



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

# **Caracterização do Eucalipto globulus para aplicação estrutural**

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

Autor

**Maria João Ribeiro Martins**

Orientador

**Alfredo Manuel Pereira Geraldes Dias**

Coorientador

**André Filipe Silva Marques**

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

**Coimbra, Julho, 2015**

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Professor Doutor Alfredo Dias, pelo acompanhamento do trabalho, pela paciência, pela disponibilidade e pela exigência.

Ao André Marques, pela disponibilidade, pela ajuda, pela partilha de conhecimento e por todo o contributo prestado no decorrer do trabalho.

Ao Carlos Martins, pelo apoio, pela partilha de conhecimento e por toda a ajuda prestada.

À minha irmã Ana, por toda a ajuda prestada, pelo amor incondicional, pela preocupação. Por ser a melhor pessoa que conheço, por toda amizade que existe entre nós e por ser o meu orgulho.

Aos meus pais, pela confiança, por todos os ensinamentos, pelo apoio e dedicação prestados ao longo destes anos.

Ao Tiago, por ser o braço direito, pelo apoio, por melhorar o meu dia-a-dia e por todo o carinho.

## RESUMO

A presente dissertação constitui uma análise realizada a elementos de madeira maciça de *Eucalypto globulus* com o intuito de estudar os processos e parâmetros que resultam de uma classificação visual e mecânica neste tipo de madeira. Durante o processo de investigação em causa a caracterização da madeira passou por várias etapas, decorrentes de diferentes processos de classificação.

Numa primeira fase procedeu-se à classificação visual da amostra da madeira em estudo, composta por 50 elementos, de acordo com o descrito na norma europeia prEN1310 (CEN, 1995), e tendo em conta todos os aspetos visuais importantes na sua caracterização. Para a classificação visual recorreu-se ao preconizado pela norma europeia EN 14081-1 (CEN, 2005), onde estão estabelecidos os requisitos mínimos.

Na segunda fase realizaram-se ensaios não destrutivos dinâmicos, com o objetivo de obter uma classificação dinâmica. Estes ensaios tiveram como foco principal a obtenção dos valores referentes ao módulo de elasticidade dinâmico do material, ou seja, as propriedades de flexão que a madeira em estudo viria a demonstrar. Para a determinação desta propriedade recorreu-se ao método de vibração longitudinal através do uso do aparelho comercial *Timber Grader* MTG e do Acelerómetro laboratorial.

Numa terceira fase recorreu-se a ensaios estáticos, destrutivos e não destrutivos. Nos ensaios não destrutivos foram determinados os módulos de elasticidade estáticos. Os ensaios destrutivos, por sua vez, tiveram como objetivo a determinação da capacidade de resistência à flexão do material em causa. Os ensaios estáticos foram executados segundo o descrito na norma europeia EN 408 (CEN, 2012).

Após o apuramento de todos os resultados obtidos o trabalho evoluiu para a análise e comparação dos dados, de acordo com todos os parâmetros e por forma a garantir que fosse possível estimar a resistência dos elementos. A análise e comparação dos resultados foi realizada recorrendo a correlações (simples e múltiplas), de forma a estimar quais os parâmetros e características que melhor descrevem a resistência à flexão das peças estudadas.

## ABSTRACT

The present dissertation constitutes an analysis on *Eucalyptus globulus* solid wooden elements, in order to study the processes and parameters that derive from a visual and mechanical classification of this type of timber. During the process of investigation at issue, the characterization of wood went through several stages, due to different classification processes.

The first step involved the visual classification of the wood sample under study, composed of 50 elements, according to what is described in European standard prEN1310 (CEN, 1995), taking into account all important visual aspects in its characterization. The visual classification resorted to the recommended in the European standard EN 14081-1 (CEN, 2005), where the minimum requirements are established.

During the second step destructive dynamic tests were conducted in order to get a dynamic classification. These trials' main goal was to obtain values relating to the module of the dynamic elasticity of the material, i.e. the bending properties that the wood sample shows. For the determination of this property the longitudinal vibration method was used, through the commercial unit Timber Grader MTG and laboratory Accelerometer.

The third phase resorted to static trials, both destructive and non-destructive. In the non-destructive trials static elasticity modules were determined. In turn, the destructive test aimed at determining the resilience to bending of the material concerned. The static tests were performed under the procedures described in the European Standard EN 408 (CEN, 2012).

After the determination of all the results, the work progressed to the analysis and comparison of the data in accordance with all the parameters in order to ensure the reliability of the elements' resistance estimations. The analysis and comparison of the results were performed using simple and multiple correlations, to estimate which parameters and characteristics best describe the bending resistance of the studied parts.

## ÍNDICE

AGRADECIMENTOS .....	i
RESUMO .....	ii
ABSTRACT .....	iii
ÍNDICE.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS .....	vi
ÍNDICE DE QUADROS .....	viii
SIMBOLOGIA .....	x
1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	1
1.1 Introdução .....	1
1.2 Objetivos.....	1
1.3 Organização da dissertação.....	2
2 ESTADO DE ARTE.....	4
2.1 Introdução .....	4
2.2 A Madeira de <i>Eucalypto globulus</i> .....	4
2.3 Enquadramento Normativo .....	5
2.4 Classificação Visual.....	6
2.5 Ensaio não destrutivo.....	8
2.5.1 Vibração.....	9
2.5.2 Ultra-sons .....	10
2.5.3 Ensaio mecânico não destrutivo .....	10
2.5.4 Ensaio mecânico destrutivo .....	11
2.6 Estudos realizados em madeira de <i>Eucalypto</i> .....	13
3 MATERIAL .....	20
3.1 Introdução .....	20
3.2 Amostra analisada.....	20
3.3 Caracterização Visual da amostra.....	21
3.3.1 Introdução.....	21
3.3.2 Nós.....	21
3.3.3 Bolsas de Resina (Kino) .....	23
3.3.4 Fio.....	24
3.3.5 Taxa de Crescimento .....	26

---

3.3.6	Casca Inclusa .....	27
3.3.7	Descaio .....	27
3.3.8	Fissuras .....	29
3.3.9	Empenos .....	30
3.4	Classificação visual da amostra .....	31
4	ENSAIOS EXPERIMENTAIS .....	33
4.1	Introdução .....	33
4.2	Ensaio dinâmico.....	33
4.2.1	Introdução.....	33
4.2.2	Timber Grader MTG .....	33
4.2.3	Acelerómetro .....	36
4.3	Comparação dos resultados .....	38
4.4	Ensaio estático .....	39
4.4.1	Módulo de elasticidade dinâmico .....	39
4.4.2	Resistência à flexão .....	42
4.5	Teor de água.....	45
4.6	Massa Volúmica .....	47
4.7	Valores Característicos das Propriedades Mecânicas .....	49
5	AVALIAÇÃO E COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS .....	51
5.1	Introdução .....	51
5.2	Comparação dos Resultados .....	51
5.3	Relações estatísticas entre propriedades .....	53
5.3.1	Introdução.....	53
5.3.2	Características Visuais.....	53
5.3.3	Módulo de elasticidade dinâmico .....	57
5.3.4	Módulo de elasticidade estático.....	58
5.3.5	Correlações simples .....	60
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	62
6.1	Conclusão.....	62
6.2	Trabalho futuro .....	64
7	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	66

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Esquema de relação entre normas	6
Figura 2.2- Esquema de funcionamento da máquina MSR (Carreira, 2003)	11
Figura 2.3- Ensaio para a medição do módulo de elasticidade local (CEN, 2012)	12
Figura 2.4- Ensaio para medição do módulo de elasticidade global (CEN, 2012)	12
Figura 2.5- Comparação da resistência à flexão e módulo de elasticidade (Bermúdez Alvite, 2002)	15
Figura 2.6- Propriedades do Choupo (G. Castro, 2003)	17
Figura 2.7- Propriedades do Eucalipto (G. Castro, 2003)	17
Figura 3.1- Nó redondo e nó oval (CEN, 1995)	22
Figura 3.2- Nó <i>Spike</i> e nó <i>splay</i> (CEN, 1995)	22
Figura 3.3- Nó <i>Arris</i> (CEN, 1995)	22
Figura 3.6 – Presença de Kino	24
Figura 3.7- Riscador e modo de utilização (CEN, 1995)	25
Figura 3.8- Medição da inclinação do fio (CEN, 1995)	26
Figura 3.9- Descaio (CEN, 1995)	28
Figura 3.10- Empeno em arco de face e empeno em arco de canto (CEN, 1995)	30
Figura 3.11- Empeno em meia-cana e empeno em hélice (CEN, 1995)	30
Figura 4.1- Equipamento <i>Timber Grader</i> MTG	34
Figura 4.2- Equipamento para medição do teor de água	35
Figura 4.3- Teor de água (%)	35
Figura 4.5 – Comparação dos módulos de elasticidade dinâmicos ( $E_{m,dym}$ ) (GPa)	38
Figura 4.6 – Esquema de ensaio para a determinação de $E_{m,local}$ e de $E_{m,global}$	39
Figura 4.7 – Esquema de colocação dos defletómetros	40
Figura 4.8- Distribuição de frequência do módulo de elasticidade estático local (GPa)	41
Figura 4.9 – Distribuição de frequência do módulo de elasticidade estático global (GPa)	41
Figura 4.10 – Esquema de ensaio para a medição da resistência à flexão (CEN, 2012)	42
Figura 4.11 – Ensaio para determinação da resistência à flexão, $f_m$	43
Figura 4.12 – Distribuição de frequência da resistência à flexão, $f_m$	44
Figura 4.13 – Zona de compressão	44

---

Figura 4.14 – Esquema de corte do provete de madeira para determinação do teor de água (CEN, 2002a)	45
Figura 4.15 – Distribuição de frequência do teor de água dos provetes secos	46
Figura 4.16 – Pesagem de um provete	47
Figura 4.17 – Distribuição de frequência da massa volúmica a 12%	48
Figura 5.1 – Gráfico de dispersão da relação entre Nós [mm] e $f_m$ [MPa]	54
Figura 5.2 – Gráfico de dispersão da relação entre inclinação do fio [%] e $f_m$ [MPa]	55
Figura 5.3- Gráfico de dispersão entre as fissuras [mm] e $f_m$ [MPa]	55
Figura 5.4 – Gráfico de dispersão entre $E_{m,dym}$ MTG [MPa] e $f_m$ [MPa]	57
Figura 5.5 – Gráfico de dispersão entre $E_{m,dym}$ Acelerómetro [MPa] e $f_m$ [MPa]	57
Figura 5.6 – Gráfico de dispersão entre $E_{m,local}$ [MPa] e $f_m$ [MPa]	59
Figura 5.7 – Gráfico de dispersão entre $E_{m,global}$ [MPa] e $f_m$ [MPa]	59

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1- Propriedades físicas e mecânicas da madeira <i>Eucalipto globulus</i> (Bermúdez Alvite, 2002)	14
Quadro 2.2 - Etapas do processo de Secagem (Saavedra, 2002)	18
Quadro 2.3 – Propriedades da classificação estrutural (Vázquez, 2007)	19
Quadro 3.1- Caracterização do lote	21
Quadro 3.2- dnó [mm]	23
Quadro 3.3- Peças com presença de kino	24
Quadro 3.4- Inclinação do fio [%]	26
Quadro 3.5- Casca inclusa [mm <sup>2</sup> ]	27
Quadro 3.6- Presença de descaio	29
Quadro 3.7- Fissuras	29
Quadro 3.8- Empenos (Eyle)	30
Quadro 3.9- Classificação Visual da amostra	31
Quadro 4.1- Dimensões [mm], Massa [kg] e Teor de água [%]	36
Quadro 4.2 – Frequência própria de vibração [Hz] e módulo de elasticidade dinâmico [MPa] através do aparelho comercial <i>Timber Grader</i> MTG	36
Quadro 4.3 – Frequência própria de vibração [Hz] e Módulo de elasticidade dinâmica [MPa] através do acelerómetro	37
Quadro 4.4 – Comparação dos resultados entre <i>Timber Grader</i> MTG e Acelerómetro	38
Quadro 4.5 – Resultados do $E_{m,local}$ e do $E_{m,global}$ obtidos através do ensaio estático	40
Quadro 4.6 – Determinação da resistência à flexão, $f_m$	43
Quadro 4.7 – Teor de água (%)	46
Quadro 4.8 – Massa Volúmica	48
Quadro 4.9 – Propriedades obtidas para os elementos de madeira em estudo	50
Quadro 5.1 – Comparação dos valores médios das propriedades	52
Quadro 5.2 – Comparação das propriedades mecânicas obtidas com as da ficha técnica (LNEC, 1997)	53
Quadro 5.3 – Correlações múltiplas entre características visuais e $f_m$	56
Quadro 5.4 – Correlações múltiplas entre características visuais e $E_{m,dym}$ (MTG eAce.) e $f_m$	58
Quadro 5.5 – Correlações múltiplas entre as propriedades da madeira e $f_m$ [MPa]	60

Quadro 5.6 – Correlações simples entre propriedades das peças de madeira	61
--	----

## SIMBOLOGIA

- a – Largura total da face na medição do descaio  
a – Distância entre pontos de carga  
 $a_1$  – Largura reduzida da face pelo descaio  
b – Espessura do elemento  
 $b_1$  – Largura reduzido do canto pelo descaio  
 $E_{m,dym}$  – Módulo de elasticidade dinâmico  
 $E_{m,g}$  – Módulo de elasticidade global  
 $E_{m,l}$  – Módulo de elasticidade local  
 $E_{0,w}$  – Módulo de elasticidade com o teor de água de ensaio  
 $E_{0,05}$  – Valor correspondente ao percentil 5% do módulo de elasticidade da amostra  
 $E_i$  – Módulo de elasticidade do elemento i  
 $F_a$  – Força máxima aplicada pelos pontos de carga  
 $F_1$  – Força aplicada por um ponto de carga  
 $F_2$  – Força aplicada por um ponto de carga  
f – Frequência própria de vibração  
 $f_m$  – Resistência à flexão  
 $f_{m,k}$  – Valor característico da resistência à flexão  
 $f_{m,05}$  – Valor correspondente ao percentil 5% da resistência à flexão da amostra  
G – Módulo de distorção  
h – Largura do elemento  
I – Inércia da secção transversal em relação ao eixo de flexão  
 $k_s$  – Fator de ajuste do número e tamanho da amostra  
 $k_v$  – Fator de ajuste da classificação mecânica  
l – Comprimento do elemento  
 $l_1$  – Distância entre apoios no ensaio  
m – Massa de um elemento  
 $m_0$  – Massa inicial de um provete  
 $m_1$  – Massa final de um provete seco (variação entre massas consecutivas inferior a 0,1%)  
n – Número de elementos de uma amostra  
V – Volume de um elemento  
w – Teor de água de ensaio  
 $w_{12}$  – Teor de água de referência (12%)

$w_e$  – Largura do descaio na face

$w_f$  – Largura do descaio no canto

$X$  – Desvio das fibras

$Y$  – Comprimento sobre o qual o descaio das fibras é medido

$\rho$  – Massa volúmica

$\rho_k$  – Valor característico da massa volúmica

$\rho_{\text{mean}}$  – Massa volúmica com teor de água de ensaio

$\rho_w$  – Massa volúmica com teor de água

# 1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

## 1.1 Introdução

A presente dissertação incide num estudo sobre a caracterização da madeira de Eucalipto globulus para aplicação estrutural. A madeira de Eucalipto globulus é das principais madeiras presentes no território português, mas é sobretudo conhecida pela forte apetência que tem para a indústria do papel, sendo a sua aplicabilidade na construção pouco estudada. Esta madeira apresenta excelentes propriedades mecânicas, uma elevada dureza e densidade. Devido à sua constituição interna, é necessária uma especial atenção durante o processo de secagem e posteriormente também na serragem, pois normalmente nesta fase há o aparecimento de problemas que influenciam de forma negativa a resistência da madeira.

Os elementos de madeira, pela sua origem natural e impossibilidade de controlo de produção, necessitam de um estudo rigoroso para a determinação da sua qualidade. Esta análise é essencial para se poderem conhecer e resolver os problemas que estão associados à sua aplicação para fins estruturais. O conhecimento de todas as características e propriedades dos elementos de madeira é de uma forma geral essencial na aplicação estrutural, mas no que respeita à madeira de Eucalipto globulus, revela-se um maior desenvolvimento da indústria transformadora com intuito a promover o aumento da utilização desta espécie na construção.

A presente dissertação teve como objetivo central a caracterização cuidada dos elementos de madeira de Eucalipto globulus para fins estruturais e a promoção do conhecimento das excelentes propriedades mecânicas que a espécie revela.

## 1.2 Objetivos

O processo de caracterização da madeira em estudo foi realizado através de várias etapas essenciais ao conhecimento das propriedades da madeira. O processo de caracterização iniciou-se pela classificação visual dos elementos, que passou por um processo de análise rigorosa a todas as características visuais presentes nos elementos de madeira. O objetivo principal da classificação visual foi a definição de uma classe de qualidade da madeira, tendo em vista a presença de todos os defeitos influenciadores na resistência. A análise das características visuais foi realizada segundo o preconizado na norma europeia prEN1310 (CEN, 1995). Foram

contabilizadas os defeitos que estão associados à sua estrutura (nós, inclinação do fio, bolsas de resina, casca inclusa), bem como os que estão associados ao processo do corte (descaio) e às alterações na madeira (empenos, fissuras). O processo de atribuição de uma classe de qualidade é descrito na norma europeia EN14081-1 (CEN, 2005), que define os limites para a atribuição das classes referidas (inferior ou igual a C18 e superior a C18) genericamente para a madeira serrada de secção retangular.

Numa segunda fase foram efetuados ensaios dinâmicos para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico nos elementos em estudo. Os ensaios realizados permitiram a determinação deste parâmetro através de métodos de vibração longitudinal. Foram feitos dois ensaios recorrendo a dois aparelhos diferentes o *Timber Grader* MTG e o Acelerómetro. Nesta fase foi também determinado o teor de humidade através do aparelho humidímetro de agulhas.

A realização dos ensaios estáticos teve como objetivo a determinação do módulo de elasticidade estático (local e global) e a resistência à flexão. A determinação do módulo de elasticidade local e global foi feita com a realização de ensaios não destrutivos, enquanto que para a determinação da resistência à flexão recorreu a ensaios destrutivos. O procedimento para a concretização de ambos os ensaios são descritos na norma europeia EN408 (CEN, 2012), que determina os valores dos parâmetros em análise.

Por fim procedeu-se ao tratamento e análise dos resultados obtidos no decorrer das duas primeiras fases de investigação. A fim de se estimar a resistência à flexão dos elementos de madeira de *Eucalypto globulus* foram realizadas correlações simples e múltiplas que demonstraram quais os parâmetros que melhor descrevem a sua resistência. Para a concretização das correlações, os parâmetros tidos em conta foram os seguintes: as características visuais, os módulos de elasticidade dinâmicos, os módulos de elasticidade estáticos (local e global) e a resistência à flexão.

### **1.3 Organização da dissertação**

A presente dissertação está organizada em 7 capítulos, em que se incluem os capítulos referentes à Introdução e às Referências Bibliográficas.

O Capítulo 2 é referente ao Estado de Arte, onde se procurou proceder a uma pesquisa e análise de estudos já realizados em elementos de madeira. Inicialmente é feito um enquadramento do tema da madeira e da madeira de *Eucalypto globulus*, destacando a sua importância. Posteriormente são apresentadas várias investigações referentes à classificação visual, estando indicados os defeitos mais relevantes, segundo os vários autores, na madeira de *Eucalypto*. De seguida é apresentada uma abordagem aos ensaios destrutivos e não-destrutivos que têm sido

desenvolvidos ao longo dos últimos anos. Por fim, são apresentados vários estudos realizados somente em madeira de Eucalipto.

No Capítulo 3 é abordada a classificação visual da amostra em análise, onde são descritas detalhadamente todas as características visuais presentes nos elementos em estudo. É também indicada a descrição dos elementos constituintes da amostra. Para esta classificação recorreu-se a duas normas europeias, a primeira para o processo de caracterização visual (prEN1310 (CEN, 1995)) e a segunda para atribuição de uma classe de qualidade (EN14081-1 (CEN, 2005)).

No Capítulo 4 é feita uma abordagem aos ensaios experimentais realizados para a determinação das propriedades mecânicas dos elementos. É realizada a descrição dos ensaios dinâmicos e dos ensaios estáticos, com o objetivo da determinação dos módulos de elasticidade dinâmicos, dos módulos de elasticidade estáticos (local e global) e da resistência à flexão. Os resultados obtidos são analisados e trabalhados ao longo do capítulo.

O Capítulo 5 é referente à avaliação e comparação dos resultados obtidos no decorrer deste estudo. A avaliação e comparação incide sobre todas as propriedades determinadas com o decorrer do estudo. Para uma melhor avaliação dos resultados obtidos, são apresentadas correlações simples e múltiplas estabelecidas entre todas as propriedades, com o objetivo de estimar os parâmetros que melhor descrevem a resistência à flexão dos elementos.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões que se apuraram com a realização das várias fases de investigação conducentes à presente dissertação. São ainda, neste último capítulo, apresentados possíveis trabalhos futuros a desenvolver de forma a complementar este estudo e melhorar a investigação em elementos de madeira de Eucalipto.

## 2 ESTADO DE ARTE

### 2.1 Introdução

O presente capítulo tem como objetivo a análise de estudos previamente realizados acerca de elementos de madeira. A subdivisão em subcapítulos foi feita de forma a clarificar a sua organização. No subcapítulo 2.2, é feita uma abordagem ao material madeira, com especial ênfase na madeira de eucalipto da espécie globulus (*Eucalyptus globulus*). No subcapítulo 2.3, é feita uma análise ao enquadramento normativo que auxiliou a orientação do presente trabalho. No subcapítulo 2.4 são apresentados estudos relativos à classificação visual de elementos de madeira, no qual é dado um maior destaque dado aos elementos de madeira serrada. No subcapítulo 2.5, são abordados estudos relacionados com os ensaios não-destrutivos que são mais utilizados em elementos de madeira, destacando aqueles a que são usados na presente dissertação. Por fim, no subcapítulo 2.6, foram feitas referências aos estudos já realizados sobre a madeira de eucalipto.

### 2.2 Madeira de Eucalipto globulus

A madeira, devido à sua diferenciada constituição do tecido lenhoso, torna-se um material de comportamento heterogêneo e anisotrópico. A sua morfologia interna, e em particular a sua constituição celular, fazem dela um material complexo, com elevado potencial estrutural, podendo afirmar-se como matéria-prima com boas características físicas e mecânicas, do ponto de vista da engenharia. Durante o seu crescimento, a árvore está exposta a fatores externos e a fatores internos passíveis de provocar o surgimento de algumas imperfeições que irão causar, por conseguinte, a diminuição do seu potencial. Torna-se por esse motivo indispensável um conhecimento correto e aprofundado das suas propriedades físicas e mecânicas, para uma correta aplicação como material estrutural.

Existem duas famílias para as espécies de madeira, dependendo da sua proveniência, as folhosas e as resinosas como exemplo das folhosas têm o Eucalipto. As folhosas são caracterizadas como sendo uma madeira mais dura e com fibras mais resistentes, pois estas têm paredes de maior espessura e menor diâmetro interior de vazios.

O eucalypto *globulus* é uma espécie originária da região litoral sudeste da Austrália (LNEC, 1997), estando também presente em outros países, com características tropicais, como Brasil, Índia, África do Sul, Austrália, Argentina, Uruguai, Chile, Vietnam, Espanha, Portugal, como por exemplo (Bermúdez Alvite, 2002). Em Portugal continental estima-se que ocupa uma área de 812 000 ha, tendo vindo a aumentar a sua área entre 1995 e 2010. (ICNF, 2013)

A madeira de Eucalypto pode ser classificada como moderadamente pesada, muito retrátil e dura. (Carvalho, 1962). Segundo Pereira (2010) o eucalypto *globulus* tem boas características no que diz respeito à forma do tronco, pois apresenta um fuste direito, cilíndrico, pequena excentricidade e muito pequena conicidade. Estas características, segundo afirma o autor, são indicadoras de um bom potencial de aproveitamento para madeira serrada.

Os principais estudos existentes para a madeira de Eucalypto, em Portugal, são essencialmente para a produção de pastas de papel, existindo pouco conhecimento para outras aplicações como sejam, a produção de produtos de madeira. (Pereira, 2010)

Na forma original, os toros de Eucalypto, exibem algumas vantagens em relação à madeira serrada, como maior resistência, menor variabilidade das suas propriedades mecânicas. (Carreira, 2011) (Balsa, 2013)

### 2.3 Enquadramento Normativo

O Comité Europeu de Normalização (CEN) é responsável pela elaboração de normas europeias, onde são estabelecidos requisitos para se proceder à classificação de elementos de madeira. O processo de classificação inicia-se, geralmente, pela classificação visual onde se recorre ao estipulado na norma prEN1310. Nesta norma são descritos os métodos de medição das características da madeira, ou seja, são descritos os procedimentos a ter em conta na medição dos defeitos presentes nos elementos de madeira (nós, fissuras, empenos, etc.), para o processo de classificação visual. Após medidas as características visuais nos elementos é necessário contabiliza-los para atribuição de uma classe de resistência. Para tal é necessário recorrer ao preconizado na norma EN 14081-1. Nesta norma são apresentados, de forma genérica, limites correspondentes a cada defeito, de forma a poder-se inserir o elemento em estudo numa determinada classe de resistência definida na EN 338. A EN 338 estabelece um sistema de classes de resistência, com o conhecimento dos valores característicos das propriedades da madeira, para uso estrutural.

A classificação mecânica é realizada segunda a norma EN 408, onde são indicados os procedimentos necessários para a realização correta dos ensaios experimentais, a fim de determinar as propriedades físicas e mecânicas para madeira serrada. Nesta norma também

estão descritos os métodos de determinação do valor das propriedades, como módulo de elasticidade e resistência à flexão, através dos resultados obtidos dos ensaios experimentais. Para a aplicação estrutural de elementos de madeira são utilizados, em geral, os valores característicos correspondentes às propriedades mecânicas. Para a determinação desses valores deve recorrer-se à norma EN 384, onde são apresentados os métodos para a determinação dos valores característicos correspondentes ao quinto percentil das propriedades mecânicas, bem como os métodos de determinação dos valores médios dessas mesmas propriedades.

Uma propriedade da madeira que também é necessária conhecer para a sua classificação é o peso específico. Para a sua determinação é necessário conhecer a massa volúmica e o teor de água das peças de madeira, a norma EN 13183-1, é estabelecido o procedimento para a determinação do valor teor de água, que depende da massa inicial e seca. Também é descrito a forma como se deve proceder à secagem da madeira, com intuito da determinação da massa seca.

De forma a complementar as normas europeias, existem a normas portuguesas que têm uma grande importância no completo do estudo. Para a madeira de eucalypto globulus não existe nenhuma norma portuguesa, a nível nacional existe a norma NP 4305 que define regras para a classificação visual para madeira serrada de pinheiro bravo para estruturas.

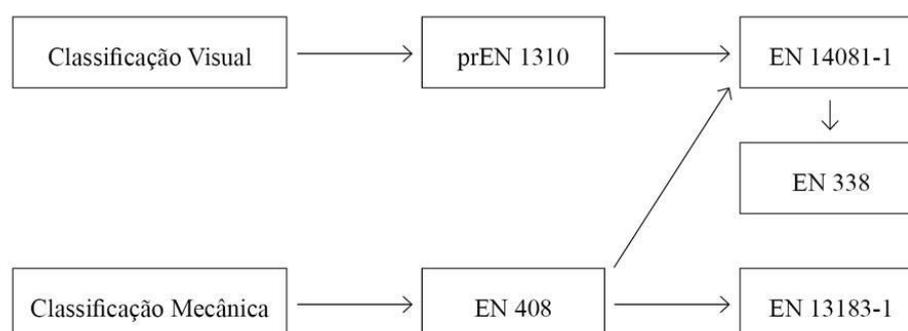


Figura 2.1 – Esquema de relação entre normas

## 2.4 Classificação Visual

Normalmente numa primeira fase na classificação de qualquer espécie de madeira é usada a classificação visual. Este tipo de classificação é a mais antiga na avaliação não destrutiva de

elementos estruturais de madeira, mas devido a não permitir a avaliação interna dos elementos de madeira e ser pouco sensível às propriedades mecânicas não é aconselhável utilizar somente este tipo de classificação na avaliação estrutural. (Carreira, 2011) Neste processo de classificação são consideradas as características que têm uma correlação mais elevada com as propriedades físicas e mecânicas da madeira. Como já foi referido, a madeira é um material natural, onde na fase de crescimento está sujeito a diversificados fatores que alteram as suas propriedades. Os principais fatores condicionantes nas propriedades mecânicas são a existência de defeitos, os quais resultam essencialmente da fase de crescimento e da fase de secagem. Os defeitos ocorridos no crescimento, defeitos de origem anatómica, são os que necessitam de uma maior preocupação, pois não podem ser controlados, exemplos desses defeitos são: nós, empenos, fissuras, inclinação do fio.

O crescimento dos nós no tronco é iniciado na medula e com uma direção para a periferia. Como o descrito em Pereira (2010) o aparecimento de nós é inevitável no tronco, podendo apenas se limitar o seu aparecimento na parte inferior, por morte e queda natural ou remoção artificial de ramificações. Na zona onde existe presença de nós, há uma maior densidade comparativamente à madeira que rodeia, tornando a orientação axial das células alterada, o que leva a inflexões do fio. Na madeira de eucalipto este é defeito tem sido muito pouco estudado. Foram elaborados estudos (Pereira, 2010), onde se chegou à conclusão que para um crescimento isolado das árvores de *Eucalypto globulus* ou num povoamento com um número de árvores por hectare baixo, o aparecimento de ramificações é frequente, começando na parte inferior e os ramos podem atingir um diâmetro considerável. Mas no caso de ser um povoamento regular ou com uma densidade mais elevada, o tronco apresenta-se quase sem ramificações na parte inferior, estando o seu aparecimento na parte superior de suporte à copa. Nas plantações atuais de *Eucalypto globulus*, tem-se verificado que há ocorrência de variabilidade de ramificações ao longo do tronco, um dos motivos pode ser o facto de o eucalipto ser uma árvore com capacidade de rebentação epicórmica a partir do tronco, ou seja, devido a agressões ou fatores, a que possa estar sujeita, poderão dar origem a ramificações em diferentes partes do tronco, e onde, neste caso, o nó não é formado na medula.

Para a espécie de *Eucalypto grandis* já foram realizados estudos sobre a classificação da madeira quanto aos defeitos. Os nós, por exemplo, foram avaliados relativamente ao seu índice por metro quadrado e ao seu maior diâmetro em elementos tábuas. Os elementos apresentaram 3 nós/m<sup>2</sup> com um diâmetro médio do nó de maiores dimensões de 2,8cm, o que faz com que exista uma correlação positiva entre índice de nós e diâmetro de maior nó. (Haselein, 2004)

Após o abate é iniciado o processo de secagem, onde numa primeira fase há uma maior perda de teor de água, o que leva a variações dimensionais de retração e abertura de fendas e fraturas radiais. A título de exemplo, a madeira de *Eucalypto Globulus* possui um teor de água entre

cerca de 80% a 110%, que varia com a época de corte. (Pereira, 2010) Segundo (Carvalho, 1996) são considerados por vezes inevitáveis, mas podem ser controlados através de um conhecimento perfeito da madeira, das normas adequadas para um tratamento correto e ter o domínio sobre meios com capacidade para intervir. Durante a secagem, normalmente, surgem alguns defeitos, como por exemplo, fendas de secagem, empenos (em arco, em meia-cana, em hélice).

Como Pereira (2010) refere a qualidade tecnológica da madeira é influenciada pela presença de defeitos ou zonas de heterogeneidade no tronco, o que provoca uma alteração nas suas propriedades: nós, acumulação de extrativos, fendas, lenho de reação, entre outros. Os nós presentes na madeira são uma característica natural das árvores. Para se proceder à classificação da madeira para efeitos estruturais a análise deste defeito baseia-se na presença e extensão de nós que possam existir em peças de madeira serrada. Assim, os nós são dos defeitos da madeira que mais têm sido estudados, pois têm uma implicação direta na qualidade. Mas também há influência negativamente de zonas com elevado teor de extrativos, por exemplo no caso do eucalipto existe a formação de kino. O kino é a acumulação de extrativos em bolsas mais ou menos extensas. Nas árvores de *Eucalypto globulus* o seu aparecimento ocorre em situações de agressão, podendo corresponder a um mecanismo de defesa. (Eyle, 2002) Estas bolsas de kino constituem uma zona de fragilidade, que leva a uma diminuição da resistência da madeira. Como refere Eyle (2002) a formação de bolsas de kino e os defeitos associados podem ser um problema para aplicação de madeira serrada. No caso da existência de tensões no interior do tronco, podem ocorrer alterações com características anatómicas, físicas e químicas diferentes das existentes no lenho normal, designado como lenho de reação, e desenvolvimento de fendas e fissuras após o abate. A presença de fio espiralado é um defeito bastante relevante na utilização da madeira serrada, uma vez que reduz a sua resistência mecânica e é um dos motivos passíveis de desencadear o aparecimento de fendas e empenos durante a secagem.

## 2.5 Ensaios não destrutivos

A hipótese fundamental da avaliação não-destrutiva da madeira foi fundamentada por Jayne (1959). Ele propôs que a energia armazenada e as propriedades de dissipação da madeira podem ser medidas por meios não-destrutivos, sendo que tais mecanismos determinam o comportamento estático da madeira. (Carreira, 2003) O aparecimento dos ensaios não destrutivos teve como principal objetivo melhorar a precisão dos processos de classificação de elementos de madeira existentes, a fim de alcançar um melhor aproveitamento das qualidades de madeira. (Larsen, 2001) O aparecimento deste tipo de ensaios possibilitou realizar avaliações relativas a elementos de madeira com maior precisão, perspetivando valores de resistência e rigidez mais próximos dos reais. (Balsa, 2013)

Os ensaios não destrutivos são uma boa opção para a classificação da madeira, uma vez que não afetam as suas propriedades mecânicas. Como afirma Balsa (2013), a aplicação de cada técnica não destrutiva tem vantagens e desvantagens que afetam a sua aplicabilidade. Um uso adequado deste tipo de técnicas permite uma avaliação das propriedades do material, mantendo a sua integridade estrutural. Segundo Carreira (2003), as técnicas de avaliação não-destrutiva aplicadas à madeira diferem muito das usadas em materiais homogêneos e isotrópicos, como o aço e betão. Nestes materiais as propriedades mecânicas são conhecidas e rigorosamente controladas por processos de produção.

As técnicas não destrutivas têm vindo a ser melhoradas e otimizadas, desde o seu aparecimento, com objetivo de que os valores obtidos sejam os mais precisos e rigorosos. As técnicas de vibração, o método dos ultra-sons e a introdução de esforços mecânicos são exemplos deste grande desenvolvimento ocorrido nos últimos anos. (Balsa, 2013)

### 2.5.1 Vibração

A técnica de vibração tem como objetivo avaliar o módulo de elasticidade da madeira, através da frequência de vibração. Esta técnica não é recente, uma vez que um dos primeiros trabalhos foi desenvolvido por Pellerin (1965), que estudou a aplicação desta técnica para a determinação da rigidez de flexão de vigas de madeira serrada. Posteriormente a este trabalho seguiram-se outros. Após vários ensaios de outros autores, concluiu-se que a vibração transversal é um método eficiente para a classificação de peças estruturais de madeira. (Carreira, 2011) Esta técnica baseia-se na teoria de que todos os materiais têm uma frequência natural e vibram (Morgado, 2012).

Segundo Clough (1995) este método é baseado na teoria da viga de Euler para vibrações livres de vigas prismáticas. O módulo de elasticidade dinâmico de um elemento de madeira é determinado através da derivada da equação diferencial fundamental da teoria de Euler:

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

Vries, Gard et al. utilizaram dois métodos diferentes para o cálculo do módulo de elasticidade. (Balsa, 2013) Um dos métodos consiste em aplicar uma vibração no elemento de madeira através de um impacto longitudinal e na medição da aceleração através de um tradutor piezométrico. (Vries, 1998) Um segundo método consiste na determinação do módulo de elasticidade dinâmico, recorrendo a um equipamento comercial denominado Timber Grader MTG. Para a aplicação deste método é necessário determinar previamente o peso e o teor de humidade dos elementos de madeira. (Balsa, 2013)

À semelhança do estudo feito por Vries (2006), também outros autores efetuaram os ensaios referentes ao primeiro método descrito, e ambos efetuaram correlações entre a determinação do módulo de elasticidade dinâmico e o módulo de elasticidade estático obtido em ensaios de rigidez à flexão. As correlações tiveram valores aproximados de 0,98, correspondentes ao que se pode considerar uma ótima correlação. Estes ensaios foram realizados em madeira serrada e em espécies diferentes. (Carreira, 2011) Vries (2006) efetuaram os ensaios em elementos redondos de madeira de larício, obtendo correlações mais baixas, na ordem dos 0,76. Mas consideram que para o módulo de elasticidade dinâmico o ideal será obter correlações de 0,87.

### 2.5.2 Ultra-sons

Para Sandoz (1993) o método de ultra-som é preferencial na classificação da madeira através de processos de avaliação não destrutiva. Isto deve-se ao facto de tratar-se de um método com uma área de aplicação mais vasta e um método muito sensível ao teor de humidade e à temperatura da madeira. O método de classificação de ultra-som usa o princípio de propagação das ondas no material. As ondas são aplicadas na madeira através de dois transdutores, sendo que um transmite a onda e o outro recebe o sinal. Sabendo a velocidade de propagação da onda é então possível determinar o módulo de elasticidade dinâmico, pois este depende da velocidade da onda e da sua densidade, calculado através da seguinte equação:

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

Segundo o descrito por Balsa (2013) existem dois métodos diferentes para a utilização de ultra-sons, designados por método direto e indireto. No método direto a propagação da onda é feita ao longo das fibras, na direção longitudinal da peça, e os transdutores são colados nos topos. O método indireto é uma solução a que se recorre quando existem dificuldades no acesso aos topos da peça, tratando-se de uma peça em serviço. O seu procedimento é idêntico ao do método direto, alterando a posição dos transdutores, que são colocados numa só face. Bucur realizou ensaios para verificar a variação da velocidade da onda nas diferentes direções (longitudinal, radial e tangencial) em função da variação da secção em peças prismáticas. Os resultados demonstraram que na direção longitudinal a velocidade era a mais afetada pela variação da secção transversal, comparando-os com as direções radial e tangencial. (Oliveira, 2005) A velocidade de propagação longitudinal, segundo concluiu Oliveira (2005), diminui com o aumento da relação  $b/h$ , sendo a geometria do elemento essencial para uma correta determinação da velocidade de ultra-sons na madeira.

### 2.5.3 Ensaio mecânicos não destrutivos

Na aplicação de elementos de madeira para a aplicação estrutural é indispensável o conhecimento da resistência e rigidez. Esses parâmetros são determinados através do módulo de elasticidade e da resistência à flexão, fatores fornecidos por meio de ensaios destrutivos e não destrutivos. Atualmente a maioria das máquinas classificadas para madeira serrada são as

máquinas para ensaios de flexão, estas máquinas não são adequadas para madeira redonda devido à forma cônica dos elementos. (Vries, 2008)

Como refere Morgado (2012) este tipo de ensaio não destrutivo consiste na determinação das propriedades mecânicas dos elementos de madeira tendo em conta a sua resposta aquando da aplicação de um determinado esforço. Para este tipo de ensaio foi desenvolvida uma máquina, MSR (*Machine Stress Rated*), cujo processo consiste na introdução da peça de madeira na máquina, fazendo-a passar por rolos. Durante este processo uma determinada força provoca flexão, perpendicularmente ao eixo de menor inércia da secção transversal da peça, onde se regista a deformação para posteriormente se calcular o módulo de elasticidade. Este tipo de ensaio está restringido a peças finas, com espessuras de 38 mm ou menos. (Carreira, 2003)

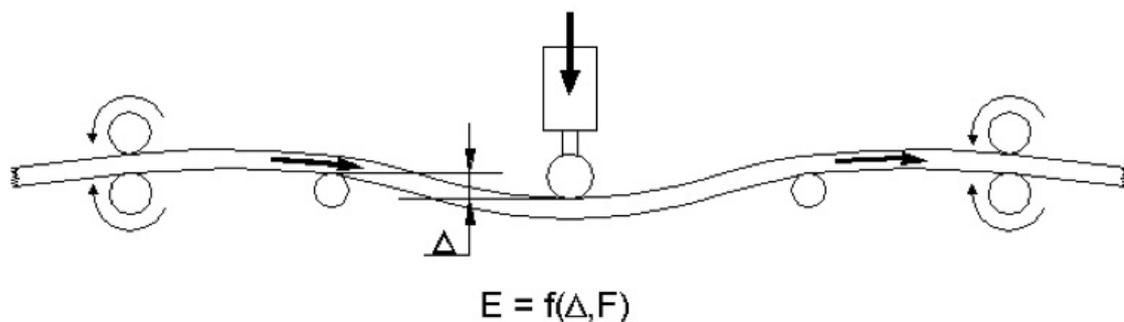


Figura 2.2- Esquema de funcionamento da máquina MSR (Carreira, 2003)

Segundo (Vries, 1998) a utilização de postes com seção circular difere muito da utilização de madeira serrada, pois ocorre o surgimento de alguns problemas. Após ter procedido a uma avaliação do método de ensaio, o autor achou imprescindível uma análise do impacto na precisão dos resultados. De forma a ter-se em conta a precisão nos resultados, verificou-se que seria necessária a medição de dois valores, medidos em simultâneo, para o módulo de elasticidade, conforme descrito na norma EN 408.

#### 2.5.4 Ensaios mecânicos destrutivos

O procedimento do ensaio descrito pela norma EN 408 consiste em carregar em flexão o provete de madeira serrada, fazendo-o de forma simétrica em dois pontos ao longo de uma distância de 18 vezes a sua altura ( $18h$ ), sendo que o provete é simplesmente apoiado. Lateralmente são colocadas chapas, por forma a minimizar o recuo local, a peça é assim restringida lateralmente para evitar problemas de torção. A carga aplicada não deve exceder 40% da carga máxima estimada ( $0,4F_{max}$ ), tal como também não deve ser inferior a 10% da carga máxima.

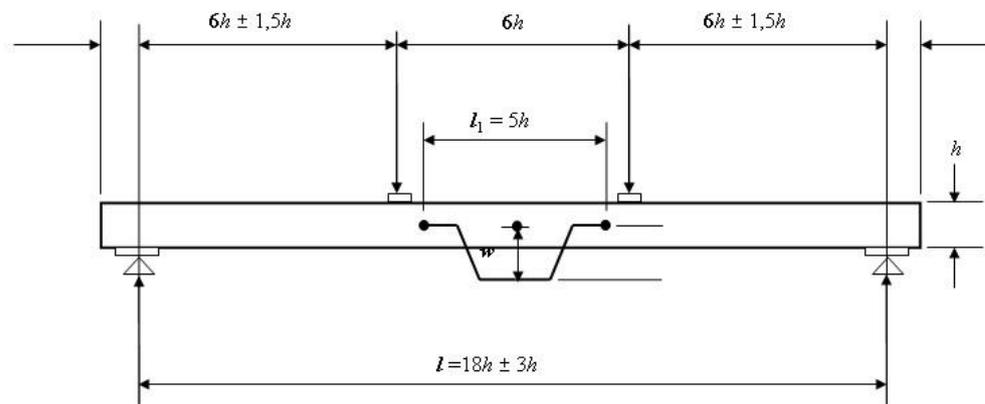


Figura 2.3- Ensaio para a medição do módulo de elasticidade local (CEN, 2012)

Determinação do módulo de elasticidade local através da seguinte fórmula:

$$E_{m,l} = \frac{al_1^2(F_2 - F_1)}{16I(w_2 - w_1)} \quad (2.3)$$

Como referido anteriormente, é necessário o cálculo de dois valores de módulo de elasticidade para a precisão dos resultados. Assim para a determinação do módulo de elasticidade global o procedimento de colocação do provete é a mesma, com as mesmas restrições na aplicação da carga. Mas no cálculo do módulo de elasticidade global, o deslocamento é medido na parte inferior central do provete, como demonstra a figura.

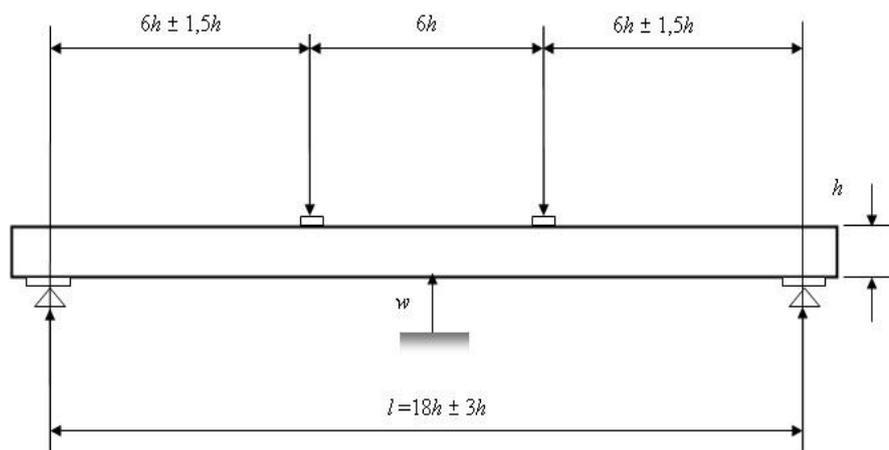


Figura 2.4- Ensaio para medição do módulo de elasticidade global (CEN, 2012)

O valor do módulo de elasticidade é calculado de forma idêntica, através de uma fórmula indicada na mesma norma. Na fórmula seguinte existe alteração no caso de o ensaio estar a ser

realizado em madeira folhosa ou em madeira resinosa. Em madeira folhosa o módulo de cisalhamento (G) pode ser considerado infinito.

$$E_{m,g} = \frac{3al^2 - 4a^3}{2bh^3 \left( 2 \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} - \frac{6a}{5Gbh} \right)} \quad (2.4)$$

Os deslocamentos neste ensaio são medidos através de acelerómetros, colocados nas chapas para a determinação do módulo de elasticidade local, e na parte inferior para a medição do módulo de elasticidade global.

Oliveira (2015) utilizou igualmente este ensaio para a madeira de Castanho, onde concluiu que através dos ensaios de ultra-sons se obtiveram valores superiores.

Uma outra técnica com introdução de esforços é o ensaio de perfuração, que consiste na determinação da resistência à perfuração. Segundo (Balsa, 2013) esta técnica é mais recorrente em elementos estruturais de madeira e para a determinação de qualidade de árvores vivas. O ensaio tem como objetivo determinar a densidade da madeira pela medição da profundidade de penetração através de uma ferramenta desenvolvida especialmente para este ensaio, a *Pilodyn 6J Forest*. Este equipamento tem a capacidade de transformar a energia potencial elástica, provocada pelo lançamento de uma mola, em energia de impacto, permitindo medir a penetração de uma agulha de aço de 2,5mm de diâmetro. A profundidade de penetração é inversamente proporcional à densidade da madeira, assim quanto maior a profundidade menor é a densidade. A principal finalidade deste ensaio é determinar a correlação existente entre a densidade de cada amostra e a distância de penetração da agulha. Foram realizadas duas leituras em cada elemento, uma na direção radial e outra na direção tangencial. Conclui-se que para obter uma correlação mais elevada seria necessário utilizar a média das duas leituras.

## 2.6 Estudos realizados em madeira de Eucalipto

Desde o início da aplicação da madeira de eucalipto na Europa, há cerca de 200 anos, que se têm feito pequenos estudos e chegado a determinadas constatações sobre a aplicabilidade desta espécie de madeira como elemento estrutural. Isto permitiu aos técnicos afirmarem que é uma madeira com propriedades mecânicas excelentes, tendo portanto um elevado valor para numerosas aplicações. É porém necessário trabalhar-se a madeira já com uma certa idade, evitando a parte central do tronco, pois apresenta densidade reduzida e propriedades mecânicas inferiores, de forma a homogeneizar e otimizar as suas propriedades. (Bermúdez Alvite, 2002)

Em 1865 foi retirada uma viga de eucalipto globulus, que estava instalada no palácio de Justiça de Hobart e que permanecia em serviço ao longo de 45 anos. Os técnicos que a examinaram declararam que a madeira se encontrava num estado tão perfeito que parecia recém-cortada. (Bermúdez Alvite, 2002)

Segundo Bermúdez Alvite (2002) foi feito um estudo através do Projeto CRAFF FAIR 98-9579, em que o principal objetivo era o conhecimento de certas propriedades, como o peso específico, a dureza, o ponto de saturação das fibras, os coeficientes de retração radial e tangencial, a resistência à flexão, a resistência à compressão e o módulo de elasticidade. A madeira estudada era proveniente da Galiza e com idades compreendidas entre os 23 e 35 anos. A utilização de madeira proveniente de árvores mais velhas é uma forma de prevenir a presença de lenho juvenil, uma vez que este lenho apresenta características mecânicas inferiores. Os resultados obtidos encontram-se no Quadro 2.1.

Quadro 2.1- Propriedades físicas e mecânicas da madeira *Eucalypto globulus* (Bermúdez Alvite, 2002)

Propriedades	Média	Intervalo	Coef. De Variação	Resultado
Peso específico	0,76	0,42 - 1,07	11% a 20%	Médio
Dureza	6	3 - 10,1	22% a 28%	Médio-Alto
Contração radial total (%)	7,5	2,9 - 11,6	13% a 30%	Alto
Contração tangencial total (%)	13,8	6,9 - 20	8% a 27%	Alto
Ponto de saturação das fibras (%)	37	27 - 53	5% a 14%	Alto
Módulo de elasticidade (MPa)	20580	6500 - 33000	17% a 31%	Alto
Resistência à compressão (MPa)	71	39 - 107	12% a 20%	Alto
Resistência à tração (MPa)	130	48 - 181	12% a 23%	Alto

Como o também referido por Bermúdez Alvite (2002), das propriedades referidas no Quadro 2.1, o peso específico é o parâmetro mais importante para a caracterização de qualquer madeira, pois está bem relacionado com as principais propriedades físicas e mecânicas, bem como com outras características da madeira, como a sua durabilidade natural. Numa primeira análise dos resultados observa-se que as características mecânicas desta madeira têm um papel de destaque, em que as propriedades são classificadas como altas. Também é de salientar que os valores elevados do ponto de saturação das fibras e os coeficientes de retração advém da necessidade da realização de uma secagem cuidada e de uma adequada colocação em serviço. Os autores referem uma especial atenção de forma a mostrar a evolução das propriedades da madeira mais jovem (23 anos) para a madeira mais adulta (35 anos), onde afirmam que a evolução das propriedades mecânicas é ótima, pois em apenas doze anos as propriedades mostram uma

evolução enorme onde, em média, os valores das propriedades mecânicas aumentam em 35%, a densidade 30% e os índices de retração de 35%.

O projeto INTERREG (Bermúdez Alvite, 2002) realizou vários ensaios a perfis de madeira lamelada de eucalipto globulus, a fim de determinar o seu módulo de elasticidade e resistência à flexão. O material ensaiado foram 45 vigas de perfis de madeira lamelada colada, com dimensões 72x86 mm formados por três lâminas de 24x86mm. Das 45 vigas ensaiadas, 35 são formadas pela colagem das três lâminas e nas outras 10 vigas a lâmina central foi denteada duplamente (finger joint). Os ensaios foram realizados de acordo com os pressupostos apresentados na norma EN 408. Após análise dos resultados foi possível afirmar que as propriedades mecânicas do eucalipto globulus são excepcionais, obtendo valores compreendidos entre 93 e 101 N/mm<sup>2</sup> para a resistência característica à flexão e um valor médio de 20 200 N/mm<sup>2</sup> para o módulo de elasticidade. Os autores mostram em gráfico, de forma comparativa, os resultados obtidos nos ensaios com os valores das classes de resistência de madeira resinosa serrada mais aplicada em construção (C18 e C24) e com uma das classes mais habituais de madeira folhosa serrada (D40), onde são comparados os valores característicos para a resistência à flexão e valores médios para o módulo de elasticidade. Como se pode verificar, os valores obtidos para a madeira de eucalipto são bastante superiores comparativamente com as outras classes de resistência, como dado comparativo os valores obtidos são maiores aos da classe de resistência D70, onde tem valores de resistência característica à flexão de 70N/mm<sup>2</sup> e um módulo de elasticidade de 20 000 N/mm<sup>2</sup>.

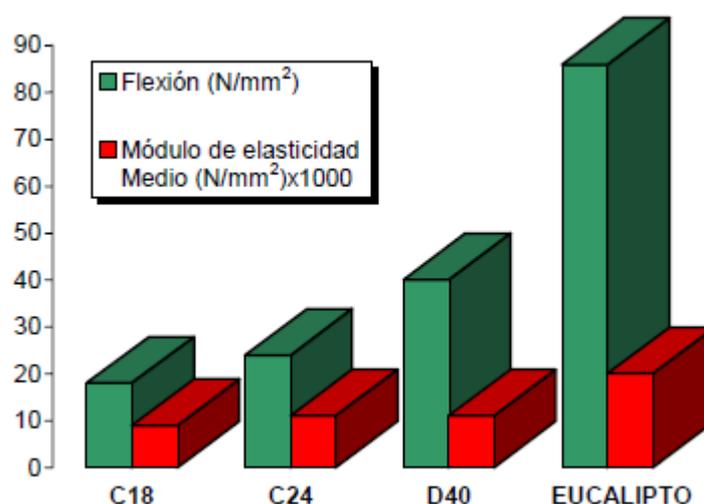


Figura 2.5- Comparação da resistência à flexão e módulo de elasticidade (Bermúdez Alvite, 2002)

Bartholomeu (2000) realizou um estudo onde o principal objetivo era a obtenção de correlações entre ensaios dinâmicos e estáticos em vigas para peças estruturais, visando o estudo da viabilidade de aplicação do método de ultra-som na avaliação de propriedades da madeira das espécies *eucalyptus citiadora* e *pinnus elliottii*. Para este estudo ambas as espécies se encontram no estado saturado, existindo posteriormente a repetição dos ensaios para as mesmas espécies secas ao ar. A amostra ensaiada era constituída por 50 vigas de secção nominal de 6x12x250 cm em estado verde, e a madeira de eucalipto classificada pela norma brasileira (NBR 7190/97) de uma classe C40. Com os resultados obtidos os autores afirmaram que os modelos para correlacionar ensaios estáticos com ensaios dinâmicos para as espécies em estudo, os valores obtidos foram adequados e significativos, referindo que há a possibilidade de utilização de ensaios não destrutivos através do ensaio ultra-som de forma a complementar ou auxiliar a avaliação de peças estruturais de madeira. Chegou-se também à conclusão de que para se correlacionar o módulo de elasticidade estático à flexão com a velocidade de percolação da onda do ensaio de ultra-som, nas espécies estudadas, os resultados foram adequados, indicando que há a possibilidade de se estudar a classificação de peças de madeira serrada aplicando esta técnica.

Oliveira (2005) apresenta um estudo sobre a variação de velocidade da onda ultrassónica longitudinal em função da variação da secção transversal na madeira de *eucalyptus citriadora*. A amostra ensaiada foram 12 peças com 50cm no sentido longitudinal e uma secção transversal de 12x12 cm e com um teor de humidade de 12%. Inicialmente a secção transversal tinha uma relação entre altura e largura igual a 1 ( $b/h=1$ ), sendo continuamente diminuída até esta relação chegar aos 12 ( $b/h=12$ ). O equipamento utilizado foi o V-Meter com frequências de 54 kHz e de 150 kHz e foi medido o tempo de propagação da onda, em cada variação de secção. Com o tempo de propagação e a distância percorrida, foram determinadas as velocidades de propagação para cada frequência nas peças ensaiadas. O comprimento da onda é determinado em função da frequência do transdutor e da velocidade média das peças com secção transversal inicial ( $\lambda = V/f$ ). Após a análise dos resultados, os autores concluíram que para a espécie de *eucalyptus citriadora*, a velocidade de propagação da onda ultrassónica se mostrou bastante sensível à variação da secção transversal, e que os resultados demonstraram a diminuição da velocidade em função da redução da secção transversal. Assim, a geometria é essencial para uma determinação correta da velocidade da onda em madeiras.

G. Castro (2003) realizaram um estudo de vigas de madeira lamelada de pequeno porte, com 80 mm de largura, 115 mm de altura e 2 m de comprimento. As vigas eram compostas por 7 lâminas de choupo e eucalipto, sendo que ambas as espécies eram provenientes de clones. No caso do choupo foi utilizado *populus euramerica*, 'Neva' clone e para o eucalipto a espécie *grandis*, '7', '329', '330' e '358' clones. O objetivo deste estudo foi determinar o módulo de elasticidade, a resistência a flexão, o módulo de cisalhamento e a fiabilidade da ligação. Neste

estudo, como existia uma grande variedade de clones envolvidos, a combinação estudada foi choupo-eucalipto (as duas lâminas exteriores de eucalipto e as cinco interiores de choupo), pois esta combinação foi a que apresentou o melhor desempenho numa pesquisa anteriormente feita pelos mesmos autores. De entre as quatro espécies de clones de eucalipto, o '330' foi o que mostrou resultados diferentes dos outros clones, apresentando uma maior densidade e um melhor comportamento mecânico, de aproximadamente mais de 50% na resistência à flexão e módulo de elasticidade. Concluiu-se que as vigas com madeira mista (choupo e eucalipto) apresentam uma maior eficiência à flexão, comparativamente com aquelas constituídas por apenas uma das espécies em estudo. Os autores afirmam assim que a combinação de madeira de espécie diferentes, realçando a importância de uma correta proporção, confirma a possibilidade de se produzir lamelado com alta influência estrutural. A ligação também demonstrou completa fiabilidade, tanto entre lâminas da mesma espécie, como entre a ligação do choupo com o eucalipto.

Properties	Mean
$\rho_{12}(\text{kg/m}^3)$	358
$\beta_{tmax}$ (%)	6.17
$\beta_{rmax}$ (%)	3.77
$f_c$ (MPa)	22.5
$f_m$ (MPa)	52
$f_v$ (MPa)	5.2

Figura 2.6- Propriedades do Choupo (G. Castro, 2003)

Properties	<i>Eucalyptus grandis</i> clones			
	'358'	'7'	'329'	'330'
$\rho_{12}(\text{kg/m}^3)$	539	526	520	698
$\beta_{tmax}$ (%)	8.26	7.71	7.35	8.98
$\beta_{rmax}$ (%)	5.04	4.15	4.13	5.13
$f_c$ (MPa)	41.1	40.6	41.1	50.7
$f_m$ (MPa)	86	84	84	120
$f_v$ (MPa)	9	8.1	8.3	10.8
E (MPa)	12818	12399	12333	17826

Figura 2.7- Propriedades do Eucalipto (G. Castro, 2003)

O aproveitamento da madeira serrada de eucalipto está limitado devido ao seu processo de secagem, pois existe a necessidade de se efetuar uma secagem lenta e delicada de forma a evitar o aparecimento de defeitos, como fendas, colapsos e deformações. Saavedra (2002)apresentam uma proposta para a secagem industrial da madeira de eucalipto globulus, através de ensaios realizados. Sendo este processo de secagem abrangido por várias etapas rigorosas. Realizaram

10 ensaios de secagem em madeira de eucalipto, com uma idade superior a 30 anos e serrada através de corte radial. As dimensões das peças em estudo eram 2500x100x32mm, sendo indicadas como elementos para carpintaria e mobiliário. As pilhas de madeira foram organizadas mediante ripas de pinho seco, 25x25mm de secção e colocados com uma separação de 400mm.

Quadro 2.2 - Etapas do processo de Secagem (Saavedra, 2002)

<b>Humidade Madeira [%]</b>	<b>Temperatura [°C]</b>	<b>Humidade Relativa [%]</b>
>30	27	80
Acondicionamento	45	100
30	35	75
25	45	70
20	55	60
2°	55	100
Acondicionamento		
15	60	55
12	65	45
3°	70	100
Acondicionamento		

Na primeira etapa foi efetuada uma pré-secagem, em câmara, com condições de  $27\pm 2^{\circ}\text{C}$  e  $80\pm 5\%$  humidade relativa e com uma velocidade de ar entre as filas de 1m/s. Assim permite diminuir o teor médio de humidade de 65% a 30%, num período de 15 a 20 dias e sem presença significativa de colapso, nem fendas internas ou superficiais. O período mencionado poderia variar consoante a espessura da peça e o teor de humidade inicial, no caso de a espessura ultrapassar 35mm e com um teor de humidade inicial de 75%, o período variaria entre 25 a 30 dias. Após a madeira alcançar um teor médio de humidade de 30%, e de forma a iniciar as próximas etapas de secagem em condições ótimas, era preciso realizar um acondicionamento, onde é colocada a madeira a um teor de humidade relativa perto de 100%, com uma temperatura de  $45^{\circ}\text{C}$  e durante um período equivalente a 2 a 4 horas por centímetro de espessura.

Para o segundo acondicionamento é requerida a aplicação de uma temperatura de  $55\pm 2^{\circ}\text{C}$  durante um período de 10 horas. Assim, consegue-se atingir um teor de humidade final de 12% sem defeitos significativos e com uma boa distribuição de humidade nas peças de madeira. Por fim, ao atingir-se o teor de humidade final mencionado, ainda é realizado um acondicionamento com uma temperatura de  $70^{\circ}\text{C}$  e uma humidade relativa próxima de 100%, que permitirá uma homogeneidade de humidade nas peças, de forma a recuperar parte do possível colapso que posso ter sido produzido durante o processo. Os autores concluíram que é possível realizar uma secagem da madeira de eucalipto, com espessuras compreendidas entre 15 e 35 mm, em condições razoáveis e com uma boa qualidade final. Uma pré-secagem em câmara é uma opção

vantajosa comparando com o processo tradicional, pela diminuição da existência de rotações como também pela redução do aparecimento de defeitos.

Vázquez (2007) apresentam um estudo sobre a classificação estrutural da madeira de *Eucalypto globulus*, por ter vindo a ser valorizada como elemento estrutural desde o século XIX. A caracterização estrutural foi feita através da classificação visual, realizada segundo a norma UNE 56.546.2007 (“*Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural: Madera de frondosas*”) que define para a madeira serrada de eucalypto de proveniência espanhola uma única qualidade, MEF, a que atribui uma classe resistente D40. Assim, é possível confirmar as excelentes propriedades mecânicas da madeira. Esta norma é aplicável a madeira de *Eucalypto* serrada com dimensões superiores a 60x200 mm. No quadro seguinte são apresentados os valores dos resultados obtidos nos ensaios de classificação estrutural da madeira do referido estudo.

Quadro 2.3 – Propriedades da classificação estrutural (Vázquez, 2007)

<b>Propriedades</b>	
<b>Resistência característica à flexão</b>	47 N/mm <sup>2</sup>
<b>Módulo de elasticidade paralelo médio</b>	18400 N/mm <sup>2</sup>
<b>Módulo de elasticidade paralelo 5º percentil</b>	13500 N/mm <sup>2</sup>
<b>Densidade média</b>	797 kg/m <sup>3</sup>
<b>Densidade 5º percentil</b>	672 kg/m <sup>3</sup>

## 3 MATERIAL

### 3.1 Introdução

No presente capítulo irá ser abordada a classificação visual da amostra de madeira de eucalipto em estudo, a qual se iniciará com a caracterização de todos os defeitos presentes na madeira. O processo de caracterização visual é elaborado através do que se encontra preconizado na norma prEN 1310 (CEN, 1995), onde se indica o modo de proceder tendo em vista a medição de todas as características essenciais para uma classificação visual correta. Após contabilizadas todas as características dos elementos de madeira, procede-se à classificação visual. A classificação visual tem de respeitar o enunciado pela norma EN 14801-1 (CEN, 2005), onde são estabelecidos os critérios principais que devem ser observados na classificação de madeira para aplicações estruturais. Este capítulo é dividido em subcapítulos, de forma a clarificar a organização e compreensão dos dados apresentados, e onde são apresentados os resultados obtidos.

No subcapítulo 3.2 irá ser descrita a amostra de peças analisadas no estudo, com divisão em lotes de modo a homogeneizar as peças. No subcapítulo 3.3 são abordados todos os defeitos contabilizados para a caracterização visual das peças, este subcapítulo irá ser subdividido de forma a analisar cada defeito individualmente. Por fim no subcapítulo 3.4, é realizada a classificação visual das peças de madeira.

### 3.2 Amostra analisada

O estudo incidiu sobre uma amostra composta por 50 peças de madeira de eucalipto (*Eucalyptus globulus*). Verificou-se que na amostra existiam 10 peças que tinham um comprimento real inferior a 2000 mm, o que não cumpria com os requisitos impostos pela norma EN 1310 (CEN, 1995). Mas para a determinação da resistência em valores característicos numa amostra de madeira tem que ser considerado no mínimo uma amostra de 40 peças. Por este motivo a amostra foi analisada em conjunto e considerado um comprimento nominal de 2000 mm. Existe um desvio médio de 97,88 mm do comprimento real para o comprimento nominal, pois a média dos comprimentos reais é de 2097,88 mm. No Quadro 3.1 é apresentada a amostra com o respetivo comprimento nominal.

Quadro 3.1- Caracterização do lote

<b>Lote</b>	<b>N</b>	<b>Comprimento [mm]</b>
1	50	2000

As dimensões das seções transversais das peças, para efeitos de cálculo, são correspondentes à média das dimensões medidas em três secções diferentes das peças analisadas, em cada um dos topos e na zona central, para se ter em conta as variações dimensionais devido às tolerâncias de fabrico e preparação da peça.

### **3.3 Caracterização Visual da amostra**

#### **3.3.1 Introdução**

A caracterização visual da amostra de madeira de eucalipto seguiu os pressupostos descritos na norma prEN 1310 (CEN, 1995). Para esta caracterização foram analisadas as características da madeira (massa volúmica e presença de medula), os defeitos naturais da madeira (nós, inclinação do fio, casca inclusa), os defeitos surgidos devido ao corte (descaio) e os defeitos provenientes das alterações da madeira (empenos, fendas). No caso do eucalipto, por ser uma madeira de origem folhosa, não se teve em conta a contabilização das bolsas de resina, mesmo podendo haver presença de kino, definido no subcapítulo 2.4. Todos os parâmetros mencionados foram analisados detalhadamente, uma vez que a sua presença irá influenciar as propriedades mecânicas da madeira.

#### **3.3.2 Nós**

A existência de nós no tronco é um processo natural das árvores. Os nós são o resultado do desenvolvimento e crescimento das ramificações presentes no tronco. Os nós, como referido por Balsa (2013), podem ser considerados agrupados sempre que dois ou mais nós se encontram tão próximos que as fibras envolventes estão infletidas em torno do grupo por eles formado. No caso de não se verificar este fenómeno, o nó é analisado isoladamente, sendo denominado de nó isolado. Os nós isolados também podem ser classificados consoante a sua forma, como nó redondo (*round*), nó oval (*oval*), nó de aresta (*arris*), nó em espiga (*spike*) e nó separado (*splay*).



Figura 3.1- Nó redondo e nó oval (CEN, 1995)

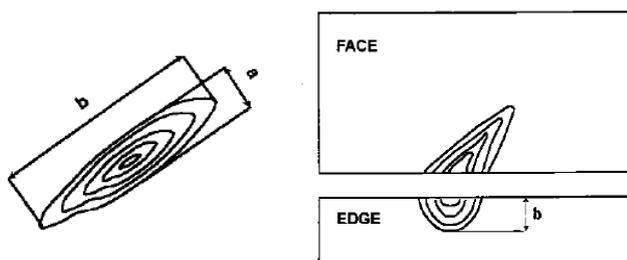


Figura 3.2- Nó *Spike* e nó *splay* (CEN, 1995)

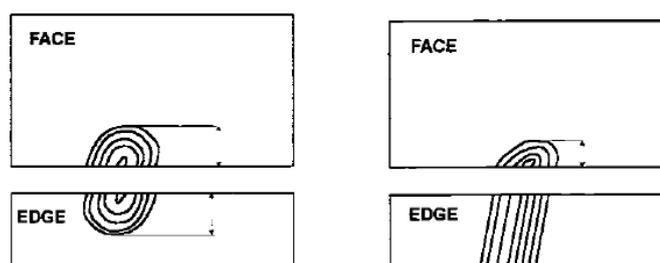


Figura 3.3- Nó *Arris* (CEN, 1995)

As principais consequências que podem surgir, aquando da presença de nós, são o desvio do fio da madeira, a orientação ortogonal das fibras e a descontinuidade dos tecidos na ocorrência da morte do ramo. Como enunciado por Balsa (2013), devido à elevada anisotropia da madeira, que é traduzida aproximadamente por uma resistência à tração na direção normal às fibras permite concluir que, quer sejam nós isolados ou em grupo, soltos ou buracos de nós, a contribuição destes para a resistência mecânica da seção transversal correspondente pode ser considerada desprezável. Uma vez que o aparecimento de ramos numa árvore é inevitável, o aparecimento de nós torna-se também inevitável nos elementos de madeira. O aparecimento de nós é um fator negativo para a resistência mecânica, pois podem ser responsáveis por uma diminuição da resistência da madeira.

Para se proceder à avaliação dos nós segue-se o que está preconizado na norma prEN 1310 (CEN, 1995), que estabelece dois métodos distintos: método geral e método alternativo. Nesta avaliação foi seguido o que está descrito no método alternativo, que considera que os nós se

encontram presentes nas faces ou nos cantos onde aparecem cortados transversalmente ou obliquamente, medindo perpendicularmente ao eixo longitudinal da peça, a largura do nó ou grupo de nós. Esta medição foi determinada pelo diâmetro do nó na direção perpendicular ao eixo longitudinal da peça, em cada elemento, encontrando-se os resultados obtidos registados no Quadro 3.2.

Quadro 3.2-  $d_{nó}$  [mm]

Lote	N	Nº peças c/nós	$d_{nó}$ [mm]			
			Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo
1	50	11	21,29	18,20	78,64	3,28

Ao analisar os resultados obtidos verifica-se que a presença de nós na amostra é reduzida, tendo-se obtido apenas 11 peças com nós, como também as duas dimensões. Este era um resultado previsível, uma vez que a madeira de eucalipto apresenta geralmente poucas ramificações na parte inferior da árvore, sendo o seu aparecimento mais significativo na parte superior.

### 3.3.3 Bolsas de Resina (Kino)

A madeira de origem folhosa não apresenta, geralmente, bolsas de resina, pois esta é uma característica representativa das madeiras resinosas, mas algumas espécies de folhosas podem de facto apresentar bolsas de goma. Estas bolsas, resina ou goma, são criadas dentro de uma camada de crescimento da madeira, que contém a resina ou a goma mais ou menos cristalizadas. Na madeira de eucalipto verifica-se a presença de bolsas de goma, uma vez que há o aparecimento de kino, estando definido no subcapítulo 2.4. O kino pode formar-se em canais ou bolsas que se dispõem tangencialmente ao longo do anel de crescimento. Em árvores de *E. globulus* o aparecimento de kino ocorre frequentemente junto a zonas de cicatrização e recobrimento de nós.

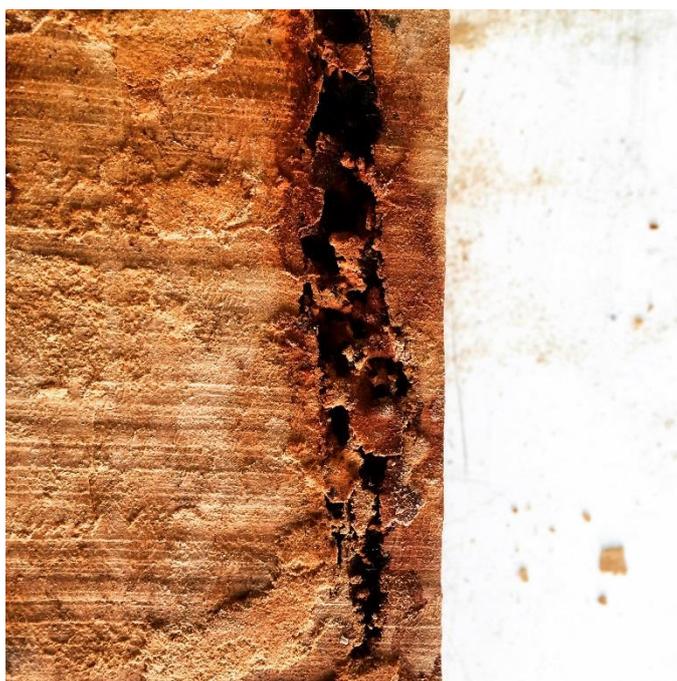


Figura 3.4 – Presença de Kino

A avaliação das bolsas de resina pode ser feita por dois métodos: num primeiro método é medido o eixo maior da cavidade da bolsa, expressa em milímetros, e registando o seu valor por metro de comprimento da peça ou por todo o comprimento da peça; no segundo método não é necessária a medição, registando-se apenas a sua presença. Estes métodos são os descritos na norma prEN1310 (CEN, 1995). Para esta avaliação foi utilizado o segundo método, tendo sido registadas as peças com presença de bolsas de kino, porque as peças apresentaram poucas bolsas.

Quadro 3.3- Peças com presença de kino

Lote	N	Presença de Kino
1	50	4

#### 3.3.4 Fio

O fio da madeira traduz-se no arranjo longitudinal dos elementos fibrosos constituintes do lenho, ou seja, o seu alinhamento relativamente ao eixo do tronco da madeira. (Carvalho, 1996) A avaliação do fio da madeira é feita com o auxílio de uma ferramenta, designada por riscador (Figura 3.5). O riscador é constituído por uma haste de manivela com um punho giratório numa das extremidades e uma agulha na outra, para definir um ligeiro ângulo por arraste. Tem como objetivo desenhar ao longo da peça de madeira, na direção aparente do fio, aplicando pressão mas de forma não excessiva, mostrando a precisão do fio com a linha que risca. É recomendado,

pela norma prEN1310 (CEN, 1995), desenhar várias linhas adjacentes com a direção de tração divergindo para a esquerda e para a direita, e o riscador deve seguir a direção correta.

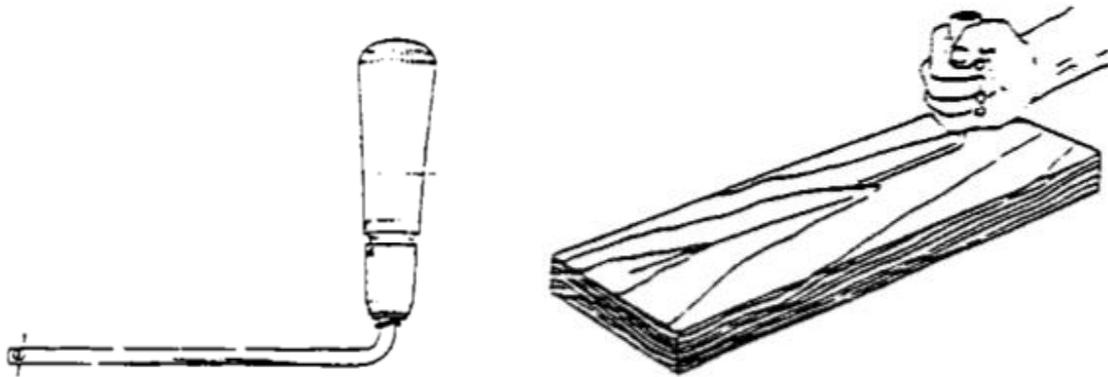


Figura 3.5- Riscador e modo de utilização (CEN, 1995)

Para a determinação do valor do fio foi tida em conta uma distância suficientemente grande, neste caso assumida com um comprimento superior a 10 cm, de forma a possibilitar a determinação da inclinação do fio. Nas secções onde foram determinados os valores da inclinação do fio não estavam presentes outro tipo de defeitos, como por exemplo nós ou fendas, pois este tipo de defeitos provoca uma alteração na orientação das fibras e na avaliação de cada defeito presente na peça, já contabilizado. A inclinação do fio, em percentagem, é determinada através da seguinte fórmula:

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

As incógnitas presentes na equação (3.1), X e Y, são o desvio que as fibras que fazem ao longo de um determinado comprimento, como representado na Figura 3.6. O valor destas duas incógnitas foi medido em milímetros.

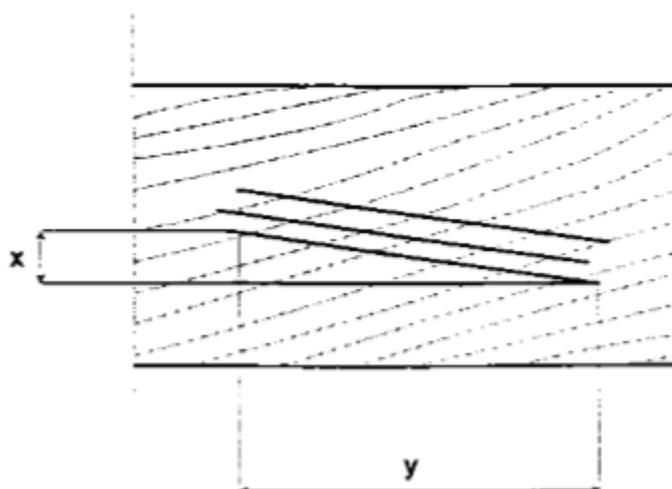


Figura 3.6- Medição da inclinação do fio (CEN, 1995)

No quadro seguinte são apresentados os valores correspondentes à inclinação do fio, na secção da peça onde essa inclinação era maior.

Quadro 3.4- Inclinação do fio [%]

Lote	N	Inclinação do fio [%]			
		Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo
1	50	4,69	8,58	60,29	0,18

### 3.3.5 Taxa de Crescimento

A taxa de crescimento é a característica visual que evidência as camadas de crescimento, ou seja, que expressa a espessura dos anéis de crescimento. Para a avaliação deste parâmetro, a norma prEN1310 (CEN, 1995) sugere traçar uma linha reta normal aos anéis de crescimento, em cada uma das extremidades da peça, e contar o número de anéis existentes ao longo dessa linha. No caso da existência de medula na peça, a mesma norma define que se devem contabilizar os anéis após um raio de 25 mm, com o centro na medula.

No caso particular da madeira de eucalipto esta avaliação visual torna-se um processo com algumas dificuldades, uma vez que os anéis não se encontra perfeitamente definidos. Este fenómeno ocorre devido ao crescimento rápido que este tipo de árvores tem, por este motivo a diferenciação celular persiste de forma muito suave na variação ao longo de todo o ciclo, sem marcada paralisação, de forma sistemática. A variação nesta espécie está principalmente

relacionado com a presença de água no solo e não com a temperatura, em períodos de seca pode ocorrer o aparecimento de falsas camadas de crescimento, o que pode induzir em erro, a contabilização de dois ciclos de vida que na realidade só se traduz em um. (Carvalho, 1996) Como enunciado por Bermúdez Alvite (2002) a madeira pode apresentar anéis de crescimento anuais e também estacionais, sendo os primeiros largos e de difícil identificação. Por estes motivos este parâmetro não foi contabilizado para a caracterização visual, devido à sua difícil identificação.

### 3.3.6 Casca Inclusa

A casca inclusa pode surgir numa árvore quando há a junção de ramos (em forma de V ou U), ou no aparecimento de galhos, pois a base desses mesmos ramos ou galhos é coberta pela formação de casca, dando uma aparência de solidez mas que na verdade possui casca inclusa. A casca de uma árvore caracteriza-se por ser constituída por inúmeros tecidos, que têm várias funções na árvore, sendo o principal a proteção do tronco, impedindo a secura e os ataques de fungos ou insetos. Em zonas que possa existir casca inclusa, essas zonas têm uma menor resistência comparativamente com a restante peça, pois a casca tem uma grande anisotropia, pequena resistência, grande tendência para amolecimento térmico, baixa densidade e teor alto e variável em extrativos e humidade. (Pereira, 2010)

A norma prEN1310 (CEN, 1995) enuncia que a casca inclusa é medida por uma área retangular, que inclua a casca, expressa em mm. No caso de existir mais do que uma bolsa de casca na mesma peça, é apresentado o valor total das áreas. No

Quadro 3.5 são apresentados os resultados da presença de casca inclusa na amostra.

Quadro 3.5- Casca inclusa [mm<sup>2</sup>]

Lote	N	Casca inclusa [mm <sup>2</sup> ]				
		Nº peças	Média	Desvio padrão	Máximo	Mínimo
1	50	7	23787,32	30112,89	70249,34	41,51

### 3.3.7 Descaio

O descaio de uma peça de madeira é considerado como um defeito de laboração, sendo caracterizado como uma porção remanescente da superfície do toro que deu origem à peça de madeira serrada. (Carvalho, 1996, Balsa, 2013) Este defeito tem como consequência um incumprimento das dimensões nominais, que pode também provocar uma redução da capacidade mecânica, sendo um fator desprezável por se tratar de uma perda relativamente baixa. Aumenta o desperdício para aplicação das peças em serviço, tal como também tem influência na fixação, apoio ou colagem entre os elementos de madeira.

A avaliação deste parâmetro pela norma prEN1310 (CEN, 1995) é feita através da medição do comprimento do descaio ( $c_1, c_2, \dots, c_n$ ), expresso em cm ou como percentagem do comprimento, no caso de o descaio se encontrar em mais do que uma parte da aresta, devem-se somar os comprimentos diferentes. Também se deve medir a largura do descaio na face ou canto, expresso em mm ou como fração decimal, utilizando as equações (3.2) e (3.3).

$$w_f = \frac{a - a_1}{a} \quad (3.2)$$

$$w_e = \frac{b - b_1}{b} \quad (3.3)$$

As incógnitas das equações (3.2) e (3.3) são apresentadas na Figura 3.7, onde os seus valores são expressos em mm e em cm, como descrito anteriormente.

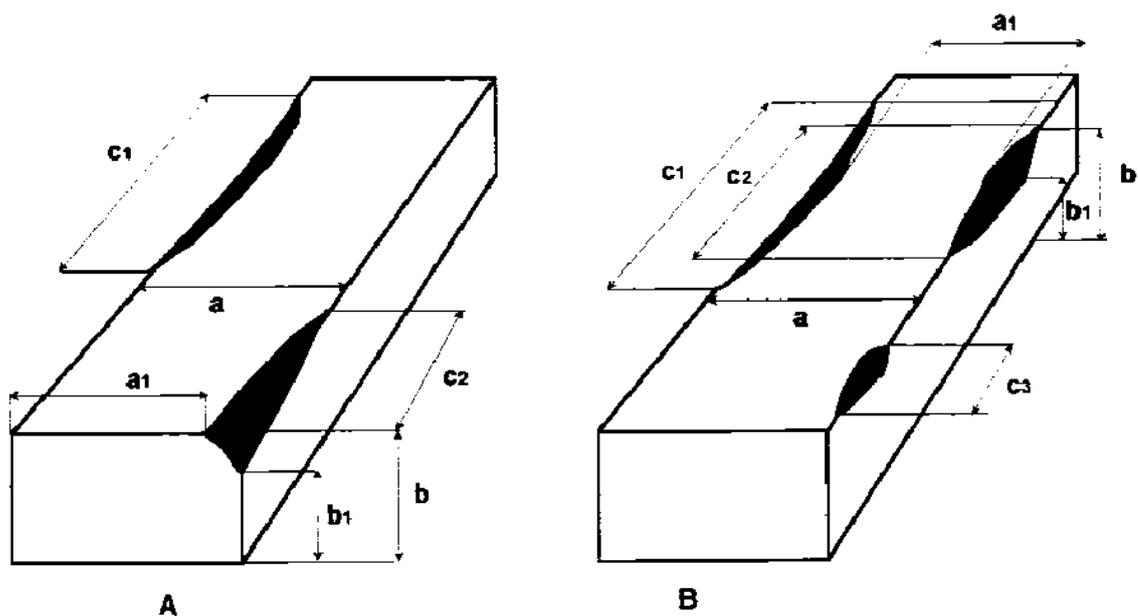


Figura 3.7- Descaio (CEN, 1995)

Os resultados da avaliação do descaio na amostra, encontram-se representados no Quadro 3.6.

Quadro 3.6- Presença de descaio

Lote	N	Presença de descaio		
		c (cm)	we total	wf total
1	50	195,38	1,209	0,120

### 3.3.8 Fissuras

A ocorrência de fissuras na madeira de eucalipto pode estar associada às operações de secagem ou às operações de corte. Durante o processo de secagem enquanto os toros ainda se encontram verdes, existem variações dimensionais que incluem retrações e abertura de fendas e fraturas radiais. Estes fenómenos são originados por uma diminuição do teor de água na madeira mas também, e principalmente, das forças de tração que surgem no toro como alívio das tensões de crescimento. Para a espécie de *E. globulus* a presença de água é influenciada pela época de corte, tendo um teor de água superior no Inverno e inferior no Verão, sendo 110% e 80% respetivamente. De forma a evitar o aparecimento de fendas devido à secagem da madeira é necessário um controlo rigoroso durante este processo. (Pereira, 2010) No caso de fendas originadas pelo corte de madeira serrada, o eucalipto também necessita de um cuidado rigoroso. O corte do *E. globulus* é condicionado pelas elevadas tensões de crescimento, uma vez que, aquando da árvore viva, as tensões iniciais de crescimento se encontram totalmente equilibrados, durante o corte da madeira estas libertam-se repentinamente. (Bermúdez Alvite, 2002)

A avaliação deste defeito é muito importante porque, associado a outros defeitos que possam estar presentes na peça, pode reduzir consideravelmente a resistência dessa mesma peça. Para a avaliação é medido o comprimento da fissura, delimitada a uma distância entre duas linhas normais em relação ao eixo longitudinal da peça. No caso de estar presente um aglomerado de fissuras, que é designado quando no decorrer de uma fissura existir o aparecimento de outra, ou várias fissuras numa peça, é determinado o comprimento total, sendo este resultado é expresso em mm.

Quadro 3.7- Fissuras

Lote	N	Fissuras						
		Nº de fissuras/grupo fissuras		Lf [mm]				
		Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo	Total
1	50	2,18	1,69	190,51	224,29	1388	21	20766

### 3.3.9 Empenos

Os empenos são distorções das peças de madeira provocando desvios dos seus planos originais. Estão associados também a problemas na secagem e no corte, originando deformações devido às variações dos teores de água, principalmente na madeira de eucalipto, por ser uma espécie de crescimento rápido, devido à sua anisotropia. A avaliação dos empenos é elaborada por motivos de funcionalidade e por dificuldades de aplicação das peças de madeira em obra.

Os empenos são contabilizados devido ao seu tipo de formação na peça: em arco de face, em arco de canto, em hélice e em meia-cana. A contabilização de empenos em arco de face, arco de canto e em hélice, é feita medindo a distorção máxima ao longo de um comprimento de 2 metros, enquanto para empenos em meia-cana é medida a distorção máxima ao longo da largura da peça, com valores expressos em mm. Nas figuras (Figura 3.8 e Figura 3.9) são representados os diferentes tipos de empenos e o modo como são contabilizados.

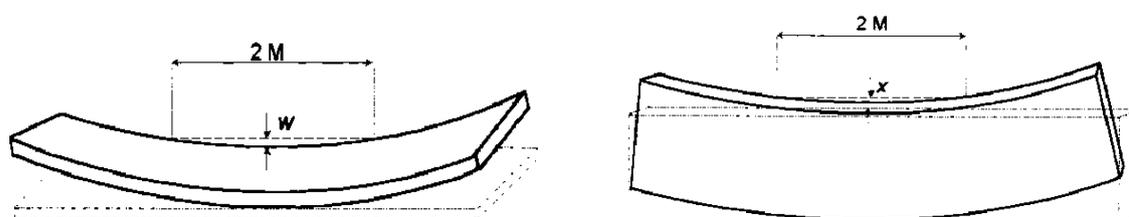


Figura 3.8- Empeno em arco de face e empeno em arco de canto (CEN, 1995)

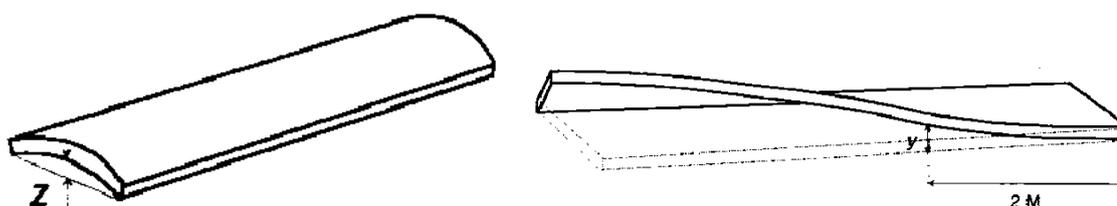


Figura 3.9- Empeno em meia-cana e empeno em hélice (CEN, 1995)

Quadro 3.8- Empenos (Eyle)

		Empenos							
		Arco de face		Arco de canto		Hélice		Meia-cana	
Lote	N	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
1	50	8,52	5,67	7,00	3,82	8,38	5,14	0,02	0,11

### 3.4 Classificação visual da amostra

A classificação visual de uma peça de madeira tem como principal objetivo classificar a madeira em classes de qualidade, limitando todos os defeitos que influenciam essa qualidade na aplicação estrutural. Como para a madeira de eucalipto não existe nenhuma norma específica de classificação visual, a sua classificação irá ser feita recorrendo ao especificado pela norma EN 14081-1 (CEN, 2005), a qual apresenta princípios básicos os quais devem ser seguidos de forma a se estabelecer requisitos mínimos em algumas características na classificação visual. Esta norma distingue a classificação da madeira entre duas classes de qualidade de referência, uma como classe de qualidade inferior ou igual à classe de resistência C18 e outra como superior a C18, esta distinção é feita através de diferentes limites imposto pela norma. As características que são contabilizadas pela norma para o processo da classificação visual são o comprimento máximo de fissuras, o máximo de empenos ao longo da peça, o descaio, as podridões, os danos causados por insetos, os defeitos anormais, os nós e o fio. Nas peças analisadas não foram detetados defeitos provenientes de podridões, ataque de insetos e defeitos anormais, pelo que não foram inseridos nos resultados apresentados. Os resultados obtidos apresentam-se no Quadro 3.9.

Quadro 3.9- Classificação Visual da amostra

	<b>Lote (N=50)</b>		
	Ignoradas	≤C18	>C18
<b>Máx. comprimento de fissuras</b>	12	0	38
<b>Máx. empenos [mm] ao longo de 2m de comprimento</b>	<b>Arco de face</b>		
	Rejeitadas	≤C18	>C18
	2	0	48
	<b>Arco de canto</b>		
	Rejeitadas	≤C18	>C18
	5	0	45
	<b>Hélice</b>		
	Rejeitadas	≤C18	>C18
	33	0	17
	<b>Meia-cana</b>		
S/restricção			

Descaio	10 aceites		
	Nó de face	Rejeitadas	≤C18
3		0	47
Nó de canto	Rejeitadas	≤C18	>C18
	5	0	45
Fio	Rejeitadas	≤C18	>C18
	1	0	49

Como se pode observar no Quadro 3.9, onde estão apresentados os resultados da classificação visual da amostra analisada, pode constatar-se que os valores de referência de classificação são referentes a classe C, classe que se destina a madeira do tipo resinosa. Assim, como a madeira de eucalipto é uma espécie de madeira do tipo folhosa a sua classe deveria ser D, mas como estes dados são apenas valores de referência, não se está a atribuir uma classe à madeira analisada. Para que se consiga observar a classe a que a madeira analisada poderá pertencer foi realizada uma análise comparativa da classe C com a classe D. Os elementos classificados como classe inferior a C18 relativamente à madeira folhosa não são considerados aptos para aplicação estrutural, uma vez que a menor classe regulamentada é D30. Assim no caso dos elementos classificados como superiores a C18, seriam correspondentemente classificados como uma classe D30 ou outra classe superior.

O maior número de peças rejeitadas é devido-se a empenos e fissuras. Estes defeitos surgem na madeira devido aos processos de secagem e de corte, na amostra analisada verificou-se que esses defeitos foram influenciados, possivelmente, por problemas na secagem e corte da madeira.

## 4 ENSAIOS EXPERIMENTAIS

### 4.1 Introdução

No capítulo seguinte é feita a análise não destrutiva e destrutiva das peças em estudo. A análise não destrutiva é feita através de dois ensaios dinâmicos realizados por acelerómetros, com o aparelho comercial *Timber Grader* MTG e Acelerómetro laboratorial, onde são determinados duas grandezas essenciais para a determinação da resistência dinâmica de cada elemento. As grandezas determinadas são a frequência própria de vibração, expressa em Hz, e o módulo de elasticidade dinâmico, em MPa. Para complementar a análise não destrutiva é realizado um ensaio estático que determina dois módulos de elasticidade estáticos, local e global. A análise destrutiva é feita recorrendo a um ensaio estático, onde é determinada a resistência à flexão das peças. Para uma análise mais detalhada de cada ensaio, este capítulo foi subdividido em subcapítulos, abordando separadamente cada ensaio dinâmico e por fim uma comparação dos resultados obtidos.

### 4.2 Ensaios dinâmicos

#### 4.2.1 Introdução

No presente subcapítulo irá proceder-se à descrição dos ensaios dinâmicos realizados na análise da amostra. Os ensaios dinâmicos utilizados têm como objetivo a determinação da frequência própria de vibração e o módulo de elasticidade dinâmico, através da vibração longitudinal em elementos de madeira. De forma a determinar estes parâmetros efetuaram-se dois métodos de ensaio, com a mesma base de ensaio a vibração longitudinal, o primeiro recorrendo ao aparelho comercial *Timber Grader* MTG e o segundo através do Acelerómetro.

#### 4.2.2 Timber Grader MTG

O ensaio recorrendo ao equipamento comercial *Timber Grader* MTG é um ensaio dinâmico de vibração longitudinal, que permite uma avaliação não destrutiva das peças de madeira. Através deste ensaio são determinados o módulo de elasticidade dinâmico e a frequência própria de vibração. O procedimento utilizado neste ensaio consiste na colocação do equipamento contra uma face da secção transversal da peça, de preferência o mais uniforme possível, onde irá ser disparada uma esfera que provoca uma frequência própria de vibração e em que a resposta

dinâmica é medida pelo aparelho através de um sensor. O módulo de elasticidade dinâmica é medido através da relação do valor da frequência própria de vibração e dos dados que são inseridos previamente, como as dimensões transversais e o comprimento da peça, a espécie de madeira em estudo, a massa da peça e o teor de humidade. De forma a evitar leituras de valores diferentes e resultados não precisos, podendo ser influenciados pela presença de defeitos ou outros fatores, foram feitas várias leituras, de forma a serem obtidos os mesmos resultados em três leituras consecutivas. Na Figura 4.1 é representado o modo de utilização do equipamento *Timber Grader MTG*.



Figura 4.1- Equipamento *Timber Grader MTG*

A determinação da massa dos elementos de madeira foi realizada através uma balança, onde foram pesadas as peças individualmente. A determinação do teor de humidade é feita através de um equipamento designado por humidímetro de agulhas, que determina este parâmetro pela condutividade elétrica entre as duas agulhas, o procedimento foi realizado segundo o descrito na norma europeia EN 13183-2(CEN, 2002b). A Figura 4.2 ilustra como proceder à utilização do equipamento.



Figura 4.2- Equipamento para medição do teor de água

A medição do teor de humidade foi feita em três secções de cada peça, a pelo menos 30 cm de cada topo e a meio da peça, o valor obtido pelo equipamento vem expresso em percentagem. O valor inserido no equipamento *Timber Grader* MTG foi o valor médio dessas três leituras. Na Figura 4.3 são apresentados os teores de água presentes no lote, através de um gráfico de frequência. No Quadro 4.1 são apresentados os valores correspondentes às dimensões, massa e teor de água.

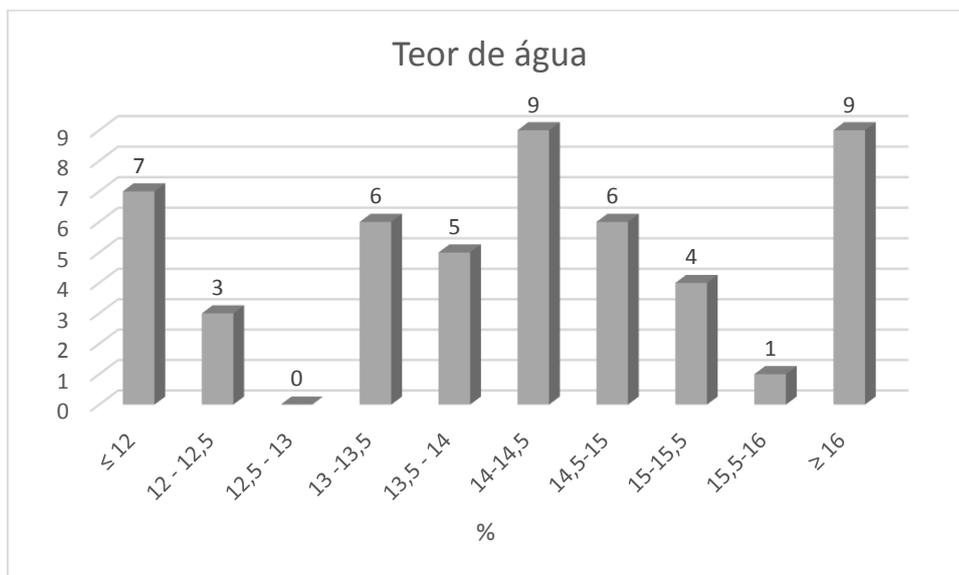


Figura 4.3- Teor de água (%)

Quadro 4.1- Dimensões [mm], Massa [kg] e Teor de água [%]

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	73,34	2,29	75,15	2,09	2097,88	109,78	10,39	1,01	14,18	1,67

Os resultados obtidos pelo aparelho comercial *Timber Grader* MTG relativo à frequência própria de vibração, em Hz, e o módulo de elasticidade dinâmico em MPa, são representados no Quadro 4.2.

Quadro 4.2 – Frequência própria de vibração [Hz] e módulo de elasticidade dinâmico [MPa] através do aparelho comercial *Timber Grader* MTG

Lote	N	<i>Timber Grader</i> MTG							
		Frequência Própria de Vibração [Hz]				Módulo de Elasticidade Dinâmico [MPa]			
		Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo	Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo
1	50	1008,50	122,35	1283,00	698,00	15308,46	2510,74	19858,00	8399,00

O módulo de elasticidade está diretamente relacionado com a presença de defeitos, como nós e fissuras, por exemplo. Isto permite concluir, observando no Quadro 4.2 os valores máximos e mínimo, que o módulo de elasticidade pode estar a ser afetado pela presença de defeitos.

#### 4.2.3 Acelerómetro

O ensaio realizado através do acelerómetro é também um ensaio dinâmico de vibração longitudinal. O procedimento deste ensaio consiste na aplicação de uma vibração longitudinal, induzindo uma leve pancada com o auxílio de um martelo, num dos topos da peça. No outro topo é colocado o aparelho de medição, designado por acelerómetro, que irá registar a resposta dinâmica. A resposta dinâmica é então trabalhada num programa, o *LabView Signal Express*, que permite determinar a frequência própria de vibração. Uma vez que a partir deste ensaio só é possível a determinação da frequência própria de vibração, o módulo de elasticidade dinâmica é determinado através da seguinte equação.

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

Na **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** é demonstrado o modo de utilização deste tipo de aparelho para a determinação da frequência própria de vibração.



No Quadro 4.3 são apresentados os resultados obtidos relativos à determinação da frequência própria de vibração [Hz] e do módulo de elasticidade dinâmico [MPa], para o lote em estudo, através do acelerómetro.

Quadro 4.3 – Frequência própria de vibração [Hz] e Módulo de elasticidade dinâmica [MPa] através do acelerómetro

		<i>Acelerómetro</i>							
		Frequência Própria de Vibração [Hz]				Módulo de Elasticidade Dinâmico [MPa]			
Lote	N	Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo	Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo
1	50	995,21	120,70	1267,80	685,95	15631,05	2782,50	20888,17	7879,68

À semelhança dos resultados obtidos pelo aparelho *Timber Grader* MTG, os resultados obtidos pelo acelerómetro laboratorial também demonstram que os elementos têm uma variação nos valores do módulo de elasticidade, pois é uma variação natural e que tende sempre a ocorrer. Novamente pode ser constatado que há elementos do lote em análise que têm uma maior presença de defeitos.

### 4.3 Comparação dos resultados

Com o intuito de se poder observar as diferenças que podem ocorrer entre os resultados obtidos por ambos os ensaios (*Timber Grader* MTG e Acelerómetro), foi feita uma comparação dos resultados obtidos, tanto para a frequência própria de vibração como para o módulo de elasticidade dinâmico.

Quadro 4.4 – Comparação dos resultados entre *Timber Grader* MTG e Acelerómetro

Lote	N	$f$ [Hz]	$f$ [Hz]	$\Delta f$ [Hz]	$E_{m,dym}$ [MPa]	$E_{m,dym}$ [MPa]	$\Delta E_{m,dym}$ [MPa]
		MTG	Acelerómetro		MTG	Acelerómetro	
		Média			Média		
1	50	1008,50	995,21	13,29	15308,46	15631,05	-322,59

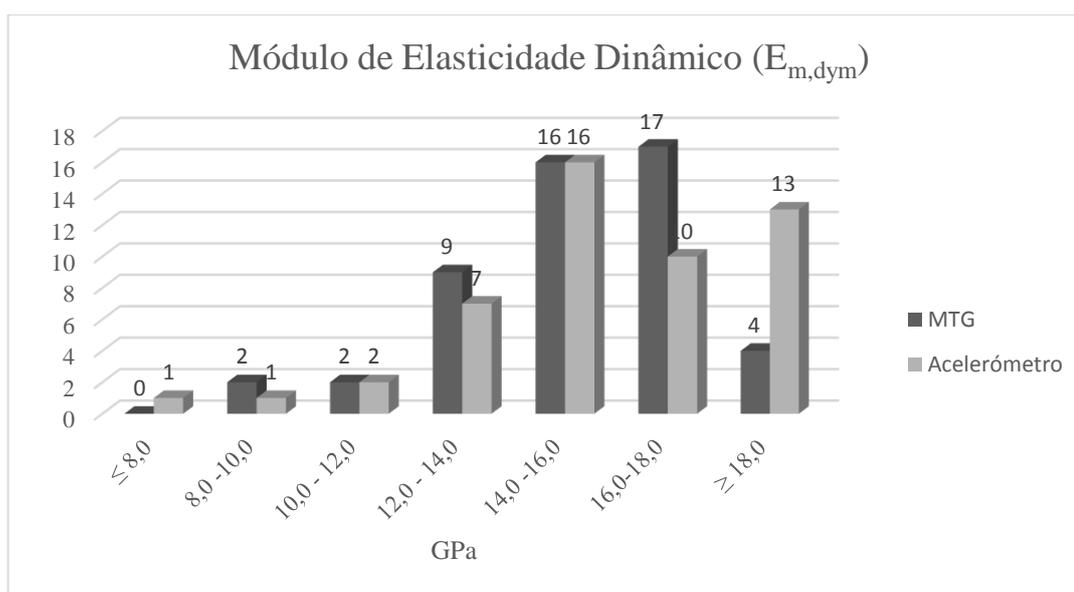


Figura 4.4 – Comparação dos módulos de elasticidade dinâmicos ( $E_{m,dym}$ ) (GPa)

Como se pode observar relativamente à frequência própria de vibração, os resultados obtidos pelo ensaio *Timber Grader* MTG são ligeiramente superiores aos obtidos pelo Acelerómetro. Enquanto que para o módulo de elasticidade dinâmico são inferiores, com uma variação média de 322,59 MPa do módulo de elasticidade determinado pelo Acelerómetro, esse facto deve-se a ser contabilizado o teor de água, com um valor médio de 14,2%, no decorrer do ensaio *Timber Grader* MTG, o que leva a diminuição deste parâmetro. Na Figura 4.4 é apresentado a comparação dos módulos de elasticidade dinâmicos determinados pelo aparelho comercial *Timber Grader* MTG e pelo Acelerómetro laboratorial.

## 4.4 Ensaios estáticos

### 4.4.1 Módulo de elasticidade dinâmico

O módulo de elasticidade dinâmico é determinado de acordo com o descrito na norma europeia EN 408 (CEN, 2012), tratando-se de um ensaio não-destrutivo. A norma descreve dois métodos para a determinação do módulo de elasticidade estático: o primeiro para determinar o módulo de elasticidade global e o segundo para determinar o módulo de elasticidade local. Para a realização do ensaio cumpriu-se o modelo de ensaio descrito na referida norma. Este modelo requer que o esquema seja conforme o anteriormente apresentado na Figura 2.3 e na Figura 2.4. Para o cálculo do módulo de elasticidade global recorreu-se à equação (2.4) e para o módulo de elasticidade local à equação (2.3). Este ensaio consiste na colocação de defletómetros, de acordo com o esquema ilustrado pela norma, que irão medir o deslocamento da peça em estudo provocado pela aplicação de uma força. As imagens seguintes ilustram o esquema de ensaio realizado e a colocação dos defletómetros.

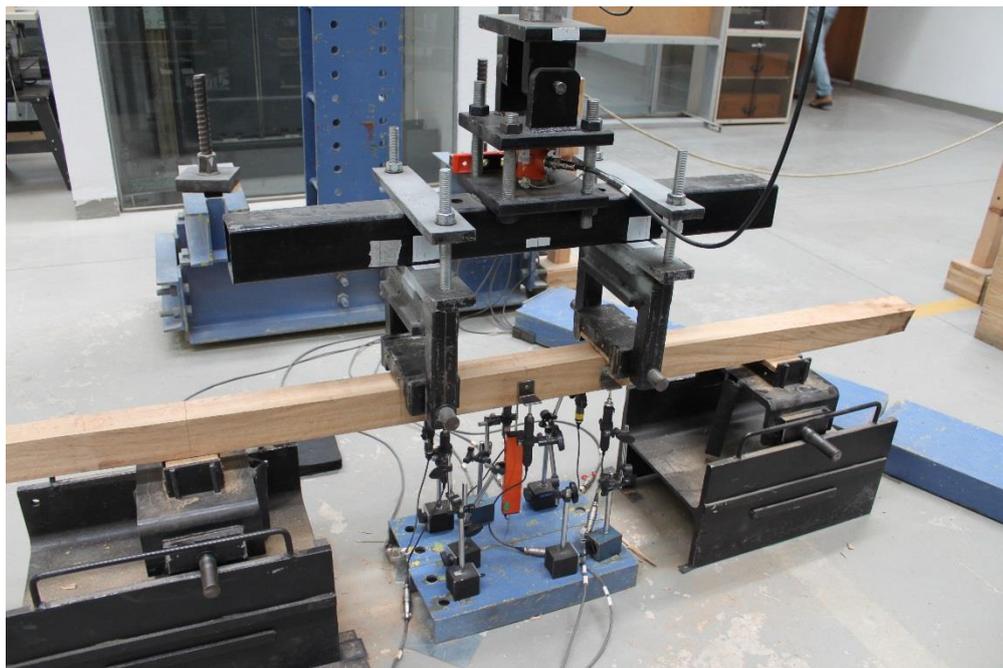


Figura 4.5 – Esquema de ensaio para a determinação de  $E_{m,local}$  e de  $E_{m,global}$

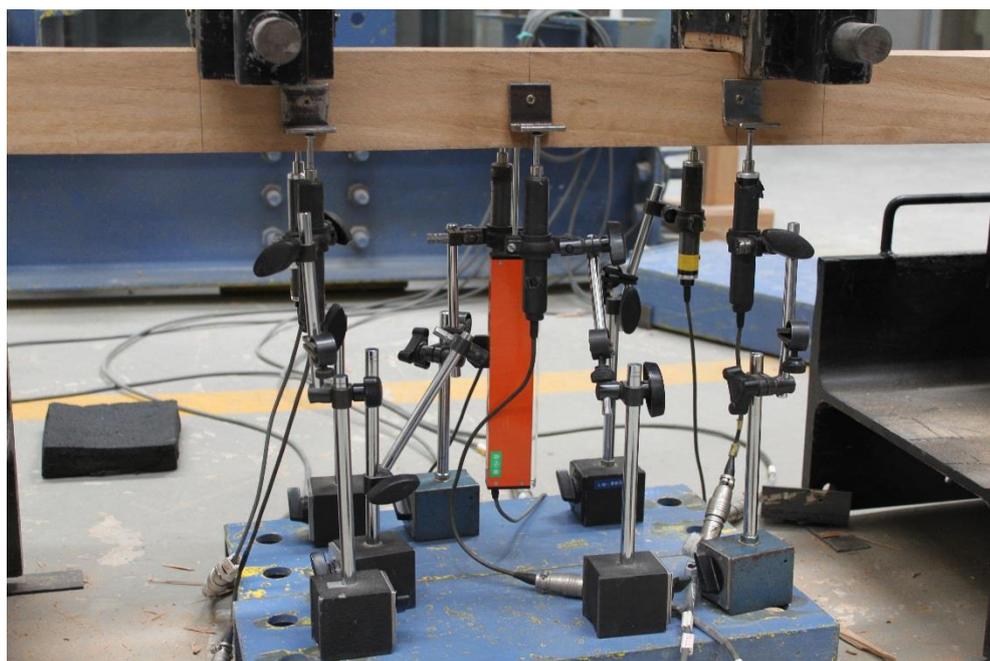


Figura 4.6 – Esquema de colocação dos defletómetros

Para a determinação  $E_{m,local}$  o deslocamento é contabilizado pelos três defletómetros que se encontram de cada lado da peça de madeira, como representado na Figura 4.6. O  $E_{m,global}$  é por sua vez determinado pelo deslocamento fornecido pelo defletómetro que se encontra na parte central da peça, na Figura 4.6. Os resultados obtidos para o  $E_{m,local}$  e  $E_{m,global}$  encontram-se sintetizados no quadro seguinte.

Quadro 4.5 – Resultados do  $E_{m,local}$  e do  $E_{m,global}$  obtidos através do ensaio estático

Lote	N	$E_{m,local}$				$E_{m,global}$			
		Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo	Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo
1	50	17328	3670	25644	8054	15310	2764	23339	7682

Nas Figura 4.7 e Figura 4.8 são apresentados os gráficos de distribuição de frequência referentes aos resultados obtidos para o módulo de elasticidade estático local e para o módulo de elasticidade estático global.

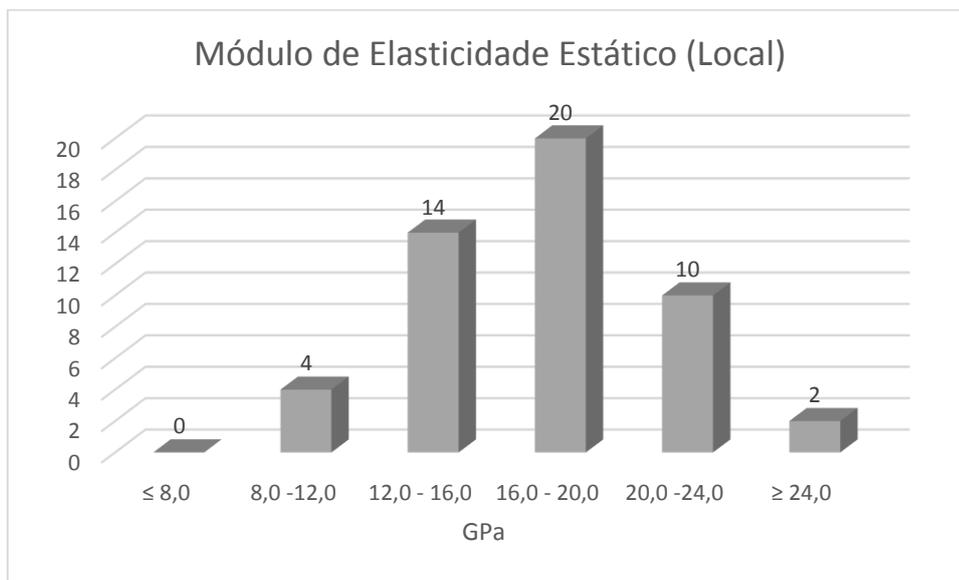


Figura 4.7- Distribuição de frequência do módulo de elasticidade estático local (GPa)

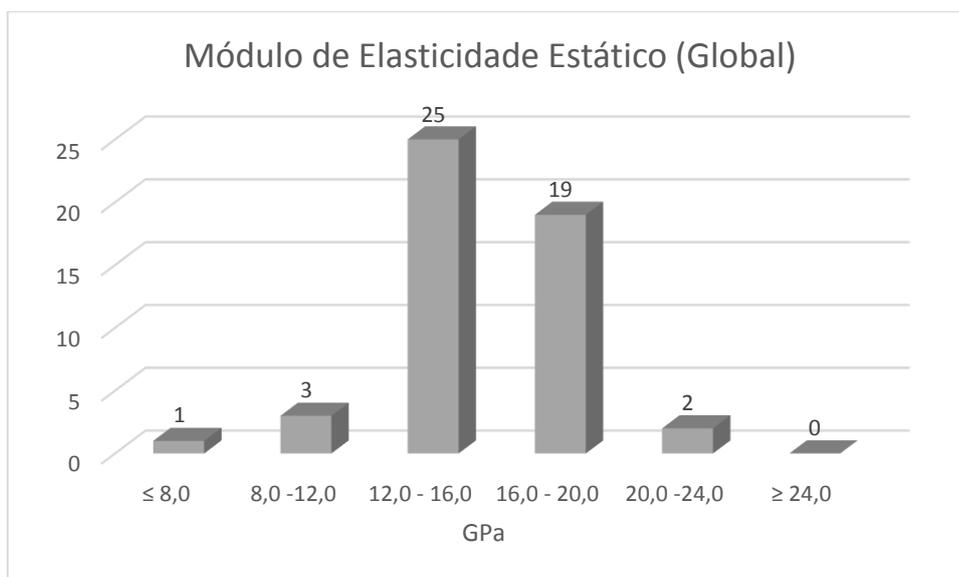


Figura 4.8 – Distribuição de frequência do módulo de elasticidade estático global (GPa)

Como se pode verificar os valores obtidos para o módulo de elasticidade estático local são superiores aos obtidos para o módulo de elasticidade estático global. Esta ocorrência deve-se ao facto de os valores obtidos na medição do módulo de elasticidade estático global serem afetados por defeitos que possam estar presentes na peça, como empenos ou fissuras, como também por se ter tido em consideração o comprimento total da peça e por ter em conta as

deformações por corte. No caso do módulo de elasticidade estático local, só foi considerada a parte central da peça, o que leva a uma diminuição da influência da presença de defeitos. Assim, o módulo de elasticidade estático é, à semelhança do módulo de elasticidade dinâmico, igualmente afetado pela presença de defeitos.

#### 4.4.2 Resistência à flexão

Para a determinação da resistência à flexão das peças de madeira recorreu-se a ensaios destrutivos, segundo o preconizado pela norma EN 408 (CEN, 2012). O esquema de ensaio foi o mesmo já utilizado para a medição do módulo de elasticidade estático local e global, como apresentado na Figura 4.9. Inicialmente é estimada uma tensão de rotura da peça, tendo em conta os valores do módulo de elasticidade dinâmico, sendo esta a que é aplicada à peça. Este ensaio consiste na aplicação de uma carga, aplicada de forma simétrica em dois pontos, com um acréscimo gradual, até à rotura da peça de madeira. Após ser atingido o ponto de rotura, é conhecida a força resistente da peça, que permite determinar a resistência à flexão da mesma,  $f_m$ .

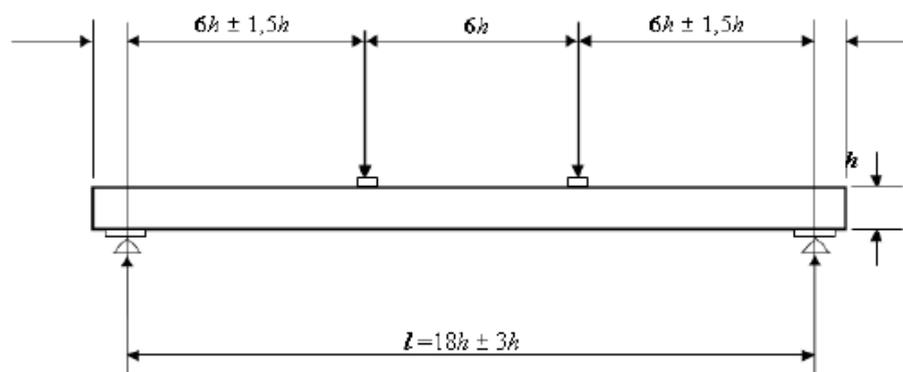


Figura 4.9 – Esquema de ensaio para a medição da resistência à flexão (CEN, 2012)

A norma europeia EN 408 (CEN, 2012) enuncia a seguinte expressão para a determinação da resistência à flexão, expressa em newtons por milímetro quadrado:

$$f_m = \frac{3Fa}{bh^2} \quad (4.2)$$

Segundo a mesma norma, a carga tem que ser aplicada de forma constante e regulada por forma a que a carga máxima atingida num espaço de tempo que não exceda os 420 segundos ( $300s \pm 120s$ ), nem seja inferior a 180 segundos. A Figura 4.10 ilustra o ensaio destrutivo realizado num dos elementos em análise.



Figura 4.10 – Ensaio para determinação da resistência à flexão,  $f_m$

Quadro 4.6 – Determinação da resistência à flexão,  $f_m$

Lote	N	$f_m$			
		Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo
1	50	86,44	16,78	116,35	46,39

No Quadro 4.6 são apresentados os resultados obtidos referentes à resistência à flexão no lote. A resistência à flexão é diretamente afetada pela presença de defeitos e pelo módulo de elasticidade, o que provoca a grande amplitude nos valores obtidos.

A Figura 4.11 apresenta o gráfico referente à distribuição de frequência dos resultados obtidos para a resistência à flexão.

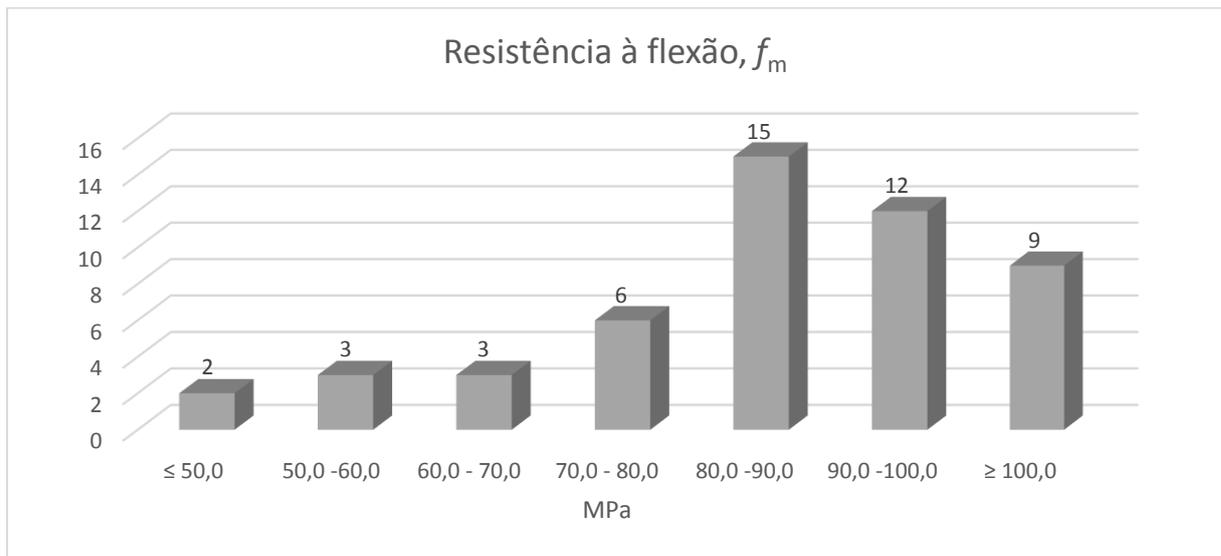


Figura 4.11 – Distribuição de frequência da resistência à flexão,  $f_m$

Como se pode observar, o número de peças referentes aos intervalos com menor resistência à flexão é muito reduzido, comparativamente aos de maior resistência. Assim se verifica que o maior número de peças é pouco afetado por defeitos e apresenta módulos de elasticidade superiores. O modo de rotura ocorreu, na maioria das peças, na zona central entre pontos de carga e no geral das peças a rotura acompanhou a inclinação do fio. Registou-se que na presença de fissuras e casca inclusa na zona central, a rotura ocorreu nesses locais. Em algumas peças verificou-se a ocorrência de compressão, localizada junto aos pontos de carga, como se pode observar na Figura 4.12.



Figura 4.12 – Zona de compressão

#### 4.5 Teor de água

A presença de água em peças de madeira pode afetar de forma significativa as suas propriedades mecânicas. O processo de perda de água numa peça de madeira pode provocar defeitos, como empenos e fissuras, fatores que virão a afetar significativamente as qualidades mecânicas da madeira. A determinação do teor de água nas peças de madeira em estudo foi realizada de acordo com a norma europeia EN 13183-1 (CEN, 2002a). Esta norma enuncia que o provete deve ser retirado o mais próximo do local da rotura, mas de uma zona que seja limpa de defeitos, bolsas de resina, nós ou de casca inclusa. As dimensões do provete têm que ser, no mínimo, de 20 mm na direção das fibras. Os provetes em estudo foram cortados com aproximadamente 50 mm. Na Figura 4.13 pode observar-se o esquema de corte do provete para a determinação do teor de água numa peça de madeira.

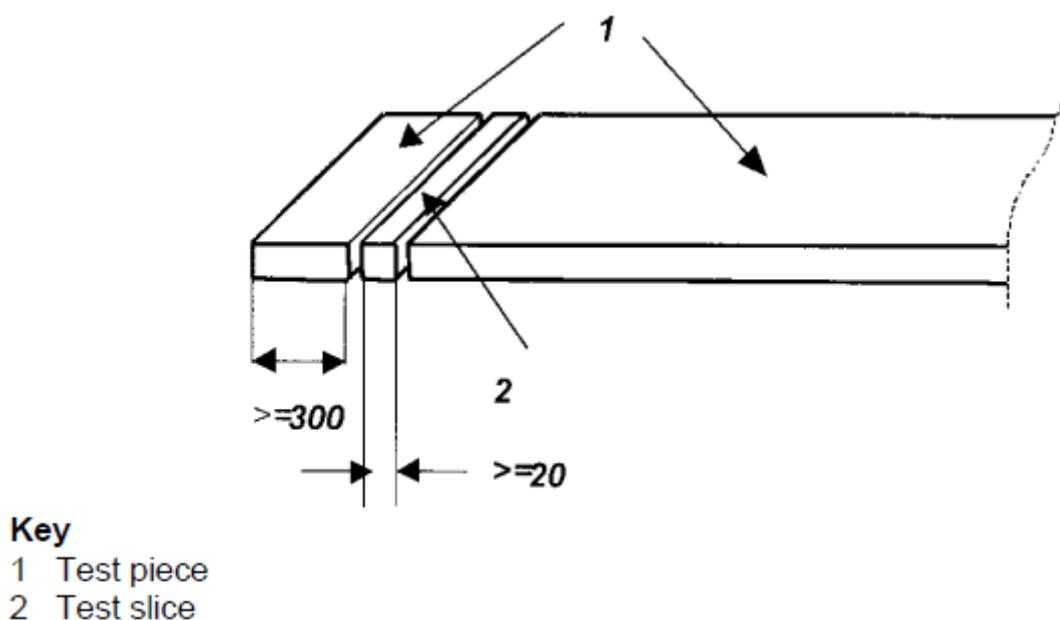


Figura 4.13 – Esquema de corte do provete de madeira para determinação do teor de água (CEN, 2002a)

Após o corte dos provetes, estes foram pesados para se proceder ao registo da sua massa enquanto provetes saturados. Foram depois colocados em tabuleiros num forno à temperatura  $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ , como o recomendado pela norma, até atingirem uma variação de massa, entre duas pesagens consecutivas, inferior ou igual a 0,1%. O teor de água dos provetes foi determinado através da equação (4.3) recomendada pela norma EN 13183-1 (CEN, 2002a), expresso em percentagem, onde  $m_1$  é a massa do provete saturado e  $m_0$  é a massa do provete já seco.

$$\omega = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100 \quad (4.3)$$

No Quadro 4.7 são apresentados os valores dos teores de água atingidos, por lote, nos provetes em estudo.

Quadro 4.7 – Teor de água (%)

Lote	N	w (%)			
		Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo
1	50	14,2%	2,5%	20,1%	9,2%

Na figura é representado o gráfico onde é mostrada a distribuição de frequência do teor de água dos provetes já secos.

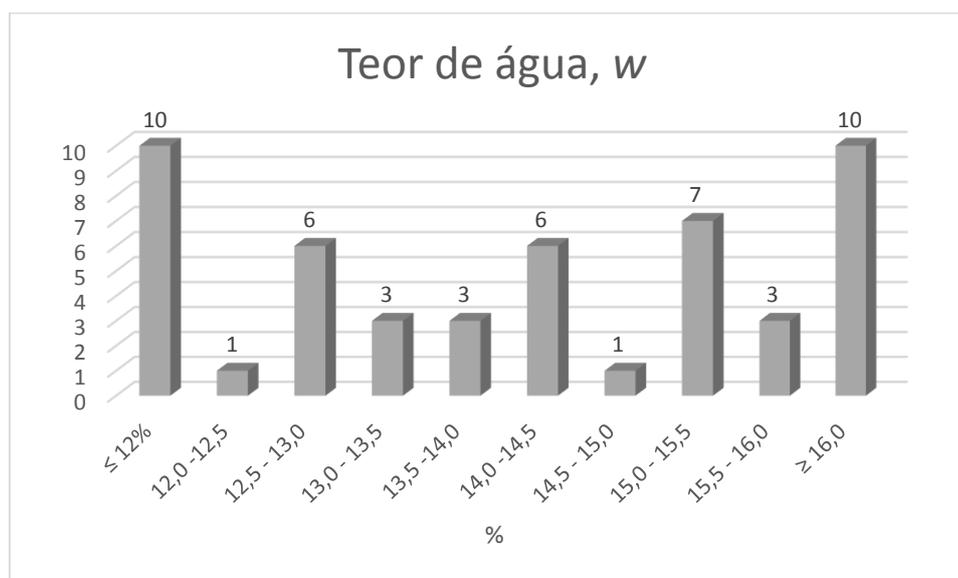


Figura 4.14 – Distribuição de frequência do teor de água dos provetes secos

Ao observar a Figura 4.14 verifica-se que ocorre uma distribuição desigual das peças ao longo dos intervalos, existindo uma maior concentração nos extremos. Esta distribuição está diretamente relacionada com a massa das peças, pois a determinação do teor de água está relacionado com a diferença entre a massa seca e a massa saturada. As peças que apresentam massas iniciais maiores, ou seja, que têm maior presença de água, durante o processo de secagem obtêm maiores perdas de água levando assim a perdas de massa superiores, traduzindo-se a um valor mais elevado nos seus teores de água.

#### 4.6 Massa Volúmica

A massa volúmica foi determinada sobre os mesmos provetes onde foi anteriormente determinado o teor de água. Para essa determinação foi medido o peso do provete e foram medidas as suas dimensões: altura, largura e espessura. As medidas são apresentadas em valores médios, resultantes da média das duas medições para cada parâmetro dimensional. A massa volúmica é determinada segundo a equação, expressa  $\text{kg/m}^3$ .

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (4.4)$$

Para a obtenção da massa volúmica do provete saturado e da massa volúmica do provete seco, foram consideradas duas pesagens distintas. Na determinação da massa volúmica do provete saturado, foi tido em conta a pesagem feita após o corte do provete. Para a determinação da massa volúmica seca foi feita, por sua vez, uma pesagem após o provete ter sido seco no forno e ter atingido um valor inferior ou igual a 0,1% de variação de água após duas pesagens consecutivas. Na Figura 4.15 pode observar-se a pesagem do provete.

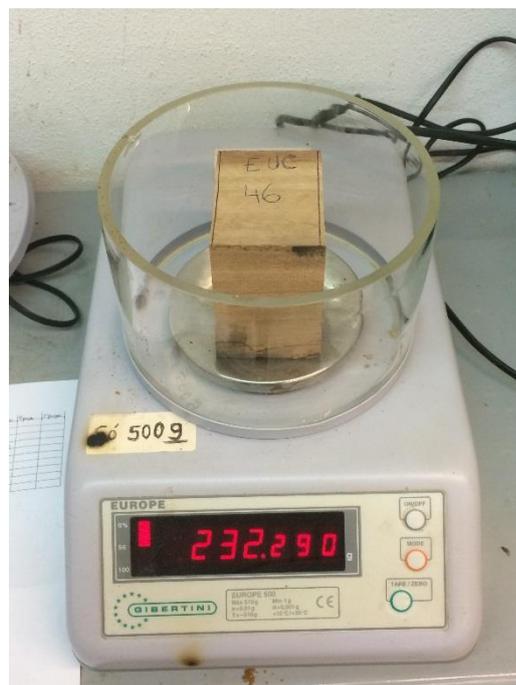


Figura 4.15 – Pesagem de um provete

No

Quadro 4.8 são apresentados os valores obtidos para a massa volúmica do provete saturado e para a massa volúmica do provete seco, com os resultados expressos em  $\text{kg/m}^3$ .

Quadro 4.8 – Massa Volúmica

Lote	N	Massa Volúmica, $\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )							
		$\rho$ (Provete Saturado)				$\rho$ (Provete Seco)			
		Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo	Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo
1	50	907,32	56,36	1000,21	767,87	794,78	47,73	877,20	672,34

Na Figura 4.16 é representado o gráfico referente à distribuição de frequência da massa volúmica a 12% para os provetes em estudo.

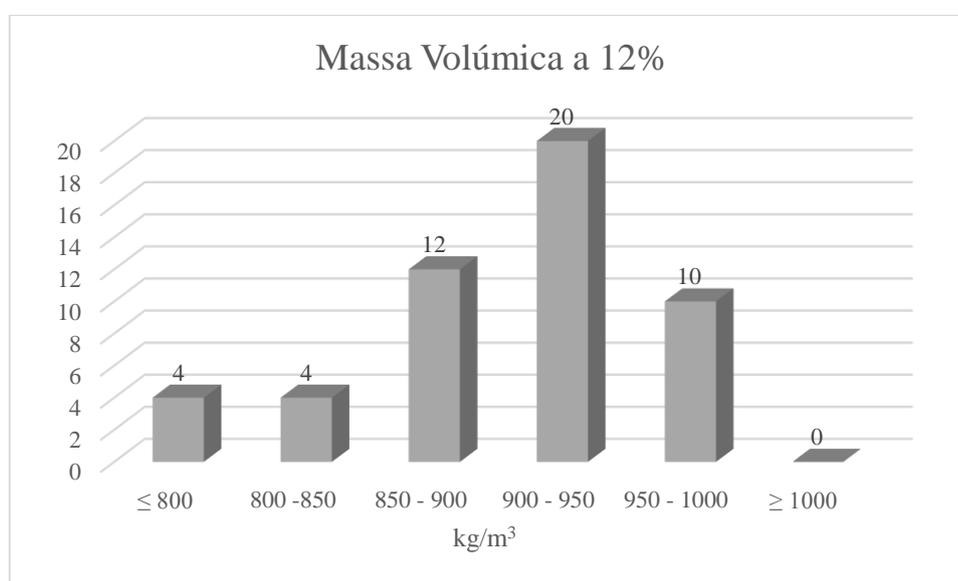


Figura 4.16 – Distribuição de frequência da massa volúmica a 12%

Como se pode observar no Quadro 4.8 existe uma pronunciada diminuição da massa volúmica dos provetes. Esta ocorrência deve-se às perdas de água que ocorrem durante a secagem dos provetes, que levam a uma diminuição significativa da massa. Como a madeira de eucalipto é caracterizada por uma elevada presença de água na sua estrutura, a variação da massa volúmica entre o provete saturado e o provete seco era de se esperar bastante acentuada.

#### 4.7 Valores Característicos das Propriedades Mecânicas

As propriedades mecânicas da madeira para fins de dimensionamento de estruturas, regra geral, são contabilizados através dos seus valores característicos (quantilho 5% inferior) para o teor de água de referência (12%). Assim, a norma EN 384 (CEN, 2010) refere que os valores obtidos para propriedades mecânicas devem ser corrigidos, de forma a evitar as diferenças existentes entre o teor de água medido e o teor de água de referência, antes de ser determinado o seu valor característico. Esta norma enuncia correções ao módulo de elasticidade (MPa) e à massa volúmica ( $\text{kg/m}^3$ ), para cada elemento estudado, através das (4.5) e (4.6).

$$E_0 = E_{0_w} (1 + 0,02(w_{provete} - 12)) \quad (4.5)$$

$$\rho = \rho_w (1 - 0,001(w_{provete} - 12)) \quad (4.6)$$

Após correção dos valores das propriedades mecânicas, procedeu-se à determinação dos valores médios e característicos para todos os módulos de elasticidade já apresentados, da resistência à flexão, da massa volúmica e do teor de água, seguindo o prescrito na norma EN 384 (CEN, 2010). Os valores das propriedades mecânicas foram determinados através das seguintes equações.

$$E_{0,mean} (MPa) = \frac{\sum E_i}{n} \times 1,3 - 2690 \quad (4.7)$$

$$E_{0,05} (MPa) = 0,84 E_{0,mean} \quad (4.8)$$

$$f_{m,k} (MPa) = f_{m,05} \times k_s \times k_v \quad (4.9)$$

Para a determinação dos valores característicos da massa volúmica, a norma enuncia que para a presença de uma só amostra é considerado o valor igual ao correspondente ao 5º percentil. Assim, para o lote em análise, foi determinado o valor correspondente ao percentil inferior (5%). A norma descreve também que é necessário proceder a uma nova correção do valor correspondente ao quinto percentil da resistência à flexão. Esta correção é dada por um ajuste da profundidade para 150mm, de forma a poder-se contabilizar as diferenças que existem relativamente ao comprimento real da peça e o comprimento nominal, sendo inserido como dado na realização do ensaio o comprimento nominal. Os valores obtidos e posteriormente corrigidos são apresentados no Quadro 4.9.

Quadro 4.9 – Propriedades obtidas para os elementos de madeira em estudo

	$E_{m,L}$ [MPa]	$E_{m,g}$ [MPa]	MTG	Acelerómetro	$f_m$ [MPa]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	w (%)
			$E_{m,dym}$ [MPa]	$E_{m,dym}$ [MPa]			
<b>Característico</b>	17567,53	15246,72	14457,23832	14809,50398	39,20	789,95	
<b>Médio</b>	20913,72	18150,86	17210,998	17630,36188	75,29	905,31	14,17
<b>Desvio Padrão</b>	4241,37	3228,66	2510,74	2782,50	16,78	55,68	2,45
<b>Máximo</b>	26823,87	23768,65	19858,00	20888,17	116,35	997,56	20,07
<b>Mínimo</b>	7967,83	7622,25	8399,00	7879,68	46,39	766,47	9,22
<b>N</b>	50	50	50	50	50	50	50

Como se pode observar nos resultados relativos aos módulos de elasticidade global e local, apresentados no Quadro 4.9, existe um aumento que se deve ao facto de ter sido tido em conta o teor de água de referência. No entanto, ao analisarmos os valores da resistência à flexão, verifica-se uma diminuição, pois o seu valor é afetado pelo ajuste no comprimento.

---

## **5 AVALIAÇÃO E COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS**

### **5.1 Introdução**

No presente capítulo proceder-se-á à avaliação e comparação dos resultados obtidos no decorrer desta dissertação. Para uma melhor avaliação dos resultados serão apresentadas as correlações, simples e múltiplas, entre as várias propriedades e características dos elementos de madeira. Na avaliação foram considerados os parâmetros que melhor caracterizam as peças de madeira relativamente à sua resistência.

O conhecimento prévio das propriedades mecânicas é imprescindível na aplicação de elementos de madeira para fins estruturais. A determinação dessas propriedades pode decorrer de ensaios destrutivos e não destrutivos, que se distinguem pela inutilização dos elementos de madeira ensaiados, no primeiro caso. Conhecendo previamente relações estatísticas que sejam satisfatórias entre as distintas propriedades e características da madeira, é possível simplificar o número de ensaios necessários para a caracterização da madeira. É desejável que exista uma boa relação entre a resistência e as características visuais, o que conduzirá à possibilidade de se obter a resistência sem necessidade de recorrer a ensaios destrutivos. Os ensaios destrutivos são mais dispendiosos e danificam irreversivelmente os elementos em estudo, impossibilitando a sua reutilização, pelo que devem ser evitados sempre que possível.

Algumas propriedades dos elementos de madeira apresentam um melhor relacionamento com outras propriedades, como é o caso do peso específico, que tem um bom relacionamento com quase todas as propriedades, à exceção da saturação das fibras. Tem ainda a vantagem de ser uma propriedade com alguma facilidade de determinação e possibilidade de obtenção de informação fiável no que diz respeito ao comportamento mecânico da madeira.

### **5.2 Comparação dos Resultados**

De forma a se ter uma melhor percepção dos resultados, foi feita uma comparação dos valores médios das propriedades mais relevantes para a caracterização da madeira. O Quadro 5.1 sintetiza essa comparação.

Quadro 5.1 – Comparação dos valores médios das propriedades

N	$E_{m,L}$ [MPa]	$E_{m,g}$ [MPa]	MTG	Acelerómetro	$f_m$ [MPa]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	w (%)
			$E_{m,dym}$ [MPa]	$E_{m,dym}$ [MPa]			
50	20913,72	18150,86	17211,00	17630,36	75,29	905,31	14,17

Na análise dos resultados obtidos constata-se que existe uma pequena diferença nos valores correspondentes ao módulo de elasticidade global ( $E_{m,g}$ ) e local ( $E_{m,L}$ ). O módulo de elasticidade local é superior, como foi já referido no subcapítulo 4.4.1, por não se ter tido em consideração o comprimento total da peça, e se ter considerado apenas a parte central da peça, como também por este não ter em consideração as deformações por corte. Por este facto o módulo de elasticidade não é tão afetado pela presença de defeitos, que tendem a diminuir a capacidade resistente das peças de madeira.

Relativamente ao módulo de elasticidade dinâmico ( $E_{m,dym}$ ), obtido pelos ensaios recorrendo ao aparelho *Timber Grader* MTG e Acelerómetro, observa-se que os seus valores não diferem muito. Existe um valor inferior, relativamente ao módulo de elasticidade obtido pelo aparelho *Timber Grader* MTG, por este ensaio ter em consideração o teor de humidade registado na peça.

Respetivamente à massa volúmica ( $\rho$ ), o valor é considerado alto, pois a madeira de *Eucalypto globulus* é considerada uma madeira pesada. Os elementos em estudo apresentaram valores correspondentes à massa e ao teor de água elevados, o que implica que a sua massa volúmica atinja também um valor elevado. Desta forma se pode concluir que a madeira em estudo se trata de uma madeira dura.

A resistência à flexão ( $f_m$ ) é uma propriedade muito importante, no que respeita à avaliação de elementos de madeira, pois é a propriedade que melhor caracteriza a capacidade de resistência de uma espécie de madeira. O valor obtido para a resistência à flexão foi, como se pode verificar, bastante satisfatória. Este parâmetro é normalmente bastante influenciado pela presença de defeitos, o que nos permite concluir que a madeira de *E. globulus* estudada não tinha uma presença significativa de defeitos na sua constituição. Com intuito de se perceber em que classe de resistência pode ser inserida a madeira em estudo, procedeu-se à comparação do seu valor característico de resistência à flexão com os valores mencionados na norma europeia EN 338 (CEN, 2003). Comprovou-se assim que a madeira é equivalente a uma classe de resistência D40, pois o  $f_{m,k}=39,2$  MPa.

Para que se possa proceder a uma comparação dos resultados obtidos com os valores indicados na ficha técnica do eucalypto (LNEC, 1997), foi elaborado um quadro que faz referência aos

valores médios das propriedades mecânicas determinadas no presente estudo. Observando o Quadro 5.2, constata-se que a resistência à flexão obtida é inferior à indicada na ficha técnica, enquanto todas as outras propriedades mencionadas apresentam valores superiores.

Quadro 5.2 – Comparação das propriedades mecânicas obtidas com as da ficha técnica (LNEC, 1997)

Propriedades	Ficha Técnica LNEC	Obtidos
	Valores médios	
Massa Volúmica [ $\text{kg/m}^3$ ]	750 - 850	905,31
Resistência à Flexão [ $\text{N/mm}^2$ ]	127,5	75,29
Módulo de Elasticidade [ $\text{N/mm}^2$ ]	17500	18150,86

### 5.3 Relações estatísticas entre propriedades

#### 5.3.1 Introdução

No presente subcapítulo proceder-se-á à apresentação e análise das relações estatísticas existentes entre as propriedades da madeira em estudo. As relações estatísticas são realizadas através de correlações entre propriedades, que neste caso se tratam de correlações simples entre características visuais e propriedades mecânicas. Para a determinação dos melhores parâmetros representativos da resistência à flexão da amostra foram efetuadas correlações múltiplas entre as várias propriedades determinadas.

As correlações múltiplas foram realizadas sobre vários conjuntos de propriedades, em que se relacionaram características visuais com as propriedades mecânicas determinadas, de forma a poder-se contabilizar o que melhor representaria a resistência à flexão do *Eucalypto globulus*.

#### 5.3.2 Características Visuais

A fim de verificar as relações que melhor caracterizam a madeira em estudo, procedeu-se à análise comparativa entre as características visuais analisadas e a resistência à flexão. As características visuais que mais afetam a resistência da madeira, e que foram contabilizadas nesta análise, são: os nós, a inclinação do fio e as fissuras.

A Figura 5.1 apresenta o gráfico de dispersão, da relação entre nós e a resistência à flexão da amostra analisada.

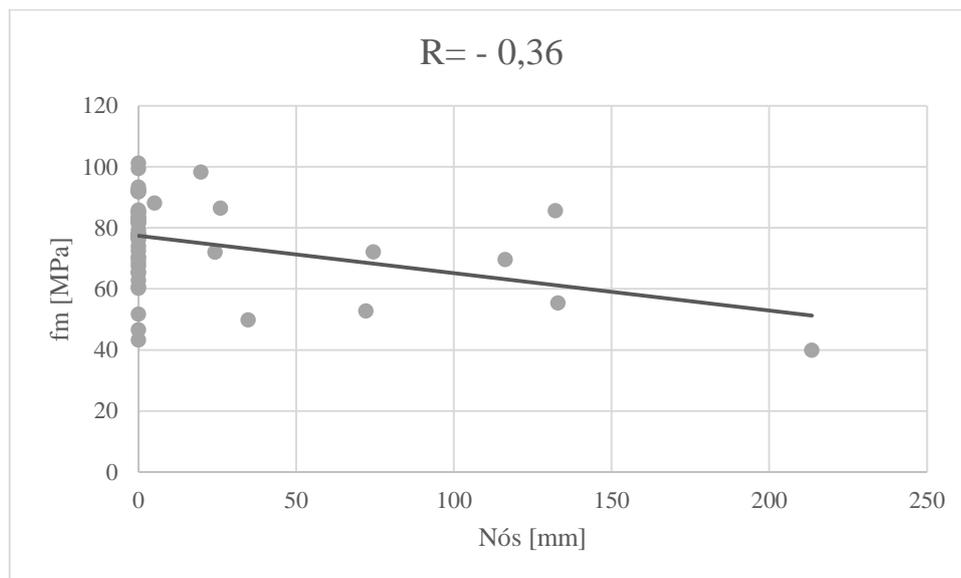
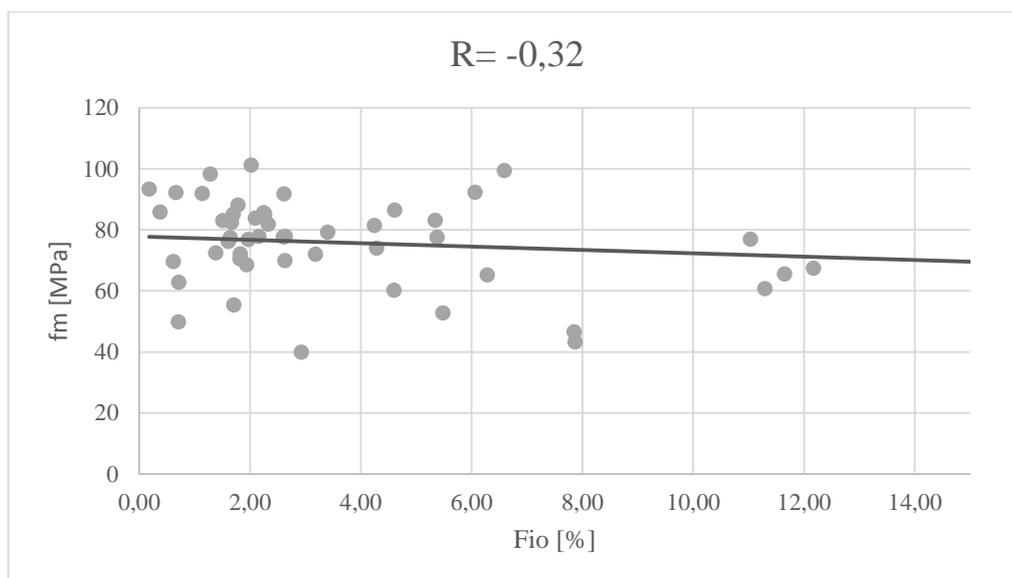


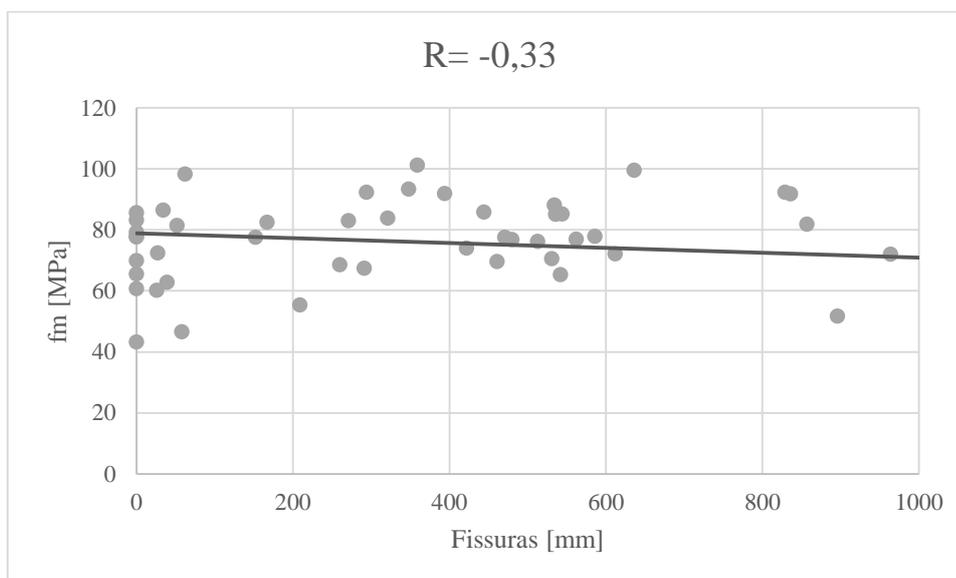
Figura 5.1 – Gráfico de dispersão da relação entre Nós [mm] e  $f_m$  [MPa]

Analisando os resultados entre nós e a resistência à flexão, verifica-se que a correlação obtida é baixa, uma vez que apresenta um coeficiente de correlação  $R=-0,36$ . Esta correlação é considerada baixa, por se tratar de um valor inferior a 0,4. Pode assim concluir-se que esta correlação baixa está relacionada com a pouca presença de nós que a madeira em estudo apresentava. Assim, a correlação que existe entre os nós e a resistência à flexão das peças de madeira é baixa.

A Figura 5.2 apresenta o gráfico de dispersão relativo à correlação existente com a inclinação do fio e a resistência à flexão. Novamente se pode constatar, ao analisar a figura seguinte, que a correlação é também baixa, apresentando um coeficiente de correlação  $R=-0,32$ . Mesmo sendo a inclinação do fio uma característica bastante influente na resistência à flexão de peças de madeira, verificou-se que a relação entre elas é quase inexistente no lote estudado.

Figura 5.2 – Gráfico de dispersão da relação entre inclinação do fio [%] e  $f_m$  [MPa]

A correlação entre o comprimento das fissuras e a resistência à flexão é apresentada na Figura 5.3 através de um gráfico de dispersão.

Figura 5.3- Gráfico de dispersão entre as fissuras [mm] e  $f_m$  [MPa]

Ao analisar a Figura 5.3 verifica-se que, como as correlações já mencionadas, o coeficiente de correlação é uma vez mais considerado baixo,  $R = -0,33$ . Assim, a relação entre o comprimento das fissuras e a resistência à flexão das peças de madeira estudadas não é satisfatória, de forma a caracterizar a madeira de *E. globulus* estudada.

Foram realizadas correlações múltiplas entre características visuais e a resistência à flexão. Ao proceder a correlações múltiplas pretendeu-se atingir resultados mais satisfatórios para a caracterização da madeira. Para a relação entre empenos e a resistência à flexão foi necessário efetuar uma correlação múltipla, uma vez que os empenos foram contabilizados por três tipos (arco de canto, arco de face e hélice). No Quadro 5.3 são apresentadas as correlações múltiplas realizadas entre características visuais e a resistência à flexão.

Quadro 5.3 – Correlações múltiplas entre características visuais e  $f_m$

Opção	$f_m$	Nós	Fio	Fissuras	Empenos
	r				
1	-0,36	x			
2	0,51	x	x		
3	0,39	x		x	
4	-0,32		x		
5	0,45		x	x	
6	-0,33			x	
7	0,27				x
8	0,47			x	x
9	0,44		x		x
10	0,49	x			x
11	0,65	x	x	x	x

Procedendo a uma análise do Quadro 5.3 constata-se que as correlações realizadas entre as características visuais e a resistência à flexão são baixas, pois os valores dos coeficientes de correlação são inferiores a 0,5. No caso da correlação entre nós, fio e resistência à flexão, o valor atingido é de 0,51 o que se pode considerar já uma correlação média. Quando se procede a uma correlação de todas as características em conjunto com a resistência à flexão, obtém-se um aumento do valor da correlação ( $R=0,65$ ), continuando a ser considerado uma correlação média. Assim, pode concluir-se que através das conjugações realizadas entre características visuais e a resistência à flexão não se atingiram valores muito satisfatórios que permitam estimar a resistência à flexão das peças de madeira em estudo.

De forma a observar se as características visuais podem correlacionar-se de uma forma mais satisfatória com a resistência à flexão das peças, procedeu-se a uma correlação múltipla onde foram consideradas todas as características já mencionadas e o  $f_m$ , e em que se obteve um coeficiente de correlação médio,  $R=0,65$ . Assim pode concluir-se que é possível obter uma estimativa média.

### 5.3.3 Módulo de elasticidade dinâmico

Para a verificação da relação existente entre o módulo de elasticidade dinâmico e a resistência à flexão realizaram-se correlações entre o módulo de elasticidade obtido pelo aparelho *Timber Grader* MTG e pelo Acelerómetro e a resistência à flexão das peças. Nas figuras seguintes observam-se os gráficos de dissipação referentes à relação do módulo de elasticidade dinâmico pelo *Timber Grader* MTG e pelo Acelerómetro, respetivamente, com a resistência à flexão.

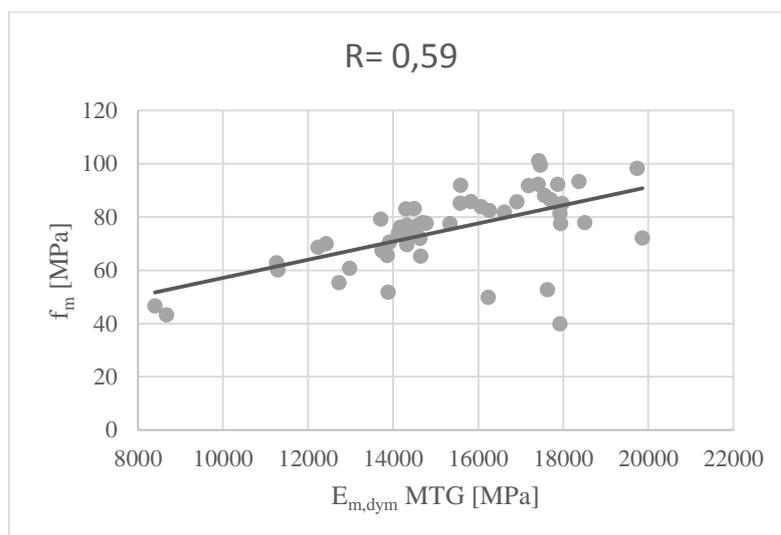


Figura 5.4 – Gráfico de dispersão entre  $E_{m,dym}$  MTG [MPa] e  $f_m$  [MPa]

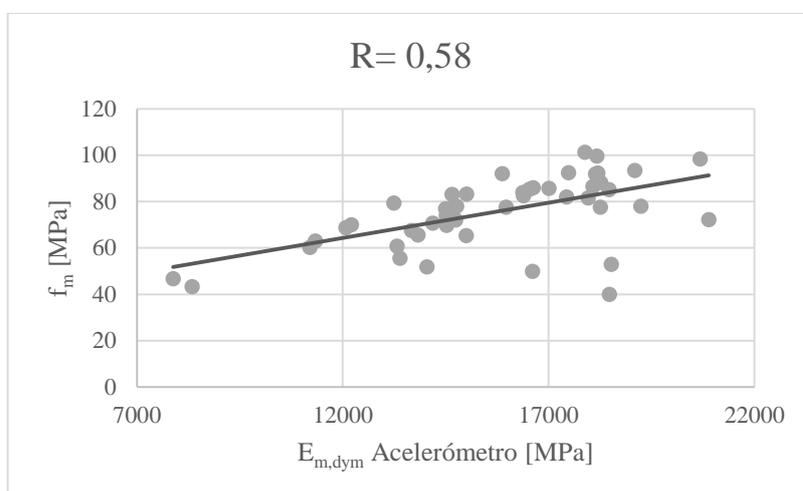


Figura 5.5 – Gráfico de dispersão entre  $E_{m,dym}$  Acelerómetro [MPa] e  $f_m$  [MPa]

Ao analisar as Figura 5.4 e Figura 5.5 verifica-se que os valores referentes aos coeficientes de correlação são muito próximos, como seria de esperar. Para ambas as correlações constata-se a existência de valores médios, pois o seu valor é de 0,59 e 0,58, para o módulo de elasticidade determinado pelo *Timber Grader* MTG e pelo Acelerómetro, respetivamente.

Para analisar a relação entre os módulos de elasticidade dinâmicos e as características visuais e a resistência à flexão das peças em estudo, procedeu-se a correlações múltiplas, com a consideração de vários conjuntos. Considerou-se cada característica individualmente e o conjunto de todas as características visuais com cada módulo de elasticidade dinâmico, os resultados encontram-se sintetizados no Quadro 5.4.

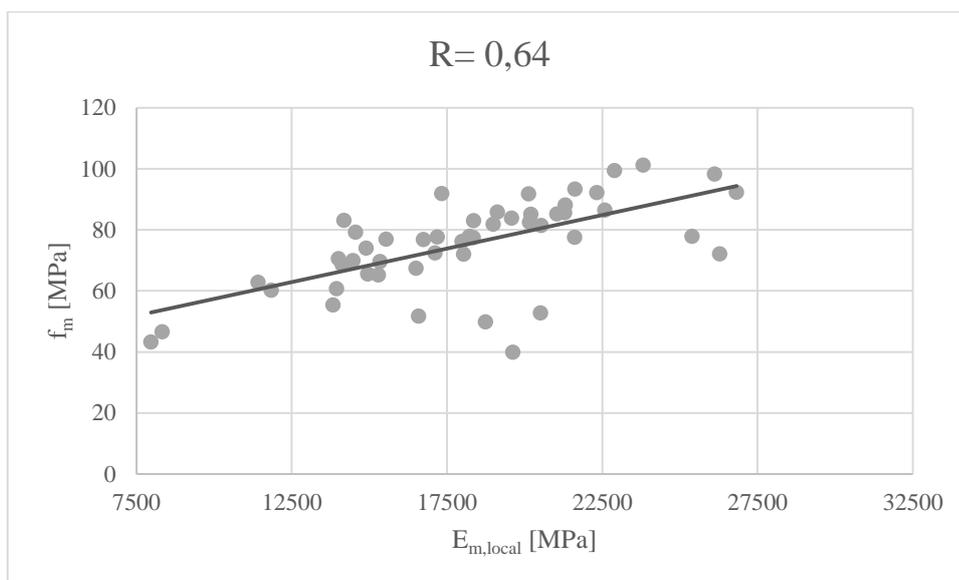
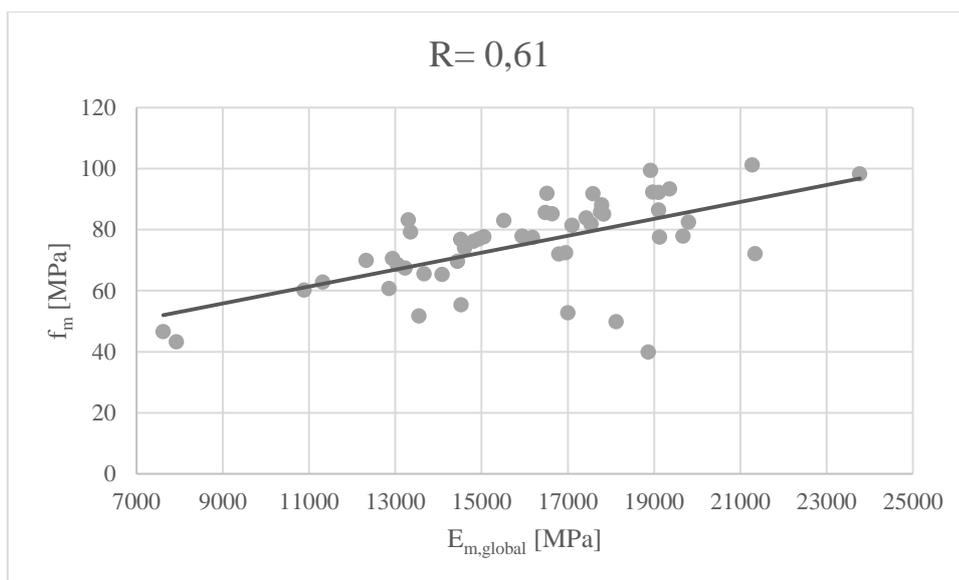
Quadro 5.4 – Correlações múltiplas entre características visuais e  $E_{m,dym}$  (MTG eAce.) e  $f_m$

Opção	$f_m$	$E_{m,dym}$ MTG	$E_{m,dym}$ Ace.	Nós	Fio	Fissuras	Empenos
	R						
1	0,75	x		x			
2	0,62	x			x		
3	0,80	x				x	
4	0,71	x					x
5	0,89	x		x	x	x	x
6	0,75		x	x			
7	0,61		x		x		
8	0,80		x			x	
9	0,71		x				x
10	0,89		x	x	x	x	x

Ao analisar o Quadro 5.4 verifica-se que existem, no geral dos conjuntos considerados, boas correlações. Para os conjuntos onde se considera o  $E_{m,dym}$  (tanto o determinado pelo MTG como pelo Acelerómetro) e todas as características visuais são obtidos coeficientes de correlação muito satisfatórios, ( $R=0,89$ ). Desta maneira se consegue estimar uma resistência à flexão bastante satisfatória, quando se relaciona os módulos de elasticidade dinâmicos com as características visuais.

#### 5.3.4 Módulo de elasticidade estático

Para os módulos de elasticidades estáticos, global e local, foram efetuadas correlações simples, comparando-os com a resistência à flexão. Nas figuras seguintes são apresentados os gráficos de dispersão referentes às relações entre o módulo de elasticidade local, com a resistência à flexão e o módulo de elasticidade global com a resistência à flexão. Através da análise das Figura 5.6 e Figura 5.7 observa-se que os valores são próximos, entre ambas as relações, e que atingem um coeficiente de correlação médio. O valor correspondente à correlação do módulo de elasticidade local é superior, tendo um valor de  $R=0,63$ .

Figura 5.6 – Gráfico de dispersão entre  $E_{m,local}$  [MPa] e  $f_m$  [MPa]Figura 5.7 – Gráfico de dispersão entre  $E_{m,global}$  [MPa] e  $f_m$  [MPa]

Com o objetivo de analisar a possibilidade de estas propriedades se relacionarem de forma satisfatória com outras propriedades da madeira em estudo – para a estimativa de resistência à flexão – procedem-se ao cálculo de correlações múltiplas. Os resultados das correlações múltiplas entre as propriedades anteriormente referidas encontram-se registados no Quadro 5.5.

Quadro 5.5 – Correlações múltiplas entre as propriedades da madeira e  $f_m$  [MPa]

Opção	$f_m$	$E_{m,local}$	$E_{m,global}$	$E_{m,dym}$ MTG	$E_{m,dym}$ Ace.	Características Visuais
	R					
1	0,63	x	x			
2	0,63	x		x		
3	0,63	x			x	
4	0,63	x				x
5	0,89	x		x	x	
6	0,89	x		x		x
7	0,88	x			x	x
8	0,89	x		x	x	x
9	0,60		x	x		
10	0,60		x		x	
11	0,87		x			x
12	0,61		x	x	x	
13	0,89		x	x		x
14	0,89		x		x	x
15	0,89		x	x	x	x
16	0,63	x	x	x	x	
17	0,89	x	x	x	x	x

Procedendo a uma análise ao Quadro 5.5 verifica-se que existem relações entre propriedades que atingem valores bastante satisfatórios para a estimativa da resistência à flexão das peças em estudo, uma vez que o coeficiente de correlação é considerado alto. O mesmo acontece quando se relaciona o módulo de elasticidade, local ou global, com os módulos de elasticidade dinâmica e as características visuais das peças.

### 5.3.5 Correlações simples

De forma a poderem analisar-se as possíveis correlações entre as propriedades analisadas nas peças de madeira em estudo, foi realizado um quadro síntese onde estão representadas todas as correlações simples possíveis. As correlações altas que são apresentadas são as que ocorrem entre o módulo de elasticidade local ou global com o módulo de elasticidade dinâmico determinado pelo MTG e pelo Acelerómetro, como também entre os módulos de elasticidade global e local.

Quadro 5.6 – Correlações simples entre propriedades das peças de madeira

	Nós [mm]	Fio [%]	Fissuras [mm]	E MTG [MPa]	E Ace [MPa]	Em Local [MPa]	Em Global [MPa]	fm [MPa]	$\omega$ [%]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho$	-0,29	-0,10	-0,50	-0,11	-0,13	-0,03	-0,05	0,34	0,25	1,00
$\omega$	0,15	-0,26	0,01	0,52	0,48	0,59	0,61	0,42	1,00	
fm	-0,36	-0,32	-0,33	0,59	0,58	0,64	0,61	1,00		
Em Global	0,16	-0,24	0,28	0,94	0,94	0,94	1,00			
Em Local	0,10	-0,16	0,22	0,94	0,93	1,00				
E Ace	0,19	-0,19	0,35	1,00	1,00					
E MTG	0,19	-0,19	0,33	1,00						
Fissuras	0,58	0,05	1,00							
Fio	-0,11	1,00								
Nós	1,00									

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 6.1 Conclusão

A presente dissertação incidiu sobre o estudo para a caracterização da madeira de *Eucalypto globulus* para aplicação estrutural. A caracterização foi realizada através de várias etapas, a fim de serem contabilizadas todas as propriedades da madeira necessárias para a determinação da sua resistência. A primeira etapa iniciou-se com a classificação visual, em que foram determinadas as características visuais determinantes da peça, como os nós, as fissuras, os empenos, a casca inclusa, a inclinação do fio, o descaio ou as bolsas de resina (kino). Posteriormente foram determinadas as propriedades físicas das peças em estudo: massa volúmica e teor de água; e as propriedades mecânicas: módulos de elasticidade e resistência à flexão, (obtidas através de ensaios experimentais destrutivos e não destrutivos). Por forma a determinar quais os parâmetros que apresentam uma estimativa ótima na aproximação dos valores da resistência à flexão, foram efetuadas correlações, simples e múltiplas, entre todos os parâmetros anteriormente determinados.

A classificação visual foi realizada segundo o preconizado na norma europeia prEN1310 (CEN, 1995), que determina as especificações de todas as características visuais. Nesta fase se constatou que a madeira em estudo apresentava pouca quantidade de nós, sendo os existentes de diâmetro reduzido. Em contrapartida foi registado, em maior quantidade, a presença de fissuras e empenos, com as peças a apresentar fissuras exteriores e interiores; o maior registo de empenos correspondem aos empenos em hélice. Concluiu-se assim que estes defeitos podem ter sido originados por uma secagem pouco cuidada. Para a determinação da classe de qualidade recorreu-se ao descrito pela norma europeia EN14081-1 (CEN, 2005), que levou ao estabelecimento de uma forma genérica, de duas classes de qualidade: inferior ou igual à classe C18 e superior a C18. As classes foram analisadas individualmente para cada característica visual, tendo-se registado o maior número de peças rejeitadas devido à presença de empenos em hélice, registadas em 33 peças. Relativamente às restantes características a maioria das peças ficaram na classe superior a C18.

Para se conhecer a relação das características visuais com a resistência à flexão foram efetuadas correlações simples e múltiplas. As correlações simples foram realizadas entre as características que mais poderiam influenciar a resistência das peças (os nós, a inclinação do fio e as fissuras) e a resistência à flexão, tendo-se registado um coeficiente de correlação baixo, aproximadamente  $R=0,34$ . No caso das correlações múltiplas foram também considerados os empenos, também se registaram coeficientes baixos nas várias opções de correlação. A exceção

foi a opção em que foram considerados os nós, o fio e a resistência à flexão, obtendo-se um coeficiente médio de valor igual a 0,51; e  $R=0,65$  quando consideradas todas em conjunto. Pode-se assim concluir que ao analisar unicamente as características visuais não é possível obter, nas peças em estudo, resultados ótimos para estimar a resistência à flexão.

Numa fase posterior foram determinados os módulos de elasticidade dinâmicos, através de ensaios experimentais não destrutivos, com os aparelhos *Timber Grader* MTG e Acelerómetro. A determinação do módulo de elasticidade dinâmico é feita através da vibração longitudinal que é provocada, com o decorrer dos ensaios, nas peças estudadas. Correlacionando este parâmetro (determinado pelo *Timber Grader* MTG) com a resistência à flexão, atingiu-se um coeficiente médio, com um valor de 0,59. Para a relação entre o módulo de elasticidade dinâmico, determinado pelo Acelerómetro, e a resistência à flexão obteve-se um valor idêntico, com valor igual a 0,58. A aproximação destes valores nas correlações está relacionada com a proximidade dos valores do módulo de elasticidade dinâmico entre os dois métodos de ensaio. Com a conjugação dos módulos de elasticidade dinâmicos, tanto para o determinado pelo *Timber Grader* MTG como o determinado pelo Acelerómetro, e todas as características visuais, relacionando com a resistência à flexão, os coeficientes de correlação aumentaram, atingindo valores considerados altos ( $r=0,89$ ). Assim, conclui-se que a conjugação dos módulos de elasticidade dinâmicos e as características visuais permitem estimar a resistência à flexão com uma precisão ótima.

O processo de determinação do módulo de elasticidade global e local foi aferido através do ensaio descrito pela norma EN408 (CEN, 2012), que fornece as indicações necessárias para se proceder ao ensaio, como a determinação do módulo de elasticidade. Os valores determinados para o módulo de elasticidade global e para o módulo de elasticidade local apresentaram diferenças, possivelmente devido ao facto de na determinação do módulo de elasticidade global se ter tido em conta o comprimento total da peça, sendo influenciado pela presença de defeitos que na totalidade afetam a peça. Na determinação do módulo de elasticidade local por sua vez só é tido em conta a parte central da peça, reduzindo assim a área afetada por defeitos.

A relação entre o módulo de elasticidade global ou o módulo de elasticidade local e a resistência à flexão apresentaram valores de correlação média, tendo os seus coeficientes de correlação valores de 0,61 e 0,64, respetivamente. Um aumento significativo dos coeficientes de correlação ocorre quando são analisados os módulos de elasticidade local e global juntamente com os módulos de elasticidade dinâmicos e as características visuais, correlacionando com a resistência à flexão. Procedendo à conjugação do módulo de elasticidade global ou local, do módulo de elasticidade dinâmico (determinado pelo MTG ou pelo Acelerómetro) das características visuais com a resistência à flexão, obtém-se um coeficiente de correlação com valor igual a 0,89. O mesmo valor é atingido quando se correlaciona os dois módulos de elasticidade (global e local), os dois módulos de elasticidade dinâmicos e todas as características visuais com a

resistência à flexão. Conclui-se assim que o módulo de elasticidade estático, conjugado com outras propriedades, permitiu estimar com precisão a resistência à flexão das peças em estudo.

A determinação da resistência à flexão foi realizada através de ensaios destrutivos, segundo o descrito pela norma EN408 (CEN, 2012). As peças analisadas apresentaram valores elevados no que se refere à resistência à flexão elevados, com um valor médio 75,29 MPa. Constatou-se no entanto que as peças que apresentavam mais defeitos atingiam valores de resistência mais baixos.

Assim se pode afirmar que tanto os parâmetros incluídos na classificação visual, como os ensaios dinâmicos, ou como também os ensaios estáticos não destrutivos são soluções bastante satisfatórias para se estimar a resistência à flexão de elementos de madeira. No caso da madeira *E. globulus*, a utilização de um só método não se configura muito fiável na estimativa da resistência à flexão. Procede-se assim à conjugação da classificação visual com ensaios dinâmicos, por exemplo, conseguindo-se estimar com precisão a resistência à flexão dos elementos de madeira. Existem algumas vantagens no recurso exclusivo a estes métodos na classificação de elementos de madeira tem-se algumas vantagens por serem mais rápidos e menos dispendiosos do que os ensaios estáticos, tanto os destrutivos como os não destrutivos.

## 6.2 Trabalho futuro

Para trabalho futuro seria importante alargar a amostra com o intuito de obter uma melhor fiabilidade nos resultados, tendo um maior cuidado no processo de preparação da amostra. Seria decerto de grande interesse proceder à realização de vários estudos em amostras de madeira de *Eucalypto globulus*, para que fosse possível a elaboração de uma norma portuguesa, onde estivessem incluídos todos os parâmetros necessários para uma classificação visual correta, com classes de qualidade representativas da madeira adequadas ao contexto nacional.

Devido ao facto de ser necessário um cuidado especial, na madeira de *Eucalypto globulus*, tanto no processo de secagem como no corte, seria também importante o estudo de métodos que, de uma forma eficaz, prevenissem o aparecimento de defeitos na secagem e no corte.

Para a aplicação estrutural da madeira de *Eucalypto globulus* seria igualmente relevante um estudo para a determinação de uma solução estrutural de qualidade, com aplicação dos elementos em toras de secção circular ou em elementos viga retangular. Também a melhoria que poderia ser atingida com a utilização em lamelado-colado, seria uma investigação interessante, bem como o estudo das técnicas mais eficientes para uma colagem mais resistente.

Devido à complexidade que os ensaios estáticos (destrutivos e não destrutivos) apresentam, e também pelos elevados custos, seria interessante um estudo de outros métodos eficientes que permitissem determinar a resistência à flexão.

## 7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Balsa, J. P. R. (2013). "Avaliação destrutiva e não destrutiva de elementos retangulares de madeira de pinho bravo". Faculdade de Ciências e Tecnologia - Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal.

Bartholomeu, R. G. e. A. (2000). "Avaliação do Desempenho de Ensaio Não Destrutivo em Vigas de Madeira de *Eucalyptus citriodora* e *Pinus elliottii*". Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental.

Bermúdez Alvite, J. e. a. (2002). "Manual da Madeira de Eucalipto branco". Fundación para o Fomento da Calidade Industrial e Desenvolvimento Tecnolóxico da Galicia.

Carreira, M. R., Andrés Batista Cheung, Fabiana Goia R. de Oliveira, Antônio Alves Dias, Carlito Calil Jr., Almir Sales, Guilherme Correa Stamato (2003). "AVALIAÇÃO DE TÉCNICAS NÃO-DESTRUTIVAS APLICADAS À MADEIRA DE *PINUS* sp". III Pan-American Conference for Nondestructive Testing. Rio de Janeiro, Brasil.

Carreira, M. R., Antonio A. Dias, Pedro G. A. Segundinho (2011). "Aplicação do ensaio de vibração transversal livre na estimativa da rigidez à flexão de toras de madeira". CIMAD 11 - 1º Congresso Ibero-LatinoAmericano da Madeira na Construção.

Carvalho, A. d. (1962). "Madeira de eucalipto (*Eucalyptus globulus* Labill) Estudos, ensaios e observações". Secretaria de Estado da Agricultura, Direcção-Geral dos Serviços Florestais e Aquícolas, Alcobaça.

Carvalho, A. d. (1996). "Madeiras Portuguesas".

CEN (1995). "Round and sawn timber - Method of measurement of features". prEN 1310. E. C. f. Standardization.

CEN (2002a). "Moisture content of a piece of sawn timber - Part 1: Determination by oven dry method". EN 13183-1. E. C. f. Standardization.

CEN (2002b). "Moisture content of a piece of sawn timber Part 2: Estimation by electrical resistance method". EN 13183-2. C. E. d. Normalisation.

CEN (2003). "Structural timber - Strength classes". EN 338. E. C. f. Standardization.

CEN (2005). "Timber structures - Strength graded structural timber with rectangular cross section - Part 1: General requirements". EN 14081-1. E. C. f. Standardization.

- 
- CEN (2010). "Structural timber - Determination of characteristic values of mechanical properties and density". EN 384. E. C. f. Standardization.
- CEN (2012). "Timber structures - Structural timber and glued laminated timber - Determination of some physical and mechanical properties". EN 408. E. C. f. Standardization.
- Clough, R. W. e. P., J. (1995). "Dynamics of Structures". Computers & Structures, Inc., USA.
- Eyle, A. a. C. M. (2002). "Kino vein formation in *Eucalyptus globulus* and *E. nitens*". Tasmania, Australia.
- G. Castro, F. P. (2003). "Mixed glued laminated timber of poplar and *Eucalyptus grandis* clones." European Journal of Wood and Wood Products.
- Haselein, C. R. M. d. C. L., Elio José Santini, Solon Jonas Longhi, Silviana Rosso, Denis L. G. Fernandes, Leonel Freitas de Menezes (2004). "CARACTERÍSTICAS TECNOLÓGICAS DA MADEIRA DE ÁRVORES MATRIZES DE *Eucalyptus grandis*". Santa Maria, Brasil.
- ICNF (2013). "IFN6 – Áreas dos usos do solo e das espécies florestais de Portugal continental". Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas, Lisboa, Portugal.
- Larsen, H. J. (2001). "Properties affecting reliability design of timber structures". COST E24 Seminar on Reliability of timber structures. Coimbra, Portugal.
- LNEC (1997). "M6 Eucalypto comum". Lisboa, Portugal.
- Morgado, T. F. M. (2012). "Classificação e Aplicação Estrutural da Madeira de Secção Circular de Pinheiro Bravo". Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal.
- Oliveira, F. G. R. d., Karla Peitl Miller, Marcela Candian, Almir Sales (2005). "INFLUÊNCIA DA SEÇÃO TRANSVERSAL NA VELOCIDADE ULTRA-SÔNICA NA MADEIRA DE *Eucalyptus citriodora*". Universidade Federal de Lavras, Lavras.
- Oliveira, M. e. a. (2015). "Análise comparativa do desempenho de ultrassons na avaliação não destrutiva da madeira de Castanho". Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas. Guimarães.
- Pereira, H. M., Isabel; Jorge Gominho, Fátima Tavares, Teresa Quilhó, José Graça, José Rodrigues, Anatoly Shatalov, Sofia Knapic (2010). "Qualidade e utilização tecnológica de eucalypto (*Eucalyptus globulus*)."
- Saavedra, M. C. T. V. a. F. P. (2002). "Una propuesta Industrial de Secado de Madera de Eucalypto blanco (*Eucalyptus globulus*) de Galicia". CIS-Madera.
- Sandoz, J. L. (1993). "Moisture content and temperature effect on ultrasound timber grading". Lausanne.
-

Vázquez, M. C. T., Prieto, Oscar González e Centro de Innovación e Servizos Tecnolóxicos da Madeira de Galicia (2007). "eucalyptus Aplicaciones de la madera".

Vries, P., Gard, W. F. e Schuch, R. (2006). "Development of a strength grading system of small diameter round wood". 9th World Conference on Timber Engineering. Portland, OR, USA.

Vries, P. A. d. a. G., W.F. (2008). "Determination of characteristic strength values for Dutch larch round timber". COST E53. Delft.

Vries, P. d. a. G., W.F. (1998). "The development of a strength grading system for small diameter roundwood". Delft.