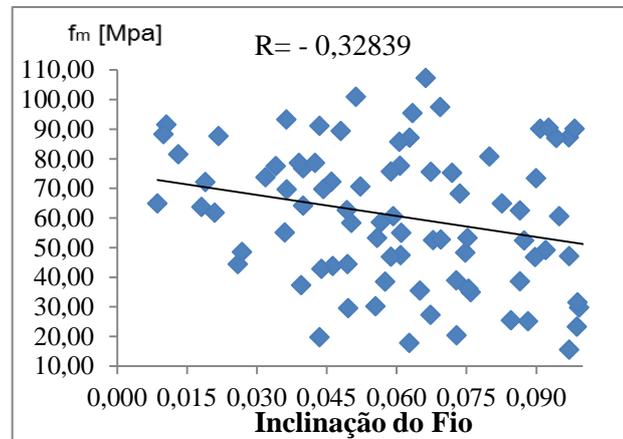


Figura 5.3 – Correlação entre a inclinação do fio e f_m [MPa]

Relativamente à inclinação do fio, foi ainda realizada uma correlação múltipla em que se comparou este parâmetro e os KAR (marginal e total) com a resistência à flexão das peças, tendo-se obtido um coeficiente de correlação igual a 0,53, correspondendo a uma correlação baixa.

Ao correlacionar a taxa de crescimento e a resistência à flexão (f_m) das peças, verificou-se não existir qualquer tipo de correlação entre estes parâmetros, visto apresentar um coeficiente de correlação de -0,17. Efetuaram-se ainda correlações múltiplas utilizando a taxa de crescimento, os KAR (marginal e total) e a inclinação do fio. Na correlação em que se comparou a taxa de crescimento e os KAR (total e marginal) com a resistência à flexão das peças, obteve-se $r = 0,57$, aumentando significativamente a correlação (correlação baixa). Relativamente à correlação realizada para comparar a taxa de crescimento e a inclinação do fio com a resistência à flexão das peças, concluiu-se que a correlação existente era muito baixa ($r = 0,37$). Pode-se assim concluir que a taxa de crescimento não é o parâmetro ideal para estimar a resistência à flexão das peças.

Ao correlacionar o comprimento das fendas com a resistência à flexão (f_m) das peças, verificou-se não existir qualquer correlação entre estes dois parâmetros, visto que o coeficiente de correlação é praticamente nulo ($r = 0,03$). Foram realizadas diversas correlações múltiplas em que se analisou, não só o comprimento das fendas, como também os KAR (marginal e total), a inclinação do fio e a taxa de crescimento, com o objetivo de obter correlações mais satisfatórias. Para a correlação em que se comparou o comprimento das

fendas e os KAR (marginal e total) com a resistência à flexão das peças, obteve-se $r = 0,49$ (correlação muito baixa). Para a correlação em que se comparou o comprimento das fendas e a inclinação do fio com a resistência à flexão das peças, obteve-se um coeficiente de correlação de 0,33, sendo considerada uma correlação muito baixa. Relativamente à comparação entre o comprimento das fendas e a taxa de crescimento com a resistência à flexão das peças, verificou-se que não havia qualquer correlação ($r = 0,17$). Ao analisar todas as correlações, simples e múltiplas, efetuadas utilizando o comprimento das fendas verifica-se que a relação entre este parâmetro e a resistência à flexão das peças é muito baixa, sendo praticamente nula. Pode, assim, concluir-se que o comprimento das fendas não é o parâmetro ideal para estimar a resistência à flexão das peças.

A mesma conclusão foi retirada da observação das correlações entre o comprimento das bolsas de resina e a resistência à flexão das peças. Para esta correlação obteve-se um coeficiente praticamente nulo ($r = 0,06$), verificando-se não existir qualquer tipo de relação entre estes dois parâmetros. Foram realizadas correlações múltiplas utilizando o comprimento das bolsas de resina e os restantes parâmetros referidos anteriormente. Para a correlação em que se comparou o comprimento das bolas de resina e os KAR (marginal e total) com a resistência à flexão das peças, obteve-se $r = 0,48$ (correlação muito baixa). Para a correlação em que se comparou o comprimento das bolas de resina e a inclinação do fio com a resistência à flexão das peças, obteve-se um coeficiente de correlação de 0,34, sendo considerada uma correlação muito baixa. Relativamente à comparação entre o comprimento das bolsas de resina e a taxa de crescimento com a resistência à flexão das peças, verificou-se que não havia qualquer tipo de correlação ($r = 0,18$). Finalmente, no que respeita à correlação em que se comparou o comprimento das bolsas de resina e o comprimento das fendas com a resistência à flexão, verificou-se que esta correlação era inexistente, visto o seu coeficiente de correlação ser praticamente nulo ($r = 0,06$).

Na Figura 5.4 apresenta-se a correlação obtida entre a presença de medula e a resistência à flexão (f_m) das peças. No decorrer do cálculo desta correlação atribui-se o valor 1 para as peças que continham medula na sua composição e o valor 0 para aquelas em que a medula não se encontrava presente. Analisando o gráfico de dispersão obtido para esta correlação, verifica-se que a correlação existente é baixa ($r = -0,58$), estando, no entanto, muito próxima de uma correlação média ($r \geq 60$).

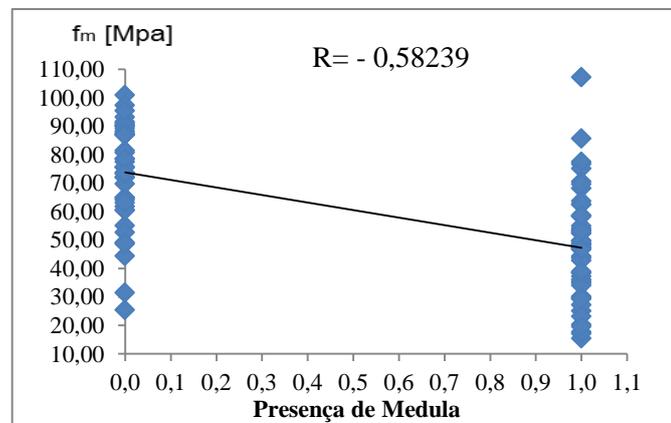


Figura 5.4 – Correlação entre a presença de medula e f_m [MPa]

Tal como para os parâmetros anteriormente analisados, foram realizadas correlações múltiplas que se utilizaram, não só a presença da medula nas peças, como também os diversos parâmetros relativos à classificação visual anteriormente descritos. Para a correlação em que se comparou a presença de medula e os KAR (marginal e total) com a resistência à flexão das peças, obteve-se $r = 0,61$ (correlação média). Para a correlação em que se comparou a presença de medula e a inclinação do fio com a resistência à flexão das peças, obteve-se um coeficiente de correlação de 0,61, sendo considerada uma correlação média. Para a correlação em que se comparou a presença de medula e a taxa de crescimento com a resistência à flexão das peças, obteve-se um coeficiente de correlação de 0,64, isto é, uma correlação média. Para a correlação em que se comparou a presença de medula e o comprimento das fendas com a resistência à flexão das peças, obteve-se um coeficiente de correlação de 0,62 (correlação média). Por fim, relativamente à correlação em que se comparou a presença de medula e o comprimento das bolsas de resina com a resistência à flexão das peças, obteve-se um coeficiente de correlação de 0,58 (correlação baixa). Através da análise dos resultados obtidos pode-se afirmar que a presença de medula é um parâmetro que se pode ter em consideração quando se pretende realizar uma estimativa da resistência à flexão das peças.

Relativamente às alterações da madeira (empenos) e ao corte praticado (descaio) não se fizeram correlações simples, devido ao facto de existirem três tipos de empenos (de arco de face, de arco de canto e hélice) e dois tipos de descaio (de canto e de face). Assim sendo, relativamente à correlação existente entre os empenos e a resistência à flexão das peças, obteve-se um coeficiente de correlação de 0,46 (correlação baixa); relativamente à correlação existente entre o descaio e a resistência à flexão das peças, verificou-se que não existia qualquer tipo de correlação entre estes dois parâmetros ($r = 0,18$).

No Quadro 5.4 e 5.5 apresentam-se os valores obtidos para as diversas correlações múltiplas realizadas utilizando, respetivamente, os empenos e o descaio conjugados com as restantes características visuais analisadas.

Quadro 5.4 – Correlações múltiplas utilizando os empenos

Modelo	f_m	Empenos	KAR (marginal e total)	Inc. do fio	Taxa de crescimento	Comp. Fendas	Comprimento Bolsas de Resina	Medula
	r							
1	0,46	x						
2	0,73	x	x					
3	0,68	x		x				
4	0,69	x			x			
5	0,69	x				x		
6	0,68	x					x	
7	0,73	x						x

Avaliando o Quadro 5.4 verifica-se que apenas a correlação número um (correlação relativa à comparação entre os empenos e a resistência à flexão das peças) é uma correlação baixa, sendo as restantes correlações consideradas como correlações médias. Através da análise dos resultados obtidos, pode-se afirmar que os empenos é um parâmetro a ter em consideração quando se pretende realizar uma estimativa da resistência à flexão das peças.

Quadro 5.5 – Correlações múltiplas utilizando o descaio

Modelo	f_m	Descaio	KAR (marginal e total)	Inc. do fio	Taxa de crescimento	Comp. Fendas	Comp. Bolsas de Resina	Medula	Empenos
	r								
1	0,18	x							
2	0,50	x	x						
3	0,38	x		x					
4	0,24	x			x				
5	0,19	x				x			
6	0,19	x					x		
7	0,58	x						x	
8	0,70	x							x

Avaliando o Quadro 5.5 verifica-se, através de uma análise cuidada, que as correlações dos modelos 1, 5 e 6 são praticamente inexistentes, as correlações dos modelos 3 e 4 são muito baixas, as correlações dos modelos 2 e 7 são baixas e, por último, a correlação do modelo 8 é uma correlação média. Conclui-se então que a avaliação do descaio não permite uma estimativa fiável da resistência à flexão das peças.

Por fim, realizou-se uma correlação múltipla onde se comparou todas as características visuais analisadas com a resistência à flexão das peças. Para esta correlação obteve-se um coeficiente de correlação de 0,81 (correlação alta), verificando-se que é possível obter uma boa estimativa da resistência à flexão das peças através da análise de todas as características visuais previstas na prEN 1310 (CEN, 1995).

5.3.3 Módulo de elasticidade dinâmico

As correlações efetuadas entre o módulo de elasticidade dinâmico e a resistência à flexão das peças tiveram em conta os resultados obtidos através da utilização do *Timber Grader* MTG e do Acelerómetro. Nas Figuras 5.5 e 5.6 apresentam-se as correlações entre o módulo de elasticidade dinâmico, obtido, respetivamente, através do *Timber Grader* MTG ($E_{m,dyn}MTG$) e do acelerómetro ($E_{m,dyn}Acelerómetro$), e a resistência à flexão (f_m) das peças. Através da análise destes dois gráficos, verifica-se que, como seria de esperar, as correlações obtidas entre o $E_{m,dyn}MTG$ e f_m ($r=0,87$) e entre $E_{m,dyn}Acelerómetro$ e f_m ($r=0,86$) são muito próximas, sendo consideradas como correlações altas.

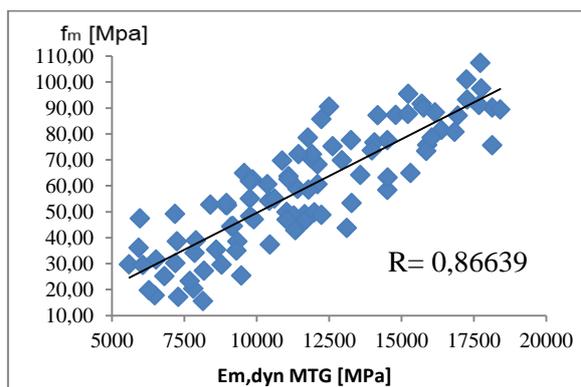


Figura 5.5 – Correlação entre $E_{m,dyn}MTG$ [MPa] e f_m [MPa]

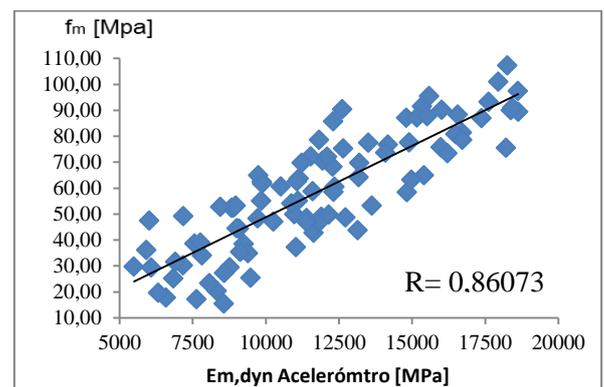


Figura 5.6 – Correlação entre $E_{m,dyn}MTG$ [MPa] e f_m [MPa]

A correlação múltipla obtida comparando os valores dos dois módulos de elasticidade dinâmicos com a resistência à flexão das peças é também uma correlação alta ($r = 0,87$), sendo muito próxima das correlações simples descritas nas Figuras 5.5 e 5.9. No Quadro 5.6 apresentam-se as correlações múltiplas efetuadas, utilizando os dois módulos de elasticidade dinâmicos e também as características visuais analisadas isoladamente e em conjunto.

Quadro 5.6 – Correlações múltiplas utilizando o $E_{m,dyn}$

Modelo	f_m	$E_{m,dyn}$	$E_{m,dyn}$	KAR	Inc. do fio	Taxa de Cresc.	Comp. Fendas	Comp. Bolsas de Resina	Medula	Empenos	Descaio
	r	MTG	Acel.								
1	0,87	x		x							
2	0,87	x			x						
3	0,87	x				x					
4	0,87	x					x				
5	0,87	x						x			
6	0,88	x							x		
7	0,89	x								x	
8	0,87	x									x
9	0,91	x		x	x	x	x	x	x	x	x
10	0,87		x	x							
11	0,87		x		x						
12	0,87		x			x					
13	0,86		x				x				
14	0,86		x					x			
15	0,87		x						x		
16	0,89		x							x	
17	0,87		x								x
18	0,91		x	x	x	x	x	x	x	x	x

Analisando o Quadro 5.6 verifica-se que coeficiente de correlação aumenta ligeiramente quando, para além da análise do módulo de elasticidade dinâmico, se analisam as características visuais dos elementos, isoladamente ou em conjunto. Todos os resultados obtidos, para as diferentes modelos, apresentaram correlações altas ($r \geq 80$).

5.3.4 Módulo de elasticidade estático

Relativamente ao módulo de elasticidade estático (local e global) realizaram-se correlações simples em que se comparou este parâmetro com a resistência à flexão das peças. Nas Figuras 5.7 e 5.8 apresentam-se estas correlações, verificando-se que as correlações entre o módulo de elasticidade local ($E_{m,local}$) e a resistência à flexão das peças e entre o módulo de elasticidade global ($E_{m,global}$) e a resistência à flexão (f_m) das peças são muito próximas, e consideradas correlações altas.

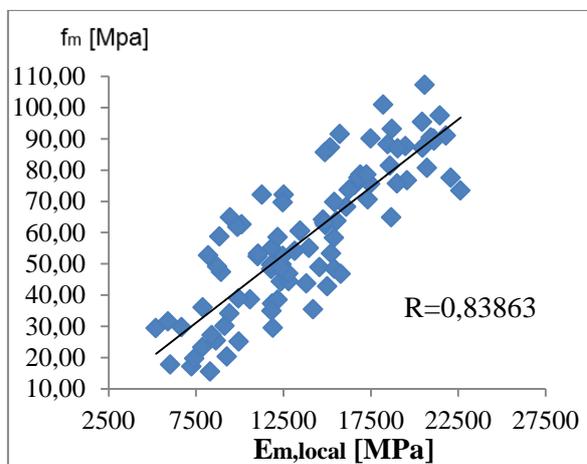


Figura 5.7 – Correlação entre $E_{m,local}$ [MPa] e f_m [MPa]

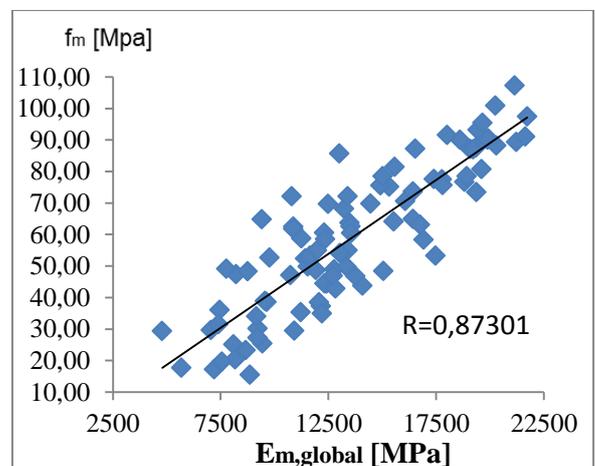


Figura 5.8 – Correlação entre $E_{m,global}$ [MPa] e f_m [MPa]

A correlação múltipla obtida, comparando o módulo de elasticidade local e global com a resistência à flexão das peças, é, como seria de esperar ao observar as correlações descritas nas Figuras 5.7 e 5.8, uma correlação alta ($r=0,87$). No Quadro 5.7 apresentam-se as correlações múltiplas efetuadas, utilizando os dois módulos de elasticidade estáticos, os módulos de elasticidade dinâmicos e as características visuais analisadas em conjunto.

Quadro 5.7 – Correlações múltiplas utilizando o E

Modelo	f_m	$E_{m,local}$	$E_{m,global}$	$E_{m,dyn}$ MTG	$E_{m,dyn}$ Acel.	KAR (marginal e total); Inclinação do Fio; Taxa de Crescimento; Comprimento das Fendas; Comprimento das Bolsas de Resina; Medula; Empenos; Descaio
	r					
1	0,87	x	x			
2	0,88	x		x		
3	0,88	x			x	
4	0,88	x		x	x	
5	0,91	x		x		x
6	0,91	x			x	x
7	0,90	x				x
8	0,91	x		x	x	x
9	0,89		x	x		
10	0,88		x		x	
11	0,89		x	x	x	
12	0,92		x	x		x
13	0,92		x		x	x
14	0,91		x			x
15	0,92		x	x	x	x
16	0,89	x	x	x	x	
17	0,92	x	x	x	x	x

Analisando o Quadro 5.7 verifica-se que o coeficiente de correlação aumenta ligeiramente quando, para além da análise do módulo de elasticidade estático, se analisam o módulo de elasticidade dinâmico e as características visuais dos elementos. Todas as correlações efetuados utilizando o $E_{m,local}$ ou o $E_{m,global}$ foram correlações altas ($r \geq 80$).

5.3.5 Massa volúmica

A massa volúmica (ρ) foi também correlacionada com a resistência à flexão da peça. Na Figura 5.9 apresenta-se um gráfico de dispersão onde se correlaciona este parâmetro com a

resistência à flexão (f_m) das peças. Observando este gráfico verifica-se que o coeficiente de correlação é de 0,70, correspondendo a uma correlação média.

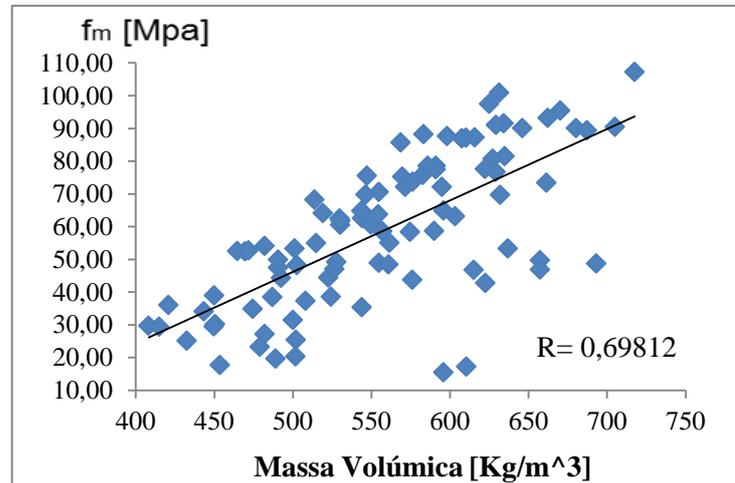


Figura 5.9 – Correlação entre a massa volúmica [kg/m^3] e f_m [MPa]

Por fim, fez-se uma correlação em que se comparou todos os parâmetros analisados durante este estudo com a resistência à flexão das peças, tendo-se obtido um coeficiente de correlação de 0.92, correspondendo a uma correlação alta.

6 CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

Este trabalho teve como principal objetivo avaliar visualmente, e através de ensaios experimentais (destrutivos e não-destrutivos) uma amostra composta por 93 peças de madeira de pinho bravo, divididas em 4 lotes distintos. No decorrer desta dissertação determinaram-se propriedades visuais (KAR marginal e total, inclinação do Fio, taxa de crescimento, fendas, bolsas de resina, presença de medula, empenos e descaio), físicas (teor de água e massa volúmica) e mecânicas (módulos de elasticidade e resistência à flexão). Depois de determinados todos os parâmetros, procedeu-se ao cálculo de diversas correlações (simples e múltiplas) com o objetivo de determinar quais os parâmetros que apresentam uma melhor aproximação dos valores da resistência à flexão das peças de madeira.

A classificação visual foi realizada de acordo com a norma europeia prEN 1310 (CEN, 1995), sendo complementada com a norma portuguesa NP 4305 (LNEC, 1995). O objetivo desta classificação e caracterização visual foi a realização de uma apreciação das características, dos defeitos da madeira associados à sua estrutura, do processamento e das alterações desta, agrupando as peças em estudo em duas classes de qualidade: E e EE. Procedendo a esta classificação visual, verificou-se que a maioria das peças (79), segundo a NP 4305 (LNEC, 1995), eram rejeitadas, sendo as restantes de classe E (12) e EE (2). Analisando estes resultados concluiu-se que os parâmetros com mais influência nas classes das peças obtidas foram os empenos e os comprimentos de fendas dado que apresentaram valores muito elevados, estando ambos intimamente relacionados com o processamento do material.

Ainda relativamente às propriedades visuais analisadas, foram realizadas várias correlações entre estas propriedades e a resistência à flexão das peças. Através da análise dos resultados obtidos verificou-se que as propriedades visuais, quando analisadas isoladamente, não apresentam boas correlações com a resistência à flexão da madeira. O KAR marginal, o KAR total, os empenos e a presença de medula foram as propriedades que apresentaram melhor correlação com a resistência à flexão das peças, apresentado um coeficiente de correlação de 0,48, 0,46, 0,46 e 0,58, respetivamente. A taxa de crescimento ($r = -0,17$), o comprimento das fendas ($r = 0,03$), o comprimento das bolsas de resina ($r = 0,06$) e o descaio ($r = 0,18$) foram propriedades que não apresentaram qualquer correlação com a resistência à flexão das peças, sendo por isso propriedades pouco ou nada relevantes para estimar este parâmetro. Analisando todas as propriedades visuais e comparando-as com a resistência à flexão das peças, através de uma correlação múltipla, obteve-se um coeficiente de correlação de 0,81, um

resultado considerado bastante satisfatório. Pode, assim, concluir-se que as propriedades visuais, quando analisadas em conjunto, são uma ferramenta bastante válida para estimar a resistência à flexão das peças.

A determinação do módulo de elasticidade dinâmico das peças foi realizada recorrendo a ensaios de vibração longitudinal (não-destrutivos). Para isto realizaram-se dois tipos de ensaios de vibração longitudinal, um recorrendo ao *Timber Grader* MTG e o outro utilizando o Acelerómetro. Este parâmetro apresentou correlações muito boas com a resistência à flexão das peças. A correlação obtida entre o módulo de elasticidade dinâmico determinado através do *Timber Grader* MTG e a resistência à flexão da peça foi uma correlação alta ($r = 0,87$), tal como a obtida entre o módulo de elasticidade dinâmico determinado através do acelerómetro e a resistência à flexão da peça ($r = 0,86$). Estes coeficientes de correlação são bastante próximos, visto que os valores do módulo de elasticidade também o são. Verificou-se, ainda, que ao juntar os módulos de elasticidade dinâmicos e as propriedades visuais das peças, correlacionando-os com a resistência à flexão destas, o coeficiente de correlação aumentava ligeiramente ($r = 0,91$). Conclui-se, então, que o módulo de elasticidade é um parâmetro que permite estimar a resistência à flexão de uma peça com grande precisão.

O módulo de elasticidade estático global e local foi determinado de acordo com as indicações da EN 408 (CEN, 2012). Analisando os resultados obtidos verificou-se que os valores obtidos para módulo de elasticidade global são ligeiramente inferiores aos obtidos para o módulo de elasticidade local. Esta ligeira diferença deve-se ao facto de a avaliação do módulo de elasticidade global considerar a peça na sua totalidade, o que faz com que o número de defeitos existentes na avaliação deste parâmetro seja superior aos defeitos existente na determinação do módulo de elasticidade local (apenas considera a região central da peça).

O módulo de elasticidade estático apresentou boas correlações com a resistência à flexão das peças. A correlação obtida entre o módulo de elasticidade local e a resistência à flexão da peça foi uma correlação alta ($r = 0,84$), tal como a obtida entre o módulo de elasticidade global e a resistência à flexão da peça ($r = 0,87$). As correlações melhoraram quando, para além dos módulos de elasticidade estáticos, se analisaram os módulos de elasticidade dinâmicos e as propriedades visuais das peças correlacionando estes parâmetros com a resistência à flexão ($r = 0,92$). Conclui-se então que o módulo de elasticidade estático é um parâmetro que permite estimar com precisão a resistência à flexão de uma peça.

A resistência à flexão da peça foi determinada, através de ensaios destrutivos de acordo com a EN 408 (CEN, 2012). Ao analisar os resultados obtidos verificou-se que as peças com maior número de defeitos na sua constituição, apresentavam, geralmente, uma resistência à flexão mais baixa.

Pode-se então afirmar que a classificação visual (utilizando todas as propriedades visuais em simultâneo) e os ensaios dinâmicos são métodos, não-destrutivos, bastante aceitáveis, para estimar a resistência à flexão dos elementos de madeira. Estes métodos são significativamente mais rápidos de realizar e apresentam custos bastantes inferiores em comparação com os ensaios estáticos. Os ensaios estáticos para a determinação do módulo de elasticidade são também bons indicadores da resistência à flexão da peça, no entanto, os elevados custos e os diversos recursos físicos associados são fatores que prejudicam a sua frequente utilização.

6.1 Trabalho futuro

Para um trabalho futuro seria importante alargar a amostra com o objetivo de obter uma maior fiabilidade nos resultados. A amostra utilizada deveria ser mais representativa das classes de qualidade previstas na NP 4305 (LNEC, 1995), apresentando um maior número de elementos pertencentes às classes E e EE.

Devido ao facto dos ensaios estáticos (destrutivos e não-destrutivos) implicarem esquemas de ensaio bastante complexo, com custos elevados, seria interessante estudar outros métodos não-destrutivos que permitam estimar a resistência à flexão das peças. Métodos não-destrutivos, como os ultra-sons e esforços mecânicos, poderão ser métodos eficazes e alternativos aos métodos de vibração longitudinal realizados no decorrer deste estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bell, E. R., Peck, E. C. e Krueger, N. T. (1954). "Modulus of elasticity of wood determined by dynamic methods." USDA Forest Service.

Carreira, M. R., Cheung, A. B., Oliveira, F. G. R., Dias, A. A., Jr., C. C., Sales, A. e Stamato, G. C. (2003). Avaliação de Técnicas Não-Destrutivas Aplicadas à Madeira de *Pinus sp.* III Pan American for Nondestructive Testing Brasil

CEN (1995). Round and sawn timber - Method of measurement of features. prEN 1310. Comité Européen de Normalization.

CEN (2004). Structural Timber - Determination of Characteristic Values of Mechanical Properties and Density. EN 384. Comité Européen de Normalization.

CEN (2012). Timber Structures - Structural Timber and Glued Laminated Timber - Determination of some Physical and Mechanical Properties. EN 408. Comité Européen de Normalization.

Cruz, H., Nunes, L. e Machado, J. (1998). "Update Assessment of Portuguese Maritime Pine Timber." Forest Products Journal.

Feio, A. O., Machado, J. e Lourenço, P. B. (2004). Caracterização da Resistência da Madeira de Castanho à Tração Paralela ao Fio. Congresso Ibérico: A madeira na Construção. Guimarães, Portugal.

Glos, P. (1995). Strength Grading, Centrum Hout, Holanda.

Gonçalves, C. N. P. (2010). Contributos para uma Maior e Melhor Utilização da Madeira de Pinho Bravo em Portugal. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

Íñiguez, G., Arriaga, F., Bobadilla, I. e Esteban, M. (2008). "Grading by Non-Destructive Techniques and Assessment of the Mechanical Properties of Large Cross Section Coniferous Sawn Timber for Structural Use."

IPQ (1973). Madeiras - Determinação do teor em água". NP 614. Instituto Português da Qualidade

ISO (1975). Bois – Détermination de la Résistance à la Flexion Statique. ISO 3133. International Organization for Standardization.

Kawamoto, S. e Williams, R. S. (2002). "Acoustic Emission and Acousto-Ultrasonic Techniques for Wood and Wood- Based Composites: a review." United States Departement of Agriculture.

Larsen, H. J. (2001). Properties Affecting Reliability Design of Timber Structures. Seminar on Reliability of Timber Structures. Coimbra, Portugal

LNEC (1995). Madeira Serrada de Pinheiro Bravo para Estruturas. NP 4305.

LNEC (1997). Madeira para construção - Pinha bravo para estruturas M2, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal.

Machado, J. e Palma, P. (2011). Non-Destructive Evaluation of the Bending Behaviour of In-Service Pine Timber Structural Elements. Materials and Structures.

Machado, J. S. (2004). "Produtos de Madeira Maciça para a Construção. Desafios de Qualidade."

Malik, S. A., Al-Mattarneh, H. M. A. e Nuruddin, M. F. (2002). Review of Nondestructive Testing and Evaluation on Timber, Wood and Wood Product. World Conference on Timber Engineering. Malásia.

Mohamad, W., Ahmad, Z., Eng, T. Y. e Jalil, A. (2012). Bending Strength of Gulam from Selected Malaysian Hardwood Timber. World Conference on Timber Engineering. Auckland, New Zealand.

Morgado, T. (2012). Classificação e Aplicação Estrutural de Madeira de Secção Circular de Pinheiro Bravo. Departamento de Engenharia Civil, Coimbra.

Morgado, T., Machado, J., Dias, A., Cruz, H. e Rodrigues, J. (2010). Grading and Testing of Maritime Pine Roundwood. World Conference on Timber Engineering. Trentino, Itália.

Nguyen, M. N., Leicester, R. H., Seath, C. A. e Foliente, G. C. (2002). Algorithms for Stress Grading Timber Using Microwave Scanners. World Conference on Timber Engineering. Malásia

Pinto, I. (2004). Raw Material Characteristics of Maritime Pine (*Pinus pinaster* Ait.) and their Influence on Simulated Sawing Yield. Department of Forest Products Technology. Helsínquia, Helsinki University of Technology.

Ravenshorst, G. J. P. e Kuilen, J. W. G. (2009). Relationships Between Local, Global and Dynamic Modulus of Elasticity for Soft and Hardwoods. International Council for Research and Innovation in Building and Construction. Dübendorf, Switzerland.

USDA Forest Service. Forest Products Laboratory (USDA). 1999. Wood Handbook: "Wood as an Engineering Material". Forest Prod. Soc., Madison, WI, USA.

Vries, P., Gard, W. F. e Schuch, R. (2006). "Development of a strength grading system of small diameter round wood."