



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Cláudio Alexandre Monteiro Ferreira

**FABRICAÇÃO E RENDIMENTO ESTRUTURAL À
FLEXÃO DA MADEIRA LAMELADA COLADA DE
FOLHOSAS NO ESPAÇO SUDOESTE**

Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Estruturas, orientada pelo Professor Doutor João Henrique Jorge de Oliveira Negrão e pelo Professor Doutor Carlos Eduardo de Jesus Martins e apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

setembro de 2022

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
Departamento de Engenharia Civil

Cláudio Alexandre Monteiro Ferreira

FABRICAÇÃO E RENDIMENTO ESTRUTURAL À FLEXÃO DA MADEIRA LAMELADA COLADA DE FOLHOSAS NO ESPAÇO SUDOESTE

FABRICATION AND STRUCTURAL PERFORMANCE TO BENDING OF GLUED LAMINATED TIMBER OF HARDWOODS IN THE SUDOESTE AREA

Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Estruturas,
orientada pelo Professor Doutor João Henrique Jorge de Oliveira Negrão e pelo Professor Doutor Carlos Eduardo de Jesus Martins.

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC
declina qualquer responsabilidade, legal ou outra, em relação a erros ou omissões que possa conter.

setembro de 2022



UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

AGRADECIMENTOS

Com o aproximar do encerramento do meu percurso académico, que culmina nesta dissertação, resta-me fazer uma retrospectiva e dedicar algumas palavras de agradecimento às instituições e pessoas que me auxiliaram neste percurso.

Ao SerQ – Centro de Inovação e Competências da Floresta pela oportunidade e condições disponibilizadas na realização do presente trabalho, enquadrado no projeto EGURALT (SOE4/P1/E1115);

Aos orientadores, Professor Doutor João Negrão, pela orientação, partilha de conhecimento e disponibilidade no esclarecimento de dúvidas, e Professor Doutor Carlos Martins, pela orientação, pela introdução na investigação científica e transmissão de conhecimento relativo ao tema, bem como pela incansável disponibilidade, ajuda e amizade;

A todos os professores que ao contribuíram para a minha formação;

Ao Bombeiros Voluntários de Montemor-o-Velho, instituição da qual eu orgulhosamente faço parte, pela oportunidade de servir em prol da população e pelos momentos de amizade e companheirismo, em particular com os elementos do Núcleo da Juvebombeiro;

Aos meus colegas e grandes amigos Francisco, João Sousa e João Lopes com quem me cruzei neste percurso no ensino superior e tive o privilégio de partilhar momentos que levarei comigo para toda a vida, assim como eles;

Ao Estraga Reputações pelos 15 anos de amizade, momentos de convivência e por estarem sempre presentes quando necessito;

A todos os meus amigos, família, tios, primos, aos meus queridos avós e irmã;

O meu sincero e sentido agradecimento. Um grande bem haja a todos.

E por fim, mas acima de tudo, dedico esta dissertação ao meu pai Manuel Ferreira e à minha mãe Guida Pereira, pois sem eles nada teria sido possível. Obrigado pela educação, pela confiança, motivação, encorajamento, sermões, por todas as condições dadas para estudar e por me mostrarem que o trabalho compensa. Sem vocês não seria o que sou hoje. É um prazer ser vosso filho e estar-vos-ei eternamente grato.

FINANCIAMENTO

A presente dissertação de mestrado foi desenvolvida no âmbito do Projeto EGURALT, com a referência SOE4/P1/E1115, cofinanciado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) através do Programa INTERREG SUDOE, através da atribuição de uma Bolsa de Investigação de Licenciado ao autor do presente documento que compreendeu a realização dos trabalhos nas instalações do SerQ – Centro de Inovação e Competências da Floresta, na Sertã (Portugal).



RESUMO

A presente dissertação apresenta uma campanha experimental realizada com elementos de madeira maciça e elementos estruturais de madeira lamelada colada provenientes de espécies folhosas do espaço SUDOE, com o objetivo de avaliar as propriedades mecânicas.

Neste trabalho evidenciam-se duas fases distintas: i) caracterização não destrutiva da matéria-prima e caracterização mecânica de madeira maciça à tração e ii) caracterização mecânica de elementos estruturais de madeira lamelada colada.

A primeira fase, contemplou a caracterização física e mecânica de madeira maciça de espécies folhosas, nomeadamente Choupo e Faia (segunda qualidade), tendo em vista avaliar o potencial no fabrico de madeira lamelada colada. A caracterização envolveu ensaios não destrutivos, bem como a preparação e realização de ensaios de tração em madeira maciça, seguindo a norma EN 408 (CEN, 2012).

Na segunda fase procedeu-se ao fabrico e ensaio, em laboratório, de elementos estruturais de madeira lamelada colada de Choupo, Faia, Eucalipto com Choupo e Faia com Choupo, num total de 38 vigas. O fabrico compreendeu a seleção das tábuas, a preparação mecânica das lamelas, a sua distribuição na secção transversal e a colagem. As vigas assim produzidas foram sujeitas a ensaio de flexão de 4 pontos conforme a norma EN 408 (CEN, 2012), bem como a ensaios de delaminação e de resistência ao corte da linha de cola, segundo a norma NP EN 14080 (IPQ, 2019), para verificação da qualidade de colagem.

Complementarmente, no final de cada fase, foi desenvolvida uma análise estatística dos resultados e estes comparados com os obtidos por outros autores. Foi conduzida uma análise de regressão linear simples entre as diversas características/propriedades estudadas, obtendo-se correlações que evidenciam o potencial do método não destrutivo utilizado. A análise das propriedades físicas e mecânicas pretende fomentar o uso destas espécies na construção, tendo-se avaliado as classes de resistência assim como a eficiência estrutural.

Palavras-chave: Madeira lamelada colada; Propriedades mecânicas; Ensaio de tração; Ensaio de flexão; Espécies folhosas.

ABSTRACT

This master thesis presents an experimental campaign carried out with sawn wood elements and structural elements of glued laminated timber made by hardwood species from SUDOE area, with the objective of determining their main mechanical properties.

Two distinct phases are highlighted in this work: i) non-destructive characterization of the raw material and sawn wood mechanical characterization under tensile tests, and ii) mechanical characterization of structural elements of glued laminated timber.

First phase considered the physical and mechanical characterization of sawn wood of hardwood species, namely poplar and beech (second quality), with the aim of access their potential in the glued laminated timber production. The characterization included non-destructive tests as well as tensile tests on sawn wood, in accordance with the EN 408 (CEN, 2012).

In the second phase, a total of 38 glued laminated timber beams were produced and tested at laboratory facilities, considering poplar, beech, eucalyptus with poplar and beech with poplar as species for beams configuration. The production included the selection of the boards, mechanical preparation of the lamellas, their distribution in the cross section and gluing process. The beams produced were submitted to four point bending tests in accordance with the EN 408 (CEN, 2012), and lastly delamination and glue line shear strength tests were performed, following the standard NP EN 14080 (IPQ, 2019), to access the bonding performance.

Complementarily, at the end of each phase, a statistical analysis of the results was made, and a comparison of present results with the available literature. A simple linear regression analysis was carried out between the different characteristics/properties determined, obtaining correlations that show the potential of the non-destructive method used. The physical and mechanical properties analysis intends to promote the use of these species in the construction, through the evaluation of the strength classes and the structural efficiency.

Keywords: Glued laminated timber; Mechanical properties; Tensile tests; Bending tests; Hardwood species.

ÍNDICE

Agradecimentos	i
Financiamento	ii
Resumo	iii
Abstract.....	iv
Índice	v
Índice de figuras	vii
Índice de quadros.....	ix
Simbologia.....	x
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento e considerações iniciais	1
1.2. Objetivos da dissertação	2
1.3. Organização da dissertação	3
2. Estado da arte	4
2.1. Regulamentação existente	4
2.2. Madeira maciça.....	5
2.2.1. Propriedades mecânicas de algumas espécies da floresta europeia	6
2.2.2. Classes de resistência.....	10
2.3. Madeira lamelada colada	11
3. Caracterização mecânica de elementos de madeira maciça	15
3.1. Introdução.....	15
3.2. Caracterização não destrutiva da matéria-prima	15
3.2.1. Metodologia e ensaios	15
3.2.2. Resultados.....	17
3.3. Caracterização mecânica à tração.....	18
3.3.1. Amostragem.....	18
3.3.2. Metodologia e ensaios	18
3.3.3. Resultados e análise	22

3.4.	Conclusão	28
4.	Caracterização mecânica de madeira lamelada colada.....	29
4.1.	Introdução.....	29
4.2.	Produção das vigas	29
4.2.1.	Matéria-prima	30
4.2.2.	Distribuição das lamelas	30
4.2.3.	Colas	33
4.2.4.	Assemblagem das vigas	34
4.3.	Propriedades mecânicas.....	35
4.3.1.	Caracterização não destrutiva das vigas de MLC.....	35
4.3.2.	Método analítico de previsão das propriedades mecânicas	35
4.3.3.	Ensaio estático de flexão.....	36
4.4.	Resultados e discussão	39
4.4.1.	Resultados dos ensaios estáticos.....	39
4.4.2.	Eficiência estrutural	42
4.4.3.	Propriedades mecânicas de referência	44
4.5.	Análise do comportamento mecânico.....	49
4.6.	Avaliação do desempenho e qualidade de colagem	53
4.6.1.	Delaminação	53
4.6.2.	Resistência ao corte das linhas de cola	56
4.7.	Conclusão	59
5.	Conclusões e trabalhos futuros	61
5.1.	Conclusões.....	61
5.2.	Trabalhos futuros.....	62
	Referências Bibliográficas.....	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 - Caracterização mecânica não destrutiva com recurso ao MTG.....	16
Figura 3.2 - Distribuição gráfica das tábuas de Choupo e Faia por classes de módulo de elasticidade dinâmico (E_{dyn}).	17
Figura 3.3 - Configuração de ensaio para determinação do módulo de elasticidade em tração paralela às fibras de uma tábua de Faia.	19
Figura 3.4 - Tábua de choupo após rotura no ensaio de resistência à tração paralela às fibras.	20
Figura 3.5 - Secagem em estufa para determinação do teor de água.....	20
Figura 3.6 - Distribuição gráfica e relação entre o módulo de elasticidade dinâmico e o módulo de elasticidade estático em tração paralela às fibras.....	27
Figura 3.7 - Distribuição gráfica e relação entre o módulo de elasticidade dinâmico e a resistência à tração paralela às fibras.....	28
Figura 4.1 - Configurações adotadas nas vigas produzidas.....	30
Figura 4.2 - Orientação das lamelas das vigas de MLC na classe de serviço 3 (NP EN 14080 (IPQ, 2019)).....	31
Figura 4.3 - Distribuição de módulo de elasticidade dinâmico para as vigas de Choupo (PTP_b).	32
Figura 4.4 - Distribuição de módulo de elasticidade dinâmico para as vigas Faia (SB_b).	32
Figura 4.5 - Distribuição de módulo de elasticidade dinâmico para as vigas híbridas de Choupo e Eucalipto (HBGBP) e vigas híbridas de Choupo e Faia (HSBBP).....	33
Figura 4.6 - Aplicação de cola com espátula denteada e controlo da quantidade de cola por pesagem.	34
Figura 4.7 - Fase de pressão na colagem de uma viga de Choupo.	35
Figura 4.8 - Viga dividida em 3 zonas de rigidez (Anexo 4 da ASTM D 3737-5 (ASTM, 2005)).	36
Figura 4.9 - Instrumentação (<i>layout</i>) de uma viga de Faia no ensaio do módulo de elasticidade.	37
Figura 4.10 - Viga de Choupo durante o procedimento de carga (ensaio de resistência à flexão).	39

Figura 4.11 - Módulo de elasticidade (médio) e eficiência estrutural por tipo de viga.....	43
Figura 4.12 - Resistência à tração (média) e eficiência estrutural por tipo de viga.....	44
Figura 4.13 - Pregas de compressão numa viga HBGBP.	49
Figura 4.14 - Curvas força-deslocamento obtidas para as vigas de Choupo.....	50
Figura 4.15 - Curvas força-deslocamento obtidas para as vigas homogêneas de Faia.....	50
Figura 4.16 - Curvas força-deslocamento obtidas para as vigas combinadas de Faia.....	51
Figura 4.17 - Curvas força-deslocamento obtidas para as vigas de Eucalipto e Choupo.....	51
Figura 4.18 - Curvas força-deslocamento obtidas para as vigas de Faia e Choupo.	51
Figura 4.19 - Delaminações após o 3º ciclo, provete HBGBP (à esquerda), provete PTP (à direita).....	54
Figura 4.20 - Layout de ensaio de resistência ao corte de uma linha de cola.....	56
Figura 4.21 - Resultados da resistência ao corte e da percentagem de rotura pela madeira....	58
Figura 4.22 - Provete SB_b16 após rotura no ensaio de resistência ao corte da linha de cola visto do topo (à esquerda) e vista da linha de cola 4 (à direita).	59

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Resultados obtidos por Ravenshorst (2015).....	7
Quadro 2.2 - Resultados obtidos por Gil-Moreno (2022).	8
Quadro 2.3 - Resultados obtidos por Kovryga <i>et al.</i> (2019).....	9
Quadro 2.4 - Classes de resistência à tração para espécies folhosas europeias de massa volúmica média propostas por Kovryga <i>et al.</i> (2020).	11
Quadro 2.5 - Resultados obtidos nos ensaios de flexão por Castro e Paganini (2003).	12
Quadro 3.1 - Propriedades físicas e mecânicas determinadas na amostra de Choupo (43).	23
Quadro 3.2 - Propriedades físicas e mecânicas determinadas na amostra de Faia (46).	23
Quadro 3.3 - Correspondência entre o valor numérico e qualitativo de correlação.	26
Quadro 3.4 - Correlações entre as principais propriedades físicas e mecânicas nas amostras de Choupo e Faia.	27
Quadro 4.1 - Resumo dos parâmetros de colagem utilizados.....	34
Quadro 4.2 - Resumo das propriedades físicas e mecânicas das 9 vigas de Choupo.....	39
Quadro 4.3 - Resumo das propriedades físicas e mecânicas das 17 vigas de Faia.....	40
Quadro 4.4 - Resumo das propriedades físicas e mecânicas das 7 vigas de Eucalipto e Choupo.	40
Quadro 4.5 - Resumo das propriedades físicas e mecânicas das 5 vigas de Faia e Choupo.	40
Quadro 4.6 - Correlações obtidas entre as propriedades mecânicas para todas as tipologias de viga.	41
Quadro 4.7 - Resumo das propriedades físicas e mecânicas de referência das vigas PTP_b e SB_b.	47
Quadro 4.8 - Resumo das propriedades físicas e mecânicas de referência das vigas HBGBP e HSBBP.	47
Quadro 4.9 - Resumo das cargas e deslocamentos máximos aplicados por tipo de viga.	52
Quadro 4.10 - Resumo dos ensaios de delaminação das vigas ensaiadas à flexão.....	55
Quadro 4.11 - Percentagens mínimas de rotura pela madeira relativas à resistência ao corte.	57
Quadro 4.12 - Resumo dos ensaios de resistência ao corte das vigas ensaiadas à flexão.	57

SIMBOLOGIA

Apresenta-se a listagem dos principais símbolos. Os demais símbolos são definidos à medida que são introduzidos no texto.

A	Área da secção transversal ou área da linha de cola
a	Distância entre o ponto de aplicação da carga e apoio
a_1	Distância entre pontos de aplicação da carga
b	Largura da viga
d_1, d_2, d_3	Distância de cada zona de rigidez ao baricentro da secção
E_1, E_2, E_3	Média dos módulos de elasticidade dinâmico das lamelas de cada zona de rigidez
$E_{12\%}$	Módulo de elasticidade para teor de água de referência de 12%
$E_{c,0}$	Módulo de elasticidade de tração paralela às fibras
E_{dyn}	Módulo de elasticidade dinâmico por via da vibração longitudinal
E_{dyn_f}	Módulo de elasticidade dinâmico da viga por via da vibração longitudinal
E_{dyn_l}	Módulo de elasticidade dinâmico da lamela por via da vibração longitudinal
E_{dyn_t}	Módulo de elasticidade dinâmico da tábua por via da vibração longitudinal
E_i	Módulo de elasticidade da viga i
E_m	Módulo de elasticidade em flexão
$E_{m,g}$	Módulo de elasticidade global à flexão
$E_{m,l}$	Módulo de elasticidade local à flexão
$E_{m,mean}$	Módulo de elasticidade em flexão médio
$E_{t,0}$	Módulo de elasticidade de tração paralela às fibras
$E_{t,0,mean}$	Módulo de elasticidade de tração paralela às fibras médio
$E_{t,90,mean}$	Módulo de elasticidade de tração perpendicular às fibras médio
E_{AC}	Módulo de elasticidade dinâmico obtido por via da vibração longitudinal com recurso a acelerómetro
E_{TSM}	Módulo de elasticidade dinâmico estimado por via do Método da Secção Transformada

E_{MTG}	Módulo de elasticidade dinâmico obtido por via da vibração longitudinal com recurso ao equipamento <i>Machine Timber Grader</i>
F_2-F_1	Incremento de carga aplicada
F_{max}	Valor máximo de carga atuante
$f_{c,0}$	Resistência à compressão paralela às fibras característica
$f_{c,0,k}$	Resistência à compressão paralela às fibras característica
$f_{c,90,k}$	Resistência à compressão perpendicular às fibras característica
f_m	Resistência à flexão
$f_{m,adj}$	Resistência à flexão ajustada com base no fator k , k_h e k_l
$f_{m,k}$	Resistência à flexão característica
$f_{t,0}$	Resistência à tração paralela às fibras
$f_{t,0,adj}$	Resistência à tração paralela às fibras ajustada com base no fator k_h
$f_{t,0,k}$	Resistência à tração paralela às fibras característica
$f_{t,90,k}$	Resistência à tração perpendicular às fibras característica
$f_{v,k}$	Resistência ao corte
$f_{v,k}$	Resistência ao corte característica
G	Módulo de distorção
h	Altura da viga ou maior dimensão da secção transversal
I	Inércia da viga
k	Fator de ajuste em função da espessura das lamelas
k_h	Fator de ajuste relativo à largura da tábua ou fator de ajuste para a altura referência de 600 mm
k_l	Fator de ajuste para as dimensões de ensaio preconizadas na EN 408
$k_s(n)$	Fator de ajuste relativo à dimensão da amostra
k_v	Fator de correção para peças cuja espessura na direção do fio é inferior a 50 mm
l	Comprimento do vão de ensaio
l_l	Distância entre pontos de medição
$l_{linha\ cola}$	Comprimento da linha de cola
$l_{mas,delam}$	Comprimento máximo de delaminação da linha de cola

$l_{total,delam}$	Comprimento total da delaminação no provete
$l_{total,linha\ cola}$	Comprimento total das linhas de cola no provete
m_0	Massa inicial do provete
m_1	Massa anidra do provete
n	Dimensão da amostra
n_j	Número de espécimes da amostra j
T_i	Coefficiente de transformação da secção
t	Espessura das lamelas
w_2-w_1	Incremento de deformação correspondente à carga aplicada (F_2-F_1)
ρ	Massa volúmica
$\rho_{05,j}$	Percentil de 5% da massa volúmica
$\rho_{12\%}$	Massa volúmica para teor de água de referência de 12%
ρ_k	Massa volúmica característica
ρ_{mean}	Massa volúmica média
ω	Teor de água
$\%_{delam,linha}$	Delaminação máxima de uma linha de cola
$\%_{delam,total}$	Delaminação total de um provete

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento e considerações iniciais

A madeira lamelada colada (MLC) teve origem na Alemanha quando, em 1906, Otto Hetzer patenteou um método de colagem de tábuas (Brandt, 2019). A MLC permite o dimensionamento de elementos estruturais que não estão limitados às dimensões da madeira maciça, isto é, permite o fabrico de elementos estruturais de grandes dimensões (teoricamente infinitas), sejam eles curvos ou retos; e com maior resistência quando comparada com a madeira maciça devido à diminuição da variabilidade do material (Wood Solutions, 2022 e Brandt, 2019).

Quando comparada com outros materiais de construção, a massa volúmica da MLC é de cerca de 1/20 da do aço e de 1/6 da do betão armado, resultando numa estrutura mais leve mas com a resistência semelhante e períodos de construção mais reduzidos devido à pré-fabricação (Naturally:wood, 2022).

Em consequência das alterações climáticas, hoje uma realidade mundial, e com o abate de árvores de espécies resinosas para a utilização do Homem, a floresta tem-se vindo a transformar e a ocupação é cada vez mais feita com espécies folhosas. A Organização para a Alimentação e Agricultura das Nações Unidas estima que no ano de 2050 cerca de três quartos da madeira utilizada para fins industriais seja proveniente de plantações de espécies de rápido crescimento (Rescalvo *et al.*, 2021).

A presente dissertação enquadra-se no projeto EGURALT que pretende capitalizar a construção de meia-altura no espaço SUDOE, nomeadamente com foco no uso de espécies locais para fabricação de produtos estruturais de madeira. A Região SUDOE é constituída por Portugal continental, Espanha (exceto as Ilhas Canárias) e as seis regiões do sudoeste de França, motivo pelo qual de seguida se apresenta uma breve resenha da Floresta de Portugal, Espanha e França.

A floresta é a principal ocupação do solo de Portugal continental com um total de 3,224 milhões de hectares (36%), de acordo com os dados do 6º Inventário Florestal Nacional (IFN6). Com um aumento de 60 mil hectares (1,9%) entre 2010 e 2015, os dados mais recentes indicam que cerca de 2/3 da área florestal é ocupada por espécies folhosas, nomeadamente Eucalipto (26,2%), Sobreiro (22,3%), Azinheira (10,8%), Carvalho (2,5%), Castanho (1,5%) e outras folhosas (5,9%) (ICNF, 2019).

Relativamente ao território espanhol, este é ocupado em cerca de 37% por solo florestal arborizado num total de 18,467 milhões de hectares. A área de povoamento florestal de folhosas é de 10,184 milhões de hectares (56% daquele total). A Faia (*Fagus sylvatica*) representa cerca de 2% da área de povoamento florestal arborizado com uma área total de aproximadamente 395 mil hectares (MITECO, 2021).

A floresta francesa é constituída por cerca de 17,0 milhões de hectares, sendo que destes, 9,9 milhões de hectares (58%) são de floresta com espécies folhosas. Em termos de volume em metro cúbico, o Castanho é a espécie predominante (21%), tendo a Faia aproximadamente 5% do volume da madeira em floresta (IGN, 2021).

Tendo em conta todos estes aspetos, bem como o enquadramento da dissertação no Projeto EGURALT e o facto de haver interesse dos parceiros espanhóis na madeira de Faia, este estudo centrou-se essencialmente na caracterização de madeira de Choupo e de Faia (em tração e flexão), bem como na combinação entre estas espécies e a combinação de Choupo com Eucalipto (flexão) dadas as boas propriedades mecânicas e a abundância desta espécie em Portugal e em Espanha.

O Choupo é uma espécie folhosa de crescimento rápido, da qual se obtém madeira macia e de cor clara, com massa volúmica, para um teor de água de 12%, variando entre 280 e 520 kg/m³ (FAO, 1979). É de serragem e secagem fáceis, mas suscetível a deformações e fendas durante a secagem, e apresenta boa aptidão para a colagem (Carvalho, 1996). O mesmo autor refere que a madeira de Choupo tem como principais utilizações a produção de mobiliário, contraplacados, carpintaria fina, fósforos e palitos.

A madeira de Faia é de cor clara (esbranquiçada), homogénea, com grão fino e uniforme, e de massa volúmica entre 710 e 730 kg/m³, aproximadamente. Apresenta fácil serragem, secagem difícil e lenta suscetível ao aparecimento de fissuras ou empenos, boa empregabilidade e colagem fácil (Maderame, 2022). Em Espanha, tem como principal destino o mercado do mobiliário e o da lenha para aquecimento (Martins, 2022).

1.2. Objetivos da dissertação

Esta dissertação tem como objetivo central a avaliação do comportamento de vigas de MLC de folhosas predominantes no espaço SUDOE, visando a caracterização e desempenho mecânicos para fins estruturais, e, partindo dos resultados apresentados, incentivar a produção de MLC com espécies folhosas.

Para tal, foi desenvolvida uma campanha experimental dividida em duas fases. A primeira fase incidiu na caracterização mecânica da madeira maciça e a segunda fase na caracterização do comportamento mecânico de vigas de MLC em flexão.

Pretendeu-se atender aos seguintes objetivos específicos.

- i) Previsão das propriedades mecânicas através de métodos não destrutivos e analíticos de madeira maciça assim como de MLC;
- ii) Caracterização mecânica de madeira de Choupo e Faia à tração;
- iii) Avaliação do desempenho mecânico em flexão de vigas de MLC com espécies folhosas;
- iv) Avaliação da qualidade de colagem de madeira de folhosas;

1.3. Organização da dissertação

Esta dissertação compreende 5 capítulos, organizados da seguinte forma:

Capítulo 1: Uma breve introdução à madeira lamelada colada, apresentando algumas vantagens, seguida de uma breve caracterização da floresta do espaço SUDOE e a distribuição de algumas espécies na floresta, e também algumas considerações sobre a madeira proveniente de Choupo e de Faia. São também apresentados os objetivos e enunciados os processos adotados ao longo do presente trabalho.

Capítulo 2: Estado da arte relativo à temática abordada, com referência a estudos conduzidos nas últimas décadas, nos quais se apresentam sucintamente as matérias-primas, as metodologias de ensaios utilizadas e os resultados obtidos.

Capítulo 3: Caracterização mecânica de duas amostras de madeira maciça com proveniência da Península Ibérica, uma de Choupo e outra de Faia de segunda qualidade. É apresentada a caracterização não destrutiva das tábuas, seguida pela caracterização de uma parte das tábuas com recurso a ensaios de tração. São realizadas a descrição da matéria-prima e da metodologia de ensaio, apresentados os resultados obtidos e, por fim, uma análise e discussão dos mesmos.

Capítulo 4: Caracterização mecânica de vigas de MLC em flexão produzidas em laboratório. Descrevem-se a caracterização da matéria-prima, o processo de seleção das tábuas e os critérios de montagem das lamelas, seguidos do processo de produção das vigas e o protocolo dos ensaios realizados. São ainda apresentados os resultados e a respetiva análise e discussão e, por último, a verificação da qualidade de colagem dos diferentes cenários estudados.

Capítulo 5: No último capítulo do presente documento são realçadas as principais conclusões do trabalho desenvolvido e apresentadas algumas propostas de trabalhos futuros a desenvolver.

2. ESTADO DA ARTE

2.1. Regulamentação existente

No capítulo anterior foi feita uma breve caracterização da floresta do espaço SUDOE, onde se pode concluir que as espécies folhosas representam grande parte da área de floresta desse espaço e que esta tem vindo a aumentar ao longo dos anos. No entanto, o uso destas espécies como matéria-prima para fins estruturais tem sido limitado. No caso da Faia, uma espécie folhosa representativa em Espanha e França, Ehrhart *et al.* (2018) apontam como o principal motivo a falta de normalização e regulamentação do processo de produção e de controlo de qualidade, bem como a ausência de indicação de propriedades mecânicas de MLC com Faia.

Para o correto dimensionamento estrutural é necessário o conhecimento das propriedades mecânicas/classes resistentes, propriedades que para algumas espécies já se encontram definidas não só em classes a nível internacional, bem como através de regulamentação nacional que define classes de âmbito nacional. No caso português, apenas existe regulamentação para a classificação visual de madeira maciça de espécies resinosas de proveniência nacional, nomeadamente para o Pinheiro bravo (*Pinus Pinaster* Ait.), regulamentada pela NP 4305:1995 (atualmente a ser revista) e para a Criptoméria (*Cryptomeria japonica* (L.f.) D. Don) pela NP 4544:2015. Já no caso de Espanha, o número de espécies para a qual existe regulamentação que permite a classificação visual de madeira maciça (proveniente do país) é mais vasto. Na UNE 5644:2011 estão descritos os processos para a classificação visual de madeira maciça para uso estrutural de espécies resinosas, nomeadamente de Pinheiro silvestre (*Pinus sylvestris* L.), de Pinheiro larício (*Pinus nigra* Arn.var. *Salzmanii*), de Pinheiro bravo (*Pinus Pinaster* Ait.) e Pinheiro-insigne (*Pinus radiata* D. Don.). Para as madeiras de espécies folhosas, a UNE 56546:2013 apresenta os procedimentos para a caracterização visual de Eucalipto (*Eucalyptus globulus* Labill.) e para Castanho (*Castanea sativa* Mill.), bem como as classes definidas e suas características.

Relativamente à MLC, os requisitos da matéria-prima e das colas para a fabricação de produtos de MLC estão definidos na NP EN 14080:2019, bem como dos parâmetros para a atribuição de uma classe resistente para MLC mas apenas de espécies resinosas e também o Choupo.

Face à necessidade de se conhecer a matéria-prima a usar na produção de MLC, na EN 338:2016 são estabelecidas as classes de resistência e respetivos requisitos de propriedades mecânicas para a atribuição de classes de resistência às amostras de madeira maciça estudadas. São estabelecidos quadros de propriedades obtidas através de ensaios de flexão, tanto para folhosas como para resinosas. No entanto, no que diz respeito a propriedades determinadas com

base em ensaios de tração, apenas são definidas classes de resistência para resinosas, e para folhosas com comportamento semelhante às resinosas, como o Choupo e o Castanho. Para as restantes espécies de folhosas não há normalização para a classificação de madeira maciça com recurso a ensaios de tração.

Para que a classificação quer da madeira maciça quer da MLC seja possível, é necessário conhecer algumas propriedades mecânicas de referência, isto é, valores característicos da massa volúmica e da resistência, assim como os valores médios do módulo de elasticidade.

Estas propriedades físicas e mecânicas são obtidas partindo de procedimentos experimentais preconizados na EN 408:2010+A1:2012, nomeadamente para: i) módulo de elasticidade local em flexão, ii) módulo de elasticidade global em flexão, iii) módulo de elasticidade em tração paralela às fibras, iv) resistência à tração paralela às fibras e v) resistência à flexão. Constam a descrição das amostras para as várias tipologias de ensaios, os procedimentos de ensaio e as expressões para o cálculo das propriedades a determinar. Esta regulamentação é aplicável a seções retangulares e circulares (de secção aproximadamente constante) de madeira maciça (com e sem *finger-joints*), e de MLC, salvo indicação em contrário.

As propriedades mecânicas das amostras devem ser ajustadas para os valores de referência que têm em conta as dimensões físicas da amostra, as dimensões de ensaio e o teor de água da amostra. Estes ajustes estão definidos na EN 384:2010, assim como um método para a determinação dos valores característicos das propriedades mecânicas e massa volúmica para populações definidas de madeira maciça. Em complemento da EN 384:2010, na EN 14358:2016 constam também métodos estatísticos para a determinação dos valores característicos partindo de resultados de ensaios numa amostra de uma população definida, por exemplo de madeira maciça, parafusos, ligadores e produtos à base de madeira.

A determinação do teor de água da amostra (método de secagem em estufa) é descrita na EN 13183:2002- parte 1.

A qualidade de colagem dos elementos de MLC deve também ser verificada no que à resistência à delaminação e à resistência ao corte diz respeito. Estes procedimentos estão descritos na norma. NP EN 14080:2019.

2.2. Madeira maciça

A madeira, devido a ser um material natural, apresenta alguma variabilidade de difícil quantificação. As propriedades mecânicas da madeira maciça estão dependentes da presença ou não de defeitos na madeira, por exemplo nós ou descaios (Briggert *et al.*, 2020), entre outros. Face aos métodos visuais de classificação da madeira que são dependentes da experiência e conhecimento da pessoa que está a classificar e que introduzem variabilidade nos resultados,

nas serrações e na indústria da MLC há necessidade de métodos que permitam a previsão de valores adequados das propriedades físicas e mecânicas (Briggert *et al.*, 2020).

Nas últimas décadas têm sido desenvolvidos estudos que visam a caracterização mecânica de madeira maciça e a avaliação do grau de confiança de métodos não destrutivos na previsão das propriedades mecânicas. Para tal tem-se recorrido geralmente a ensaios de flexão, quer para espécies resinosas quer para espécies folhosas. Nos últimos anos, face ao crescente uso de madeira para produtos como MLC e madeira lamelada cruzada (CLT) em que são utilizadas tábuas de reduzida espessura, há uma tendência cada vez mais evidente da caracterização mecânica através de ensaios de tração. No entanto, como referido anteriormente, no caso das folhosas, com exceção para o Choupo e o Castanho, ainda não há normas que permitam a atribuição direta de classes de resistência por via da caracterização mecânica à tração.

2.2.1. Propriedades mecânicas de algumas espécies da floresta europeia

Face à variabilidade inerente ao material madeira, torna-se crucial conhecer as propriedades de referência das espécies com vista à sua utilização como madeira para fins estruturais. Nas últimas décadas têm sido mais frequentes os estudos para caracterizar a madeira de folhosas em termos de propriedades mecânicas assim como do comportamento quando submetida a esforços, inicialmente obtidas com recurso a ensaios de flexão.

Em 2014, Guntekin *et al.* realizaram um estudo onde procuraram prever e determinar as propriedades mecânicas de madeira de Faia (*Fagus orientalis* L.) de primeira qualidade. A determinação do módulo de elasticidade dinâmico (E_{dyn}) foi realizada recorrendo ao método de vibração longitudinal e a determinação das propriedades estáticas, nomeadamente o módulo de elasticidade em flexão (E_m) e a resistência à flexão (f_m), com recurso a ensaios de flexão de 3 pontos. Obtiveram valores de E_{dyn} de 10,8 kN/mm², E_m de 10,1 kN/mm² e f_m de 90,5 N/mm². Esta amostra tinha de massa volúmica (ρ) de 590 kg/m³ (Guntekin *et al.*, 2014).

No trabalho desenvolvido por Ravenshorst, em 2015, foram consideradas amostras de várias espécies a serem caracterizadas à flexão, nomeadamente Espruce-europeu (ou da-Noruega, *Picea abies*), de Pseudotsuga (*Pseudotsuga menziesii*) e de Larício (*Larix* spp.), enquanto espécies resinosas, e de Carvalho (*Quercus robur*), Acácia-bastarda (*Robinia pseudoacacia* L.) e Castanho (*Castanea sativa*), enquanto espécies folhosas. Estas amostras tiveram origem em vários países europeus, e foram consideradas diferentes seções transversais. O estudo iniciou com a caracterização não destrutiva (método da vibração longitudinal) da amostra seguindo-se a caracterização destrutiva através de ensaios de flexão de 4 pontos de acordo com a EN 408:2012. Os resultados dos módulos de elasticidade dinâmico e estáticos, assim como da resistência à flexão, obtidos estão sumariados no Quadro 2.1 (Ravenshorst, 2015).

Quadro 2.1 - Resultados obtidos por Ravenshorst (2015).

Espécie	E_{dyn} (kN/mm ²)	$E_{m,l}$ (kN/mm ²)	$E_{m,g}$ (kN/mm ²)	f_m (N/mm ²)
Espruce-europeu (ou da-Noruega)	Entre 11,0 e 16,4	Entre 8,6 e 16,1	Entre 10,0 e 10,8	Entre 37,0 e 62,5
Pseudotsuga	14,1	13,3	-	48,6
Larício	Entre 10,4 e 14,3	Entre 10,4 e 14,7	-	Entre 48,4 e 57,7
Carvalho	Entre 9,0 e 11,2	Entre 8,6 e 9,3	-	Entre 38,8 e 42,0
Acácia-bastarda	15,8	15,4	-	66,1
Castanho	14,1	12,8	11,6	55,1

No ano de 2016, Cibecchini *et al.*, através de campanha experimental, determinaram as propriedades mecânicas de tábuas de Faia (*Fagus sylvatica* L.) e avaliaram o potencial para madeira estrutural. As tábuas consideradas, com duas seções distintas, nomeadamente de 85 × 55 mm² e de 120 × 55 mm², provenientes de Ligúria e da Toscana, regiões de Itália, foram sujeitas e ensaios de flexão de 4 pontos, de acordo com a EN 408:2012. Para a amostra proveniente da Toscana obteve-se E_m de 13,3 kN/mm² e f_m de 70,3 N/mm², enquanto da amostra de Ligúria resultou E_m de 13,1 kN/mm² e f_m de 80,6 N/mm². Quanto à massa volúmica, na amostra da Toscana foi de 692 kg/m³ e na amostra da Ligúria foi de 744 kg/m³ (Cibecchini *et al.*, 2016)

Hodoušek *et al.* (2017) desenvolveram um estudo centrado em vigas maciças de Choupo-híbrido (*Populus x Canadensis*) e de Cedro-do-Buçaco (*Cupressus lusitanica*) com proveniências na Região Centro de Portugal. O módulo de elasticidade dinâmico foi determinado recorrendo ao método de vibração longitudinal com recurso a acelerómetro (E_{AC}) e ao *Machine Timber Grader* (MTG) (E_{MTG}), e o módulo de elasticidade em flexão (E_m) segundo EN 408:2012. Para o Choupo o valor de E_{MTG} foi de 10,4 kN/mm², para E_{AC} foi de 10,0 kN/mm² e de E_m foi 10,1 kN/mm². No Cedro-do-Buçaco, o E_{MTG} resultou em 6,2 kN/mm², o E_{AC} em 6,3 kN/mm² e E_m de 7,1 kN/mm².

Também no Choupo foi conduzido um estudo por Monteiro *et al.* (2019a) em que foram realizados ensaios de caracterização mecânica de madeira limpa, nomeadamente em tração e compressão paralela às fibras. A amostra considerada, proveniente da região de Coimbra, era constituída por madeira de Choupo negro (*Populus nigra*) e de Choupo branco (*Populus alba*). Esta amostra tinha como massa volúmica média 424,5 kg/m³. Foram obtidos, em valores médios, 10,4 kN/mm² para $E_{t,0}$ e 10,2 kN/mm² para $E_{c,0}$. Os valores para $f_{t,0}$ e $f_{c,0}$ foram em média de 69,2 N/mm² e 32,7 N/mm², respetivamente. A amostra, submetida a ensaios de compressão, evidenciou comportamento dúctil (Monteiro *et al.*, 2019a).

Recentemente, Martins *et al.*, (2022) num estudo conduzido sobre as propriedades mecânicas de Faia (*Fagus sylvatica* L.) de segunda qualidade em flexão, reportam valores médios para E_{dyn} de 13,6 kN/mm², E_m de 11,7 kN/mm² e f_m de 64,3 N/mm².

Gil-Moreno *et al.* (2022) procuraram avaliar a relação entre a resistência à flexão com a resistência à tração de Espruce-de-Sitka (*Picea sitchensis*), Espruce-europeu (*Picea abies*) e Pinheiro silvestre (*Pinus sylvestris*). Foi realizada a caracterização não destrutiva das amostras (método da vibração longitudinal) assim como ensaios de flexão e de tração, segundo a EN 408, apresentando-se no Quadro 2.2 os resultados obtidos.

Quadro 2.2 - Resultados obtidos por Gil-Moreno (2022).

Espécie	Flexão			Tração		
	E_{dyn} (kN/mm ²)	E_m (kN/mm ²)	f_m (N/mm ²)	E_{dyn} (kN/mm ²)	$E_{t,0}$ (kN/mm ²)	$f_{t,0}$ (N/mm ²)
Espruce de-Sitka e Espruce Europeu	8,89	6,74	30,8	10,0	8,56	23,5
Pinho silvestre	11,2	9,5	38,2	9,96	8,23	19,4

Face à análise dos resultados, os autores concluíram que a equação fornecida nas normas de classificação europeias, para classes de resistência mais baixas de flexão, subestima a resistência à tração no Espruce obtido a partir de ensaios de flexão, enquanto para o Pinheiro silvestre esta conversão foi ligeiramente sobrestimada (Gil-Moreno, 2022).

Relativamente às propriedades mecânicas das espécies com recurso a ensaios de tração, Ehrhart *et al.* (2016a), de entre outros objetivos, considerou o estudo das propriedades mecânicas à tração da Faia europeia (*Fagus sylvatica* L.), segundo a EN 408:2012. As tábuas da amostra tiveram proveniência em 4 regiões da Suíça, e destas foram selecionadas aleatoriamente 200 tábuas. Os resultados obtidos neste estudo para $E_{t,0}$ foram de 14,5 kN/mm² e de 66,7 N/mm² para $f_{t,0}$, valores já corrigidos e ajustados ao teor de água de referência, disposições de ensaio e dimensão das tábuas. (Ehrhart *et al.*, 2016a).

Os mesmos autores, numa outra amostra de Faia europeia (*Fagus sylvatica* L.) submetida a ensaios de tração, e de dimensão de 297 tábuas, obtiveram $E_{t,0}$ de 15,2 kN/mm² e $f_{t,0}$ de 56,2 N/mm². A massa volúmica da amostra, foi de 724 kg/m³ (Ehrhart *et al.*, 2016b).

De igual forma, Kovryga *et al.* (2019) determinaram as propriedades mecânicas de Freixo (*Fraxinus* spp.) e Bôrdo (*Acer* spp.) através de métodos não destrutivos (vibração longitudinal) e através de ensaios destrutivos de tração (EN 408:2010). Os resultados estão sumariados no Quadro 2.3.

Quadro 2.3 - Resultados obtidos por Kovryga *et al.* (2019).

Espécie	E_{dyn} (kN/mm ²)	$E_{t,0}$ (kN/mm ²)	$f_{t,0}$ (N/mm ²)	ρ (kg/m ³)
Freixo	15,3	14,5	61,8	685
Bôrdo	14,5	13,8	53,4	664

Num estudo conduzido por Briggert *et al.* (2020), foram ensaiadas à tração 967 tábuas de Espruce-europeu (*Picea abies*) provenientes da Noruega, da Finlândia e de 3 regiões da Suécia. Os ensaios seguiram a EN 408:2012. As tábuas tinham massa volúmica média de 447 kg/m³ e dos ensaios resultaram valores médios de $E_{t,0}$ de 12,0 kN/mm² e $f_{t,0}$ de 30,4 N/mm².

Num trabalho realizado por Moltini *et al.* (2022), foram determinadas as propriedades mecânicas à tração de 569 tábuas de Eucalipto (*Eucalyptus globulus* L.). Obtiveram-se valores médios de 20,9 kN/mm² para $E_{t,0}$ e 73,7 N/mm² para $f_{t,0}$. A massa volúmica média foi de 850 kg/m³.

Foram apresentados acima estudos onde o objetivo se centrou na determinação de propriedades mecânicas, mas em que também foi avaliada a utilização de métodos não destrutivos na previsão das propriedades mecânicas de madeira maciça em variadas espécies. Num destes estudos, desenvolvido por Guntekin *et al.* em elementos de Faia (*Fagus orientalis* L.), obtiveram-se coeficientes de correlação de 0,93 entre E_{dyn} (obtido por via do método de vibração longitudinal) e E_m e de 0,85 entre E_{dyn} e f_m , concluindo que naquela amostra as propriedades de flexão podem ser estimadas pelo método de vibração longitudinal (Guntekin *et al.*, 2014).

Também Martins (2015), num trabalho que incidiu sobre 50 elementos de madeira de Eucalipto (*Eucalyptus globulus*) de secção 73 × 75 mm² (largura × altura), reporta coeficientes de correlação muito fortes, onde obteve 0,94 para o coeficiente de correlação entre E_{dyn} (obtido pelo método de vibração longitudinal) e E_m , e na correlação entre E_{dyn} e f_m um coeficiente de 0,59.

Hodoušek *et al.* (2017), no estudo enunciado anteriormente, obtiveram correlações muito fortes entre as propriedades, nomeadamente módulo de elasticidade dinâmico (vibração longitudinal) e módulo de elasticidade estático. Para o Choupo obtiveram correlação de 0,90 entre E_{MTG} e E_m e de 0,91 entre E_{AC} e E_m . No caso da amostra de Cedro-do-Buçaco, os coeficientes de correlação resultaram em 0,93 entre o E_{MTG} e E_m e de 0,94 entre E_{AC} e E_m . Concluíram que os métodos usados para previsão das propriedades são eficazes, nomeadamente com recurso ao MTG (Hodoušek *et al.*, (2017). No entanto, e tendo em conta os princípios de funcionamento de ambos os métodos não destrutivos, o MTG é o método mais prático de usar, uma vez que neste método apenas um dos topos das tábuas necessita estar acessível, contrariamente ao recurso ao

acelerómetro, onde num dos topos é induzida a perturbação e no topo oposto é feita a leitura da vibração da peça. Referir ainda que o acelerómetro é mais sensível à intensidade do impacto induzido pelo operador, bem como das condições de apoio (vibrações externas).

No Freixo, as correlações obtidas entre E_{dyn} e $E_{t,0}$ foram de 0,86 e entre E_{dyn} e $f_{t,0}$ foram de 0,52, enquanto no Bôrdo, as correlações reportadas foram de 0,43 entre E_{dyn} e $E_{t,0}$ e de 0,54 entre E_{dyn} e $f_{t,0}$ (Kovryga *et al.*, 2019).

Também Gil-Moreno *et al.* reportam, para madeira maciça de Espruce-de-Sitka (*Picea sitchensis*), Espruce-da-Noruega (*Picea abies*) e Pinheiro silvestre (*Pinus sylvestris*), correlação entre o módulo de elasticidade dinâmico e estático (de flexão ou tração) igual ou superior a 0,83 e correlação entre o módulo de elasticidade dinâmico e a resistência à flexão e à tração superior a 0,51 (Gil-Moreno *et al.*, 2021).

2.2.2. Classes de resistência

Como referido na secção 2.1, não há nenhuma norma que permita a classificação de folhosas através das suas propriedades mecânicas em tração. Face a esta ausência e devido ao método para atribuição destas classes, através de equações presentes na EN 384:2010, ser declaradamente conservador, Kovryga *et al.* realizaram um estudo com a pretensão de sugerir a criação de classes de resistência à tração de folhosas de massa volúmica média. Consideraram uma amostra com 300 tábuas de Faia europeia (*Fagus sylvatica*), 57 tábuas de Ácer-do-Japão (*Acer sp.*) e 1309 tábuas de Freixo-europeu (*Fraxinus excelsior*). Desta amostra, 324 tábuas de Freixo-europeu foram ensaiadas à flexão, sendo que as restantes tábuas foram ensaiadas à tração. Ambos os ensaios seguiram os pressupostos da EN 408:2012. Previamente aos ensaios destrutivos foram realizados ensaios não destrutivos para determinação do módulo de elasticidade dinâmico com recurso ao método de vibração longitudinal. Foram determinados os valores característicos e comparados com os valores das classes T da EN 338:2016. Após análise de várias propriedades, os autores propuseram classes DT (D de “*Deciduous*” e T de “*Tension*”) para a classificação de folhosas à tração (Kovryga *et al.*, 2016).

Em 2020, os mesmos autores publicaram um novo estudo, semelhante ao realizado em 2016, no qual a amostra considerada foi superior, onde propõem a revisão das classes de resistência por eles anteriormente realizada, ao nível da quantidade de classes e dos seus valores característicos. A versão mais recente das classes de resistência à tração de folhosas de massa volúmica média propostas estão sintetizadas no Quadro 2.4 (Kovryga *et al.*, 2020).

Quadro 2.4 - Classes de resistência à tração para espécies folhosas europeias de massa volúmica média propostas por Kovryga *et al.* (2020).

	Propriedade	DT22	DT24	DT28	DT30	DT34	DT38	DT42	DT46	DT50
Propriedades de resistência (N/mm ²)	$f_{m,k}$	37	40	46	49	55	61	67	73	79
	$f_{t,0,k}$	22	24	28	30	34	38	42	46	50
	$f_{t,90,k}$	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4
	$f_{c,0,k}$	32	33	3	536	37	39	41	42	43
	$f_{c,90,k}$	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6
	$f_{v,k}$	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5
Propriedades de rigidez (N/mm ²)	$E_{t,0,mean}$	13000	13500	14000	14500	15000	15500	16000	16500	17000
	$E_{t,90,mean}$	810	830	880	930	1000	1030	1070	1100	1130
Massa volúmica (kg/m ³)	ρ_k	550	550	550	550	610	610	620	630	640
	ρ_{mean}	660	660	660	660	730	730	740	750	760

Nota: $f_{m,k}$ é a resistência à flexão característica; $f_{t,0,k}$ e $f_{t,90,k}$ são, respetivamente, a resistência à tração paralela às fibras e a resistência à tração perpendicular às fibras características; $f_{c,0,k}$ e $f_{c,90,k}$ são, respetivamente, a resistência à compressão paralela às fibras e a resistência à compressão perpendicular às fibras características; $f_{v,k}$ é a resistência ao corte característica; $E_{t,0,mean}$ é o módulo de elasticidade de tração paralela às fibras médio; $E_{t,90,mean}$ é o módulo de elasticidade de tração perpendicular às fibras médio; ρ_k é a massa volúmica característica; e ρ_{mean} a massa volúmica média.

2.3. Madeira lamelada colada

Para que o uso de MLC de Choupo seja implementado no setor da construção como material estrutural, é necessário saber quais as propriedades que este produto apresenta, de entre as quais se podem destacar a massa volúmica (ρ), o módulo de elasticidade (E_m) e a resistência à flexão (f_m). Na determinação destas propriedades, especificamente a resistência à flexão, é necessário recorrer a ensaios de rotura dos elementos ficando, deste modo, a sua posterior utilização inviabilizada. Surge então a necessidade da utilização de métodos não destrutivos na previsão das propriedades mecânicas dos elementos, nomeadamente através do recurso a equipamentos onde através de correlações entre estas propriedades físicas e as propriedades mecânicas é possível obter a classe resistente do elemento.

Alvite *et al.* realizaram um estudo que incidiu sobre as propriedades mecânicas em flexão de elementos de MLC de Eucalipto (*Eucalyptus globulus*), de secção $72 \times 86 \text{ mm}^2$, sem *finger-joint* (lote A) e com *finger-joint* (lote B). Os ensaios seguiram os pressupostos da norma UNE EN408 no que à configuração de ensaio diz respeito, no entanto o módulo de elasticidade em flexão foi determinado segundo esta norma e segundo prEN 408:2000. Considerando apenas as propriedades calculadas de acordo com prEN408:2000, do lote A obtiveram-se, em

valores médios, E_m de 20339 N/mm² e f_m de 125,3 N/mm², enquanto no lote B obteve-se E_m de 21219 N/mm² e f_m de 103,4 N/mm² (Alvite *et al.*, 2002).

No ano de 2003, Castro e Paganini conduziram um estudo completo em vigas de MLC onde determinaram as propriedades mecânicas, com recurso a ensaios de flexão preconizados na EN 408, e avaliaram a qualidade de colagem através de ensaios de resistência à delaminação e resistência ao corte. A matéria-prima usada foi de Choupo (*Populus x euramericana*, clone ‘Neva’) e Eucalipto (*Eucalyptus grandis*, clones ‘7’, ‘329’, ‘330’ e ‘358’). Foram consideradas 3 tipos de configuração de vigas, nomeadamente vigas de Choupo, vigas híbridas de Eucalipto (2 lamelas mais exteriores) e Choupo (5 lamelas interiores), e vigas de Eucalipto. Os resultados obtidos nos ensaios de flexão estão sumariados no Quadro 2.5 (Castro e Paganini, 2003).

Quadro 2.5 - Resultados obtidos nos ensaios de flexão por Castro e Paganini (2003).

Configuração da viga	$\rho_{12\%}$ (kg/m ³)	E_m (N/mm ²)	f_m (N/mm ²)
Choupo	385	9637	44,1
Choupo e Eucalipto (<i>E. grandis</i> ‘7’)	424	10690	50,6
Choupo e Eucalipto (<i>E. grandis</i> ‘330’)	489	14553	59,7
Choupo e Eucalipto (<i>E. grandis</i> ‘339’)	428	10551	46,5
Choupo e Eucalipto (<i>E. grandis</i> ‘358’)	429	10886	50,2
Eucalipto (<i>E. grandis</i> ‘7’)	535	11562	56,8
Eucalipto (<i>E. grandis</i> ‘330’)	725	17433	93,2
Eucalipto (<i>E. grandis</i> ‘339’)	553	11601	55,9
Eucalipto (<i>E. grandis</i> ‘358’)	565	12068	62,8

Os autores referem que as vigas híbridas de Eucalipto e Choupo mostraram comportamento de rotura pseudo-dúctil. Concluíram que houve um excelente desempenho em todas as vigas no que à resistência à delaminação diz respeito, nomeadamente na interface Choupo-Eucalipto devido à similaridade dos valores de retração. Relativamente à resistência ao corte das linhas de cola, também os resultados foram considerados pelos autores como excelentes, concluindo que a resistência ao corte das linhas de cola estava relacionada com a resistência ao corte dos clones (Castro e Paganini, 2003).

Com a pretensão de avaliar a resistência à flexão de Faia europeia (*Fagus sylvatica*), Frese e Blaß conduziram uma campanha experimental em 47 vigas combinadas de Faia, divididas em 3 classes de resistência expectáveis (muito alta, alta e baixa). A cada uma destas classes corresponde uma configuração diferente de lamelas. Foram realizados ensaios de flexão de 4

pontos. De entre todas as vigas obtiveram valores entre 12,3 e 16,0 kN/mm² para E_m e entre 43,3 e 63,7 N/mm² para f_m (Frese e Blaß, 2006).

Num estudo onde avaliaram as propriedades mecânicas de tábuas de madeira maciça de Faia (*Fagus sylvatica*) em flexão, Ehrhart *et al.* (2016b), após a análise das propriedades obtidas, do enquadramento em classes T e consultando os requisitos mínimos das tábuas para cada classe de resistência de MCL explicitadas na EN14080:2013, concluíram que é possível obter elementos de MLC pelo menos da classe GL40c. No entanto, devido à falta de modelos apropriados para estas classes de alta resistência, e tendo em conta que para a espécie estudada não há regulamentação para fabrico de MLC, as propriedades de rigidez e resistência estimadas para MLC podem ser incertas (Ehrhart *et al.*, 2016b).

No seguimento do estudo anterior, Ehrhart *et al.*, conduziram, entre 2017 e 2018, um estudo para caracterizar MLC de Faia onde realizaram, entre outros, ensaios de flexão. Classificaram a matéria-prima, proveniente de 4 regiões suíças, de acordo com os critérios para atribuição de classes de resistência T estudadas por Ehrhart *et al.* em 2016 (ver Ehrhart *et al.*, 2016a e 2016b), e produziram 39 vigas de MLC para classes de resistência GL40c, GL48c e GL55c, esta última com diferentes dimensões de vigas. Dos ensaios de flexão de 4 pontos resultaram no E_m entre 14,2 e 16,2 kN/mm², na f_m entre 58,1 e 78,3 N/mm² e a $f_{m,k}$ entre 48,9 e 63,5 N/mm². Observaram que a rotura acontecia primordialmente pelas ligações de *finger-joint* e/ou por corte ao longo das fibras das lamelas externas. Concluíram que quanto maior é a altura da secção das vigas, menor é a resistência à flexão, uma vez que com o aumento da altura da secção aumenta também o número de *finger-joints* na zona crítica flexão-tensão. Concluíram também que é possível obter vigas de MLC de Faia com classes de resistência GL40c, GL48c e GL55c, uma vez que a resistência à flexão característica foi superior à resistência mínima quando considerados os grupos de vigas de forma individual pelas classes de resistência para que foram produzidas (Ehrhart *et al.*, 2018).

Também Martins (2018) realizou um estudo em vigas com configurações várias, nomeadamente: vigas de Pinho bravo e vigas de Choupo. Com base nas propriedades determinadas para as lamelas das vigas, foi calculada, com base no Método da Secção Transformada, a previsão do módulo de elasticidade dinâmico (E_{TSM}). As vigas foram alvo de ensaios destrutivos, nomeadamente ensaio de flexão de 4 pontos, pela EN 408:2012, para a determinação das propriedades mecânicas como o módulo de elasticidade e a resistência à flexão. Nas vigas de Pinho obteve E_m de 12915 N/mm² e f_m de 62,0 N/mm², enquanto nas vigas de Choupo obteve E_m de 10533 N/mm² e f_m de 55,6 N/mm². Quanto à massa volúmica das vigas ensaiadas, esta foi de 638,6 kg/m³ para as vigas de Pinho bravo e nas de Choupo foi de 428,6 kg/m³. O autor refere que foi possível observar comportamento não-linear em 71% das vigas de Choupo, destacando que em 2/3 das vigas ocorreram pregas de compressão nas lamelas

à compressão. Além disso, apresenta ainda valores de correlação entre E_{TSM} e E_m de 0,93 para as vigas de Choupo e de 0,91 para as de Pinho, enquanto a correlação entre E_{TSM} e f_m foi de 0,85 para as de Choupo e de 0,67 para as de Pinho. Quanto à verificação da qualidade de colagem, quer as vigas de Choupo quer as de Pinho cumpriram com os critérios de delaminação (2º e 3º ciclos) e com os critérios de resistência ao corte das linhas de cola (Martins, 2018)

Monteiro *et al.* (2019b) conduziram um estudo onde foram consideradas vigas de Choupo, para as quais foi feita uma caracterização das propriedades assim como do comportamento mecânico. Reportam que mais de dois terços das vigas tiveram comportamento não-linear (apresentaram comportamento dúctil) sendo que a deformação última foi de aproximadamente 68,7 mm. Das vigas com comportamento elástico linear, o valor de f_m foi de 42,9 N/mm² e a deformação última de 44,3 mm, enquanto nas vigas com comportamento não-linear foi de 60,3 N/mm² e 75,5 mm para f_m e deformação máxima, respetivamente (Monteiro *et al.*, 2019b).

Martins *et al.* (2020) desenvolveram um estudo com o objetivo de fazer uma caracterização mecânica de vigas de MLC de Eucalipto e de vigas de Eucalipto e Choupo (vigas com 5 lamelas, sendo as 3 centrais de Choupo). Para além das propriedades mecânicas, através de ensaios de flexão de 4 pontos (EN 408:2012), pretenderam também predizer estas propriedades através de métodos não destrutivos, bem como aferir a qualidade da colagem. Na previsão das propriedades foram utilizados os métodos de vibração longitudinal, e o método da homogeneização ou da Secção Transformada. As propriedades mecânicas das vigas de Eucalipto obtidas foram E_m de 22341 N/mm² e f_m de 114,9 N/mm², enquanto nas vigas híbridas de Choupo e Eucalipto o E_m foi de 18302 N/mm² e a f_m de 91,0 N/mm². Em ambas tipologias de vigas foi observado comportamento dúctil e, associadas a este comportamento, a formação de pregas de compressão. A massa volúmica foi de 940 e 640 kg/m³ nas vigas de Eucalipto e Eucalipto com Choupo, respetivamente. Referem que as correlações obtidas entre $E_{TSM}-E_m$ e $E_{dyn}-E_m$ foram superiores a 0,94, que as correlações obtidas entre os módulos de elasticidade dinâmicos e a resistência à flexão das vigas de Eucalipto foram de 0,60 ($E_{TSM}-f_m$) e 0,65 ($E_{dyn}-f_m$) e que para as vigas de Eucalipto com Choupo foram 0,93 ($E_{TSM}-f_m$) e 0,94 ($E_{dyn}-f_m$). Quanto à qualidade de colagem, excetuando um provete de Eucalipto com Choupo, os limites de delaminação total definidos para espécies resinosas foram excedidos, quer no final do 2º ciclo quer do 3º ciclo, enquanto na resistência ao corte das linhas de cola apenas 3 linhas não cumpriram os critérios (Martins *et al.*, 2020).

3. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE ELEMENTOS DE MADEIRA MACIÇA

3.1. Introdução

Este capítulo compreende uma caracterização de toda a matéria-prima objeto de estudo, recorrendo a ensaios não destrutivos, e de parte desta amostra com recursos a ensaios destrutivos. Começa-se por apresentar as espécies consideradas bem como as suas proveniências, seguindo-se uma breve descrição dos procedimentos e por fim a apresentação e discussão dos resultados obtidos bem como a análise estatística das várias propriedades físicas e mecânicas determinadas.

3.2. Caracterização não destrutiva da matéria-prima

3.2.1. Metodologia e ensaios

A caracterização não destrutiva de madeira maciça abarcou uma série de procedimentos e ensaios que permitiram caracterizar detalhadamente as amostras de madeira utilizadas neste estudo, concretamente de madeira de Choupo (*Populus* spp.) e de Faia (*Fagus sylvatica* L.) de segunda qualidade, doravante designada apenas por Faia.

A amostra de madeira maciça de Choupo considerada foi uma amostra já existente nas instalações do SerQ – Centro de Inovação e Competências da Floresta. De acordo com Martins (2018), existem 3 clones na floresta nacional, Choupo híbrido (*Populus x-canadensis* Moench), Choupo negro (*Populus nigra* L.) e Choupo branco (*Populus alba* L.). Esta amostra foi proveniente da região centro do país, e face à caracterização realizada (massa volúmica), é provável que os 3 clones estejam presentes na amostra, apesar de não ser possível determinar a respetiva proporção. Desde a sua receção no SerQ a amostra foi armazenada em espaço climatizado (temperatura de 20 ± 2 °C e humidade relativa de $65\pm 5\%$), tendo os ensaios não destrutivos decorrido neste mesmo espaço.

No que à amostra de madeira de Faia diz respeito, a ADEMAN - Asociación de Empresarios de la Madera de Navarra forneceu 320 tábuas de Faia de segunda qualidade, no âmbito do projeto EGURALT, no qual é entidade participante. Esta classificação é devida ao facto de em Espanha, baseadas em critérios estéticos, a Faia ser comercializada em 2 qualidades. A Faia de primeira qualidade é usada sobretudo para mobiliário e a Faia de segunda qualidade tem como destino o aproveitamento energético, nomeadamente para lenha. À semelhança da receção das tábuas de Choupo, as de Faia foram também armazenadas no espaço com controlo de temperatura e humidade no qual decorreram os ensaios não destrutivos.

Os trabalhos iniciaram-se pela caracterização física da matéria-prima, tendo todas as tábuas sido alvo de medição no que diz respeito a: comprimento, largura, espessura, teor de água (ω) e massa. Para a determinação da secção transversal das tábuas, tanto a espessura como a largura foram medidas em três secções (secções próximas de ambos os topos e secção a meio do comprimento), determinando-se depois os valores médios para estas dimensões. Após a medição do comprimento e da massa, foram calculadas as massas volúmicas de cada tábua.

A medição do teor de água teve lugar com recurso a um higrómetro de agulhas. Foram efetuadas três leituras em três secções distintas, nomeadamente a meio do comprimento e a uma distância não inferior a 0,3 m de ambas as extremidades das tábuas, cumprindo assim com a indicação do Anexo G da NP EN 14080 (IPQ, 2019). A profundidade de penetração da tábua em análise foi superior a 30% da espessura, tal como requerido.

Finalizadas as medições, prosseguiu-se para a caracterização mecânica não destrutiva, que consistiu na determinação do módulo de elasticidade dinâmico de cada tábua (E_{dyn}) através do método de vibração longitudinal com recurso ao *Machine Timber Grader* (MTG). Este equipamento, ao projetar contra o topo da peça uma pequena esfera metálica, provoca uma vibração que percorre todo o comprimento da peça regressando ao topo onde foi emitida, e como *output* indica o módulo de elasticidade dinâmico por via de processamento do sinal em *software* próprio do equipamento tendo por base a frequência de vibração. As tábuas foram simplesmente apoiadas nas extremidades tendo-se considerado, nos apoios, chapas de aço com uma membrana de neopreno entre as mesmas e a tábua, para minimizar as perturbações de vibrações externas, como se pode visualizar na Figura 3.1. Como *input* no equipamento foram consideradas as características físicas anteriormente medidas para cada tábua: i) espessura, ii) largura, iii) comprimento, iv) massa e v) teor de água. A caracterização não destrutiva da amostra foi realizada em todas as tábuas de ambas as espécies.



Figura 3.1 - Caracterização mecânica não destrutiva com recurso ao MTG.

3.2.2. Resultados

Para as 158 tábuas da amostra de Choupo obtiveram-se as dimensões médias de 2576 mm × 115 mm × 39 mm (comprimento × largura × espessura), massa volúmica média e desvio padrão de 428,3 kg/m³ ± 43,8 kg/m³, respetivamente, sendo o valor mínimo de 317,1 kg/m³ e valor máximo de 536,7 kg/m³. Na Faia, das 320 tábuas da amostra, obtiveram-se as dimensões médias de 2815 mm × 121 mm × 30 mm (comprimento × largura × espessura), massa volúmica média e desvio padrão de 693,7 kg/m³ ± 37,6 kg/m³, respetivamente, sendo o valor mínimo de 584,8 kg/m³ e valor máximo de 816,9 kg/m³.

Relativamente à caracterização mecânica não destrutiva das 158 tábuas de Choupo, o valor médio do módulo de elasticidade dinâmico (E_{dyn}) foi de 11321 N/mm², com o valor mínimo e máximo de 6679 N/mm² e 15571 N/mm², respetivamente.

Quanto às tábuas de Faia, só numa delas não foi possível realizar este ensaio devido à quantidade de defeitos que a tábua apresentava. O valor médio do módulo de elasticidade dinâmico foi de 12583 N/mm², com o valor mínimo e máximo de 8682 N/mm² e 17514 N/mm², respetivamente.

O E_{dyn} da Faia foi 11% superior ao do Choupo apesar de a massa volúmica ser 62% superior. Isto pode, em certa medida, estar relacionado com a presença de defeitos (nós, descaios e fissuras, por exemplo) nas tábuas de Faia ser mais acentuada que nas tábuas de Choupo.

Na Figura 3.2 são apresentadas as distribuições do módulo de elasticidade dinâmico em intervalos, obtidas na caracterização não destrutiva das amostras.

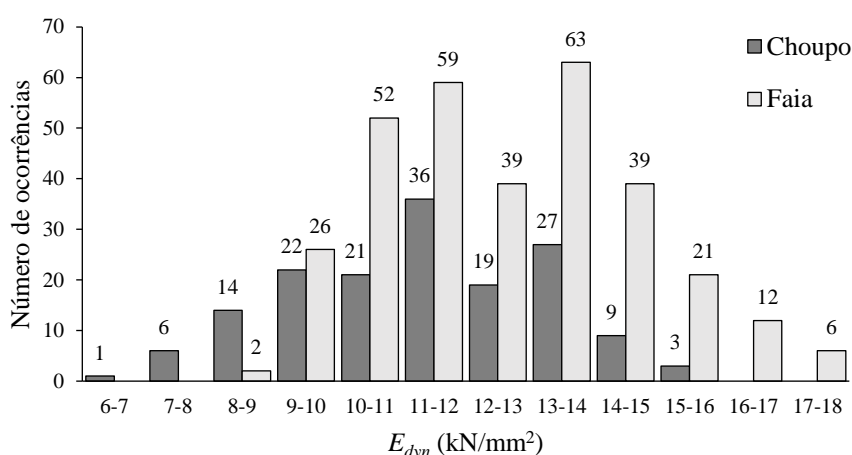


Figura 3.2 - Distribuição gráfica das tábuas de Choupo e Faia por classes de módulo de elasticidade dinâmico (E_{dyn}).

3.3. Caracterização mecânica à tração

3.3.1. Amostragem

De acordo com a EN 384 (CEN, 2010), a determinação de propriedades mecânicas deve ser realizada em amostras com um número de provetes não inferior a 40. Deste modo, com base nas amostras descritas na secção 3.2, foram selecionadas 45 tábuas de Choupo e 46 tábuas de Faia. Como critérios para a seleção das tábuas foram seguidas duas diretrizes: i) representar de forma mais fiel a distribuição de E_{dyn} determinada na secção 3.2 (Figura 3.2); ii) a amostra ser representativa, ou seja, contemplar também tábuas com defeitos (nós, por exemplo).

O lote de tábuas de Choupo selecionadas para caracterização à tração apresenta dimensões médias de $2033 \times 114,9 \times 38,5 \text{ mm}^3$ (comprimento \times largura \times espessura). Em 25 tábuas da amostra (56%) verificou-se a presença de nós e/ou falhas mecânicas visíveis no comprimento livre entre as garras da amarração. Já o lote de Faia considerado apresenta dimensões médias de $2087 \times 120,8 \times 29,9 \text{ mm}^3$ (comprimento \times largura \times espessura), de entre as quais 26 tábuas (57%) apresentavam defeitos na zona interior de medição (zona situada entre as garras de amarração) tais como nós, ligeiros empenos do tipo arco de face e/ou danos mecânicos.

3.3.2. Metodologia e ensaios

Os ensaios de determinação do módulo de elasticidade de tração paralela às fibras ($E_{t,0}$) e da resistência à tração paralela às fibras ($f_{t,0}$) foram preparados e executados segundo os pressupostos das cláusulas 12 e 13 da EN 408 (CEN, 2012), respetivamente.

De acordo com as referidas cláusulas, o comprimento de ensaio livre deve ser de 9 vezes a maior dimensão da secção transversal ($9h$). A este comprimento acresce o comprimento de amarração das tábuas ao equipamento de ensaio, sendo necessários 500 mm para cada extremidade. Assim, cada tábua foi cortada para o comprimento final de $9h + 1000 \text{ mm}$, procurando dispor, sempre que possível, os defeitos existentes ou na secção de amarração ou no troço central de ensaio. Dadas as alterações de comprimento e em alguns casos, eliminação de defeitos, optou-se por proceder a uma nova caracterização não destrutiva nas tábuas com o comprimento final para os ensaios de tração, obtendo-se um novo valor para o módulo de elasticidade dinâmico, E_{dyn_t} .

Seguidamente, marcaram-se as tábuas com os locais de amarração, a zona de medição de deformações e a secção central. A zona de medição de deformações tem comprimento de 5 vezes a maior dimensão da secção transversal ($5h$), e deve distar pelo menos $2h$ das garras de amarração. Também se procedeu à inspeção visual das tábuas na zona central de ensaio, tendo-se anotado os defeitos significativos como nós e/ou danos mecânicos.

Os instrumentos de medição utilizados foram 2 transdutores de deslocamento lineares de 25 mm de capacidade máxima, um para cada lado da tábua, conforme se pode observar na Figura 3.3. A deformação considerada no cálculo foi a deformação resultante da média das deformações obtidas nos dois transdutores de deslocamento.



Figura 3.3 - Configuração de ensaio para determinação do módulo de elasticidade em tração paralela às fibras de uma tábua de Faia.

Terminado o ensaio de tração, os dados recolhidos foram tratados e foi determinado o módulo de elasticidade em tração paralelo às fibras ($E_{t,0}$) através da Equação (1).

$$E_{t,0} = \frac{l_1(F_2 - F_1)}{A(w_2 - w_1)} \quad (1)$$

em que l_1 é a distância entre pontos de medição, $(F_2 - F_1)$ é o incremento de carga aplicada, A é a área da secção transversal e $(w_2 - w_1)$ é o incremento da deformação correspondente à carga aplicada $(F_2 - F_1)$.

Seguidamente os instrumentos de medição foram removidos e a tábua ensaiada até à rotura (ver Figura 3.4) para a determinação da resistência à tração paralela às fibras ($f_{t,0}$), calculada através da Equação (2).

$$f_{t,0} = \frac{F_{max}}{A} \quad (2)$$

onde F_{max} é o valor máximo de carga atuante e A é a área da secção transversal.



Figura 3.4 - Tábua de choupo após rotura no ensaio de resistência à tração paralela às fibras.

Os modos de rotura foram registados e as tábuas analisadas para averiguar se houve influência dos defeitos na rotura.

Após a rotura, foi retirado pelo menos um provete de cada tábua para determinação do teor de água em estufa como se observa na Figura 3.5. O provete foi obtido, sempre que possível, do vão de ensaio e salvaguardando pelo menos 300 mm até ao topo da tábua, evitando também que estas peças tenham a presença de algum tipo de defeitos (nó, descaio, etc), respeitando os pressupostos da EN 13183-1 (CEN, 2002). Foram determinadas as dimensões dos provetes bem como a sua massa, e foram posteriormente colocados numa estufa de secagem a 103 ± 2 °C até que a diferença de massa entre pesagens consecutivas fosse inferior a 0,1%. O teor de água (ω) foi calculado através da Equação (3).

$$\omega = \frac{m_0 - m_1}{m_1} \times 100 \quad (3)$$

em que m_0 é a massa inicial do provete e m_1 é a sua massa anidra.



Figura 3.5 - Secagem em estufa para determinação do teor de água.

De acordo com a EN 384 (CEN, 2010), se o teor de água dos provetes se situar entre 8% e 18%, os valores das propriedades mecânicas devem ser ajustados para as condições de referência, nomeadamente os valores característicos e médios. Adicionalmente, os valores de massa volúmica devem igualmente ser ajustados para as condições de referência. Desse modo, corrigiram-se os valores de massa volúmica e do módulo de elasticidade de tração paralela às fibras para os valores de referência de 12% de teor de água recorrendo à Equação (4) e à Equação (5), respetivamente.

$$\rho_{12\%} = \rho - 0,005(\omega - 12) \quad (4)$$

$$E_{12\%} = E_{t,0} + 0,01(\omega - 12) \quad (5)$$

onde $\rho_{12\%}$ é a massa volúmica ajustada para o teor de água de 12%, ρ é a massa volúmica, $E_{12\%}$ é o módulo de elasticidade de tração paralelo às fibras ajustado para o teor de água de 12%.

Os valores das propriedades mecânicas de madeira maciça encontram-se definidos para uma largura de referência de 150 mm (resistência à tração). Desse modo, procedeu-se ao ajuste através do fator k_h , por via da Equação (6). O fator k_h , obtido pela Equação (7), relaciona a dimensão do provete com a dimensão de referência.

$$f_{t,0,adj} = \frac{f_{t,0}}{k_h} \quad (6)$$

$$k_h = \left(\frac{150}{h}\right)^{0,2} \quad (7)$$

em que k_h é o fator de ajuste relativo à largura da tábua, h é a largura da tábua e $f_{t,0,adj}$ é a resistência à tração paralela às fibras ajustada.

O valor característico da massa volúmica (ρ_k) foi calculado através da Equação (8). Neste caso, como há apenas uma amostra, o valor característico corresponde ao percentil de 5% da massa volúmica.

$$\rho_k = \frac{\sum \rho_{05,j} n_j}{\sum n_j} \quad (8)$$

sendo $\rho_{05,j}$ o percentil de 5% da massa volúmica da amostra j e n_j o número de espécimes da amostra j .

O cálculo da resistência à tração paralela às fibras característica ($f_{t,0,k}$) foi efetuado segundo o cálculo paramétrico especificado na EN 14358 (CEN, 2016), através da Equação (9) e da Equação (10).

$$k_s(n) = \frac{6,5n + 6}{3,7n - 3} \quad (9)$$

$$f_{t,0,k} = \exp\left(\overline{f_{t,0,adj}} - k_s(n) \times s_{f_{t,0,adj}}\right) \quad (10)$$

onde $k_s(n)$ é o fator de ajuste relativo à dimensão da amostra, n é a dimensão da amostra, $\overline{f_{t,0,adj}}$ e $s_{f_{t,0,adj}}$ são a média e desvio padrão da resistência à tração paralela às fibras, respetivamente e assumindo uma distribuição log-normal.

Por último, procedeu-se à análise do enquadramento das propriedades mecânicas determinadas para com as classes de resistência, quer para a madeira de Choupo quer para a madeira de Faia. No caso do Choupo é possível fazer esse enquadramento através do quadro 2 da EN 338 (CEN, 2016) porque, apesar de esta tabela estabelecer classes de resistência de tração de espécies resinosas, a nota 5 especifica que pode ser usada para espécies folhosas com perfis de resistência semelhantes, como o Choupo ou Castanho. Para atribuição de classes de resistência de tração das restantes espécies folhosas, não existe, à data, nenhuma norma que o permita, pelo que foi tida em conta a proposta de classes de resistência em tração para folhosas apresentada por Kovryga *et al.* (2020), a qual se encontra transcrita neste documento (ver Quadro 2.4).

3.3.3. Resultados e análise

Propriedades mecânicas

Depois de concluídos os ensaios, e no que à amostra de Choupo diz respeito, é de referir que 2 tábuas foram excluídas desta análise devido a erros de medição durante a realização dos ensaios, passando a amostra a ser constituída por 43 tábuas.

De acordo com a EN 408 (CEN, 2012), reporta-se que 4 tábuas de Choupo atingiram a rotura antes dos 180 segundos e que outras 4 tábuas de Choupo atingiram a rotura depois dos 420 segundos, mas ambos os resultados foram considerados válidos. No caso da amostra de Faia, 2 tábuas de atingiram a rotura antes dos 180 segundos e 4 atingiram a rotura depois dos 420 segundos. No entanto, todas (46) foram consideradas na análise.

As propriedades físicas e mecânicas da amostra de Choupo e da amostra de Faia obtidas são apresentadas de seguida nos Quadros 3.1 e 3.2, respetivamente.

Quadro 3.1 - Propriedades físicas e mecânicas determinadas na amostra de Choupo (43).

	$E_{dyn,t}$ (N/mm ²)	$E_{t,0}$ (N/mm ²)	$f_{i,0}$ (N/mm ²)	ω (%)	ρ (kg/m ³)	$\rho_{12\%}$ (kg/m ³)	$E_{12\%}$ (N/mm ²)	$f_{i,0,adj}$ (N/mm ²)
Média	10924	12424	49,1	12,0	412	412	12418	46,6
Mínimo	7409	7413	22,0	11,3	325	325	7417	20,9
Máximo	14887	19030	75,8	12,7	524	525	19022	71,8
COV (%)	18,3	21,9	33,4	2,2	11,6	11,7	21,9	33,4
Valor característico	-	-	-	-	-	333	-	22,4
Classe de resistência						<u>T12</u>	T18	T22

Nota: A negrito as propriedades consideradas na atribuição de classes de resistência de madeira maciça, e a sublinhado a classe de resistência atribuída.

Quadro 3.2 - Propriedades físicas e mecânicas determinadas na amostra de Faia (46).

	$E_{dyn,t}$ (N/mm ²)	$E_{t,0}$ (N/mm ²)	$f_{i,0}$ (N/mm ²)	ω (%)	ρ (kg/m ³)	$\rho_{12\%}$ (kg/m ³)	$E_{12\%}$ (N/mm ²)	$f_{i,0,adj}$ (N/mm ²)
Média	12699	12776	66,3	15,3	671	660	13198	63,5
Mínimo	9384	7327	20,7	14,4	613	603	7580	19,8
Máximo	17201	17862	115,9	16,9	770	758	18510	111,1
COV (%)	15,8	21,7	39,2	3,6	5,2	5,3	21,5	39,2
Valor característico	-	-	-	-	-	612	-	25,2
Classe de resistência						DT38	<u>DT22</u>	DT24

Nota: A negrito as propriedades consideradas na atribuição de classes de resistência de madeira maciça, e a sublinhado a classe de resistência atribuída.

O módulo de elasticidade em tração paralela às fibras, ajustado para o teor de água de referência de 12%, obtido na amostra de Choupo foi, em valores médios, de 12418 N/mm², cerca de 5,9% inferior ao obtido na Faia que foi de 13198 N/mm². Também a resistência à tração obtida no Choupo, em valores médios foi de 46,6 N/mm², foi inferior (26,6%) à obtida na amostra de Faia (segunda qualidade) que resultou em 63,5 N/mm². De referir que a massa volúmica da Faia (671 kg/m³) foi 60,2% superior à massa volúmica do Choupo (412 kg/m³).

Relativamente ao Choupo, o valor médio de módulo de elasticidade em tração paralela ao fio, quando comparado com o obtido por Hodoušek *et al.* (2017), é superior em cerca de 23,0% (10,1 kN/mm²).

Comparando com os obtidos por Monteiro *et al.* (2019a) em madeira limpa de Choupo, nesta amostra o módulo de elasticidade em tração foi 19,4% superior ($10,4 \text{ kN/mm}^2$), enquanto o valor médio de resistência à tração paralela ao fio foi 32,7% inferior ($69,2 \text{ N/mm}^2$). Esta diferença reflete a influência da presença de defeitos (nós, por exemplo) no comportamento dos elementos de madeira, nomeadamente na resistência à tração.

Quanto à Faia (segunda qualidade), os resultados obtidos foram 9,2% inferiores no módulo de elasticidade em tração paralela ao fio e 4,8% inferiores para a resistência à tração paralela ao fio quando comparado com o estudo de Ehrhart *et al.* (2016a). A resistência à tração característica foi 25,0% inferior à obtida por Ehrhart *et al.* (2016a).

Quando comparados os resultados deste trabalho com os obtidos por Moltini *et al.* (2022) em Eucalipto, no que ao módulo de elasticidade em tração diz respeito, foram inferiores em 40,6% e 36,9% nas amostras de Choupo e Faia, respetivamente, e na resistência à flexão foram 36,8% e 13,8% inferiores no Choupo e na Faia, respetivamente.

As propriedades mecânicas da amostra de Choupo comparativamente aos resultados reportados por Kovryga *et al.* (2019) para o Freixo e de Bôrdo à tração, respetivamente, foram 14,4% e 10,0% inferiores no módulo de elasticidade em tração, e 24,6% e 12,7% na resistência à tração. Por outro lado, a amostra de Faia (segunda qualidade) resultou em valores 9,0% e 4,4% inferiores no módulo de elasticidade comparando com o Freixo e o Bôrdo, respetivamente. No entanto, a resistência à tração da Faia (segunda qualidade) foi 2,8% superior à do Freixo e 18,9% superior à do Bôrdo (Kovryga *et al.*, 2019).

Analisando as propriedades que permitem o enquadramento numa classe de resistência, verifica-se que, caso se considerasse apenas a resistência à tração, a amostra de Choupo poderia ser classificada como T22. No entanto, a massa volúmica limita esta atribuição, diminuindo a classe para T12, uma vez que o Choupo é uma espécie folhosa de baixa massa volúmica. No entanto, não deixam de ser resultados interessantes na medida em que o Choupo apresentou valores de resistência à tração paralela às fibras na ordem dos obtidos na Faia (2,7% inferior) apesar da massa volúmica ser 38,6% inferior à da Faia. De acordo com a NP EN 14080 (IPQ, 2019), poder-se-ia fabricar elementos de madeira lamelada colada pelo menos da classe GL20h.

Neste ponto, e devido à ausência de normas para enquadramento e atribuição de classes de resistência para espécies folhosas à tração, teve-se como base a proposta apresentada por Kovryga *et al.* (2020), que avalia as propriedades mecânicas e suas relações para diversas espécies europeias de folhosas de massa volúmica média, nomeadamente em Freixo e Faia.

Verifica-se que a Faia (segunda qualidade) tem uma capacidade resistente à tração tal que poder-se-ia enquadrar numa classe de resistência de DT24. No entanto, o módulo de

elasticidade de tração paralelo às fibras condiciona a atribuição de classe de resistência para DT22. Recorrendo à norma EN 384 (CEN, 2010), nomeadamente à Equação (11), é possível estimar a resistência à tração partindo da resistência à flexão, e vice versa, o que para esta amostra, aplicando a Equação (11) resultaria numa resistência à flexão característica de 42,5 N/mm², o que corresponderia a uma classe D40.

$$f_{t,0,k} = 0,6f_{m,k} \quad (11)$$

Num outro raciocínio de análise, considerando apenas a resistência característica à tração e que a Faia, sendo uma folhosa, tem comportamento semelhante às resinosas, aplicando os parâmetros de classificação das resinosas, esta amostra classificaria-se na classe T24. De acordo com a NP EN 14080 (IPQ, 2019), a classe T24 (ou superior) para as lamelas permite a fabricação de MLC homogénea pelo menos da classe GL32h.

Estes resultados revelam o potencial da madeira de Faia (segunda qualidade) para emprego em outras finalidades, nomeadamente a utilização em produtos estruturais de madeira tais como madeira lamelada colada ou madeira lamelada colada cruzada, acrescentando valor à madeira que atualmente é usada para fins de baixo valor económico, como mobiliário ou lenha.

Modo de rotura

Registaram-se 3 modos de rotura distintos: modo 1 - rotura por tração pura, onde a rotura acontece praticamente na mesma secção transversal (plano perpendicular às fibras); modo 2 - rotura por tração com desenvolvimento perpendicular às fibras, onde é possível observar que há uma separação do elemento no desenvolvimento longitudinal (geralmente ocorre de topo a topo do elemento), modo 3 - rotura que combina os modos 1 e 2.

Das 43 tábuas da amostra de Choupo, 14 (32,5%) sofreram rotura pelo modo 1, 18 (41,9%) pelo modo 2 e 11 (2,6%) do modo 3. Na amostra de Faia, das 46 tábuas ensaiadas, 12 (26,1%) sofreram rotura do modo 1, 24 (52,2%) pelo modo 2 e 10 (21,7%) pelo modo 3. Algumas roturas tiveram origem nos nós presentes na zona de medição. De realçar ainda que nas roturas do modo 2 (e consequentemente do modo 3) ocorreram em tábuas onde, na zona livre de ensaio, existiam nós ou inclinação das fibras, fazendo com que as tensões deixassem de ser paralelas às fibras e projetando a superfície de rotura num plano longitudinal.

Análise da regressão linear

A discussão da análise estatística qualitativa no que ao coeficiente de correlação diz respeito foi realizada com base na informação recolhida do website *Statistics How To* (Glen, 2022), de onde se retiraram algumas considerações e apreciações do valor do coeficiente de correlação,

concretamente a atribuição qualitativa em função do coeficiente de correlação, sumariadas no Quadro 3.3 (Glen. 2022). Esta referência foi usada ao longo do presente trabalho.

Quadro 3.3 - Correspondência entre o valor numérico e qualitativo de correlação.

Coeficiente de correlação	Tipo de correlação
0,0	Nenhuma
0,01 a 0,19	Insignificante
0,20 a 0,29	Fraca
0,30 a 0,39	Moderada
0,40 a 0,69	Forte
0,70 ou superior	Muito forte

Nota: No caso de valores de correlação negativos, o tipo de correlação acresce a palavra “negativa”.

A correlação obtida entre $E_{dyn,t}$ e $E_{t,0}$, no caso do Choupo, é uma correlação muito forte (0,96), permitindo concluir que a previsão do módulo de elasticidade através de métodos não destrutivos, concretamente através do MTG, é uma boa solução, sendo a estimativa por defeito e, por isso, do lado da segurança. Conclui-se também que $E_{dyn,t}$ é mais elevado para massas volúmicas mais altas, tendo uma correlação de 0,81 (muito forte). Realçar ainda as correlações obtidas entre $E_{dyn,t}$ e $f_{t,0}$ e entre $E_{t,0}$ e $f_{t,0}$ foram, respetivamente, 0,61 e 0,60 (correlações fortes).

Para a Faia, a correlação entre $E_{dyn,t}$ e $E_{t,0}$ é uma correlação forte (0,88) assim como a correlação entre o $E_{t,0}$ e $f_{t,0}$ (0,73). Por outro lado, a correlação obtida entre $E_{dyn,t}$ e $f_{t,0}$ é forte (0,58), e, desta forma, a previsão da resistência através de ensaios não destrutivos com recurso ao MTG pode não ter grande precisão nos resultados.

No Quadro 3.4 estão apresentadas de forma sucinta as correlações obtidas entre as propriedades físicas e mecânicas obtidas quer na amostra de Choupo quer na amostra de Faia. A nuvem de pontos correspondentes aos resultados obtidos bem como as correlações lineares entre $E_{dyn,t}$ e $E_{t,0}$ (para ambas as amostras) e as correlações obtidas entre $E_{dyn,t}$ e $f_{t,0}$ (ambas as amostras) estão representadas na Figura 3.6 e Figura 3.7, respetivamente.

Quadro 3.4 - Correlações entre as principais propriedades físicas e mecânicas nas amostras de Choupo e Faia.

	Choupo				Faia			
	E_{dyn_t}	$E_{t,0}$	$f_{t,0}$	ρ	E_{dyn_t}	$E_{t,0}$	$f_{t,0}$	ρ
E_{dyn_t}	-	0,96	0,61	0,82	-	0,88	0,58	0,17
$E_{t,0}$		-	0,60	0,81		-	0,73	-0,05
$f_{t,0}$			-	0,68			-	-0,15
ρ				-				-

As correlações obtidas, comparativamente com outros estudos, foram 7% superiores às obtidas por Hodoušek *et al.* (2017) para madeira de Choupo (correlação de 0,90 entre $E_{t,0}$ e o E_{dyn_t} obtido através de MTG, e de 0,91 para a correlação entre $E_{t,0}$ e E_{dyn_t} obtido através de acelerómetro). Relativamente à Faia, as correlações obtidas são próximas (em valores absolutos) das correlações reportadas por Ehrhart *et al.* (2016a), que foram de 0,92 entre $E_{t,0}$ e E_{dyn_t} , de 0,2 entre $f_{t,0}$ e ρ e de 0,47 entre $f_{t,0}$ e E_{dyn_t} .

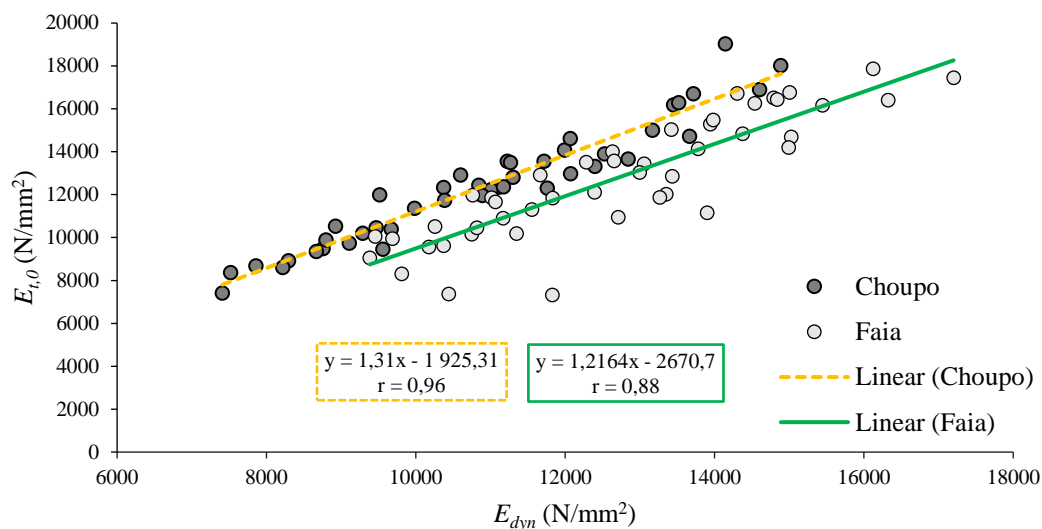


Figura 3.6 - Distribuição gráfica e relação entre o módulo de elasticidade dinâmico e o módulo de elasticidade estático em tração paralela às fibras.

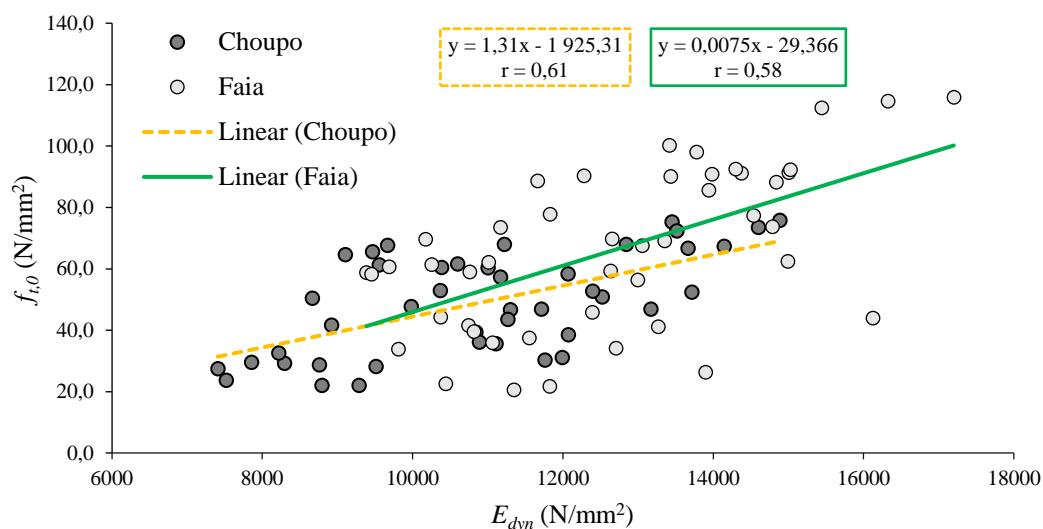


Figura 3.7 - Distribuição gráfica e relação entre o módulo de elasticidade dinâmico e a resistência à tração paralela às fibras.

3.4. Conclusão

Neste capítulo foram caracterizadas 158 tábuas de Choupo e 320 tábuas de Faia (segunda qualidade) através do método de vibração longitudinal (método não destrutivo) com recurso ao MTG. Da amostra de Choupo, as tábuas tinham, em média, dimensões de 2576 mm × 115 mm × 39 mm (comprimento × largura × espessura), massa volúmica de 428,3 kg/m, e E_{dyn} de 11321 N/mm². Na amostra de Faia, obtiveram-se as dimensões de 2815 mm × 121 mm × 30 mm (comprimento × largura × espessura), massa volúmica de 693,7 kg/m³ e E_{dyn} de 12583 N/mm².

Foram ensaiadas tábuas de Choupo e de Faia à tração para determinar as suas propriedades mecânicas. Das 45 tábuas de Choupo consideradas, foram obtidos resultados válidos de 43 tábuas, e das 46 tábuas de Faia obtiveram-se resultados válidos para todas elas. Destes ensaios resultaram para as amostras de Choupo e Faia, respetivamente, valores de 412 kg/m³ e 660 kg/m³ para a massa volúmica, 12418 N/mm² e de 13198 N/mm² para o módulo de elasticidade em tração paralelo às fibras e 46,6 N/mm² e de 63,5 N/mm² para a resistência à tração paralela às fibras, em valores médios e ajustados às condições de teor de água e ensaio.

A amostra de Choupo pode-se enquadrar numa classe de resistência de T12, que permitiria a fabricação de MLC da classe GL20h, e a amostra de Faia numa possível classe de resistência de DT22, classes propostas por Kovryga *et al.* (2020). Obtiveram-se correlações fortes, bem como muito fortes, na previsão das propriedades mecânicas de ambas as amostras.

4. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE MADEIRA LAMELADA COLADA

4.1. Introdução

A produção de madeira lamelada colada encontra-se regulamentada pela NP EN 14080 (IPQ, 2019), definindo critérios de produção, classes de resistência, controlo de qualidade, bem como uma lista de espécies aptas para a sua produção. Da lista, é de referir que somente se encontram listadas espécies resinosas, com exceção do Choupo (clones *Populus x euramericana* cv “Robusta”, “Dorskamp”, “I214” e “I4551”) que, apesar de ser uma folhosa, apresenta propriedades mecânicas semelhantes às obtidas nas espécies resinosas. Face à inexistência de normalização relativa a madeira lamelada colada com fabrico a partir de espécies folhosas, é de extrema importância o estudo das propriedades e comportamento das linhas de cola. Para tal, apresenta-se de seguida o trabalho conduzido nas espécies Choupo (clones *Populus x canadensis* Moench, *Populus nigra* L. e *Populus alba* L.) e Faia (*Fagus sylvatica* L.), descrevendo o processo de produção das vigas em laboratório, a determinação das propriedades mecânicas e o controlo da qualidade de colagem.

4.2. Produção das vigas

Na definição das dimensões das vigas teve-se em consideração a relação entre o vão de ensaio e a altura da viga (h) de $18h$ definida pela EN 408 (CEN, 2012), bem como o comprimento das lamelas disponíveis. De referir que não foi possível proceder ao fabrico de ligações do tipo *finger-joint*, pelo que o comprimento das vigas foi de, no máximo, 2400 mm. Desse modo, optou-se pela produção de vigas com 5 lamelas de 24 mm de espessura, o que permite igualmente estabelecer uma análise direta face aos resultados obtidos por Martins (2018).

No presente trabalho foram produzidas, em laboratório, 38 vigas de madeira lamelada colada (MLC), distribuídas da seguinte forma: i) 9 vigas de Choupo (PTP_b); ii) 17 vigas de Faia (SB_b); iii) 7 vigas híbridas de Choupo com Eucalipto (HBGBP); e iv) 5 vigas híbridas de Choupo com Faia (HSBBP). A distribuição das espécies das lamelas nas vigas produzidas encontra-se ilustrada na Figura 4.1. As vigas híbridas de Eucalipto e Choupo foram consideradas tendo como base os estudos de Castro e Paganini (2003) e de Martins *et al.*(2020), nos quais foram produzidas vigas desta tipologia em que não ocorreram perdas significativas de resistência à flexão, apesar das lamelas interiores serem compostas por madeira de qualidade inferior comparativamente às lamelas exteriores. Adicionalmente, estes autores referem comportamento à flexão de vigas em que ocorre um patamar não linear (ductil), comportamento este que é desejável nas estruturas de engenharia civil. À semelhança destas vigas, e face aos

resultados obtidos anteriormente na caracterização mecânica de madeira de Choupo e de Faia em tração (ver secção 3.3), optou-se por produzir também vigas híbridas de Faia com Choupo.

Choupo	Faia	Eucalipto	Faia
Choupo	Faia	Choupo	Choupo
Choupo	Faia	Choupo	Choupo
Choupo	Faia	Choupo	Choupo
Choupo	Faia	Eucalipto	Faia
PTP_b	SB_b	HBGBP	HSBBP

Figura 4.1 - Configurações adotadas nas vigas produzidas.

4.2.1. Matéria-prima

A matéria-prima usada nesta parte do presente trabalho foi parte da caracterizada na secção 3.2. Após a análise da distribuição das tábuas por intervalos de módulo de elasticidade dinâmico (E_{dyn}) e da média destes valores, foi decidido considerar-se tábuas do intervalo que contém o valor médio e os intervalos adjacentes (o intervalo inferior e o superior). No caso do Choupo os intervalos de 10-11, 11-12 e 12-13 N/mm² e no caso da Faia os intervalos 11-12, 12-13 e 13-14 N/mm². Para cada espécie (Choupo e Faia) decidiu-se então fabricar 3 vigas homogéneas em que a estimativa do módulo de elasticidade das vigas fosse de 10, 11 e 12 N/mm² e de 11, 12 e 13 N/mm² para a madeira de Choupo e para a madeira de Faia, respetivamente. Para a previsão do módulo de elasticidade das vigas foi usado o Método da Secção Transformada (TSM – *Transformed Section Method*), detalhado mais à frente.

4.2.2. Distribuição das lamelas

Após concluída a seleção das tábuas, começou-se por reduzir para 24 mm a espessura das mesmas. Durante este processo procurou-se, sempre que possível, eliminar defeitos que pudessem estar presentes nas tábuas (nós e descaios, por exemplo). De seguida, e recorrendo a um equipamento de corte, procedeu-se à redução e regularização da largura das tábuas para cerca de 100 mm. Por fim, foram cortadas com comprimento que variou entre os 2400 e os 2500 mm, salvaguardando sempre que as 5 tábuas a colar em cada viga possuíssem o mesmo comprimento.

Por fim, assegurou-se a limpeza superficial das lamelas através da remoção de poeiras com pistola de ar comprimido. As lamelas foram colocadas em ambiente com temperatura e humidade controladas (20±2°C de temperatura e 65±5% de humidade relativa do ar), tendo decorrido nesse espaço as colagens dos elementos para a fabricação das vigas de MLC.

Previamente ao processo de colagem efetuou-se nova caracterização não destrutiva seguindo o processo descrito na caracterização das tábuas (secção 3.2.1). As lamelas foram medidas na zona central e topos para novo registo das dimensões da secção transversal. Foram igualmente medidos o comprimento e a massa. O teor de água adotado foi o determinado na caracterização não destrutiva prévia das tábuas. O módulo de elasticidade dinâmico de cada lamela ($E_{dyn,l}$) foi registado bem como a frequência de vibração, tendo-se considerado as mesmas condições de apoio que as adotadas para as tábuas.

A distribuição das lamelas (vigas homogéneas e combinadas) obedeceu ao princípio de que as lamelas com maior $E_{dyn,l}$ seriam posicionadas nas extremidades, com respeito pela simetria em relação ao plano médio. De modo a avaliar o desempenho nas condições mais adversas, as lamelas foram dispostas segundo as orientações para a classe de serviço 3 (NP EN 14080), isto é, a lamela inferior com os anéis voltados para baixo e as restantes com os anéis voltados para cima conforme a Figura 4.2.

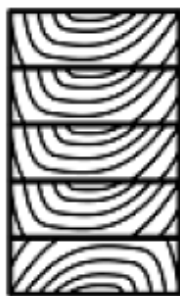


Figura 4.2 - Orientação das lamelas das vigas de MLC na classe de serviço 3 (NP EN 14080 (IPQ, 2019)).

A distribuição dos valores de módulo de elasticidade dinâmico das lamelas para cada viga produzida é apresentada graficamente na Figura 4.3 para as vigas de Choupo (PTP_b). A Figura 4.4 apresenta informação relativamente à espécie Faia (SB_b) e por sua vez na Figura 4.5 são apresentadas as vigas híbridas de Eucalipto e Choupo (HBGBP) e híbridas de Faia e Choupo (HSBBP). Nas referidas figuras são indicados também de forma gráfica os valores determinados por via do TSM (E_{TSM}) de cada viga, bem como da massa volúmica média (MV_{av}). De referir que para cada conjunto de 5 colunas, a da esquerda é correspondente à lamela posicionada na zona comprimida.

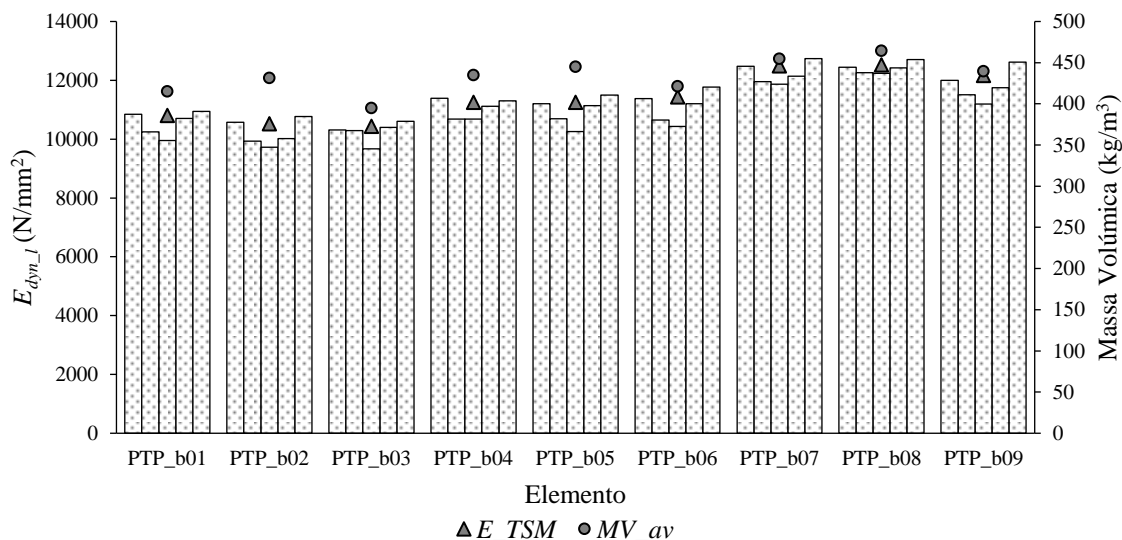


Figura 4.3 - Distribuição de módulo de elasticidade dinâmico para as vigas de Choupo (PTP_b).

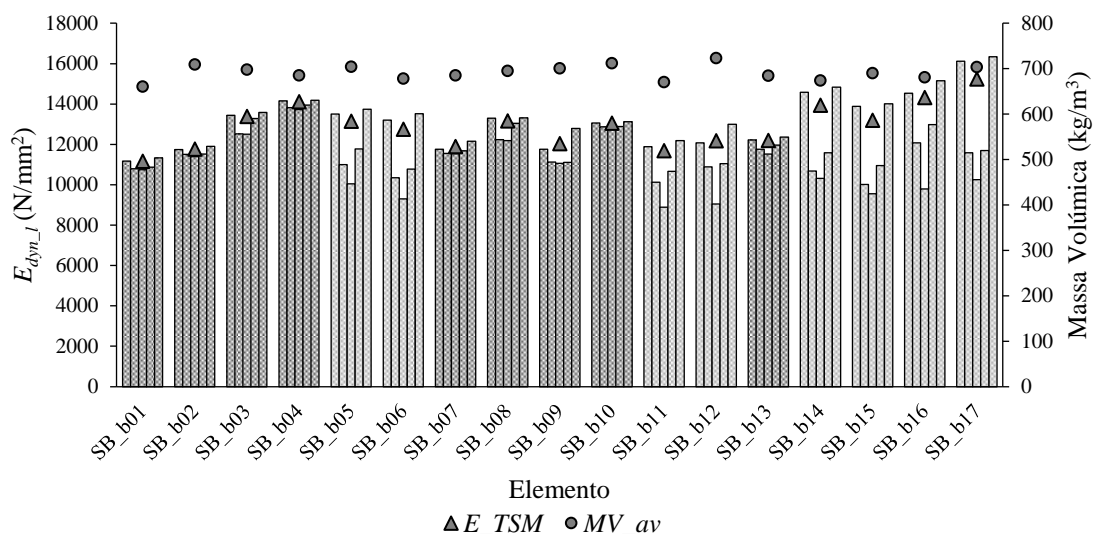


Figura 4.4 - Distribuição de módulo de elasticidade dinâmico para as vigas Faia (SB_b).

No caso das vigas de Faia, apesar da quantidade de vigas produzidas ser mais elevada, foram também produzidas 3 vigas para cada módulo de elasticidade previsto (11, 12 e 13 N/mm²), perfazendo 9 vigas homogêneas. Foram igualmente produzidas 8 vigas combinadas de Faia. As tensões normais máximas numa viga em flexão ocorrem nas lamelas externas, sendo que nas lamelas centrais predominam as tensões de corte. Face à variabilidade de propriedades a

utilização de matéria-prima de menor qualidade nas lamelas interiores permite a sua valorização em produtos de valor acrescentado, bem como a otimização do desempenho mecânico.

Tendo presente o trabalho de Martins (2020), em que foram ensaiadas à flexão 4 vigas híbridas de Choupo com Eucalipto, optou-se por seguir a nomenclatura HBGBP usada por este autor.

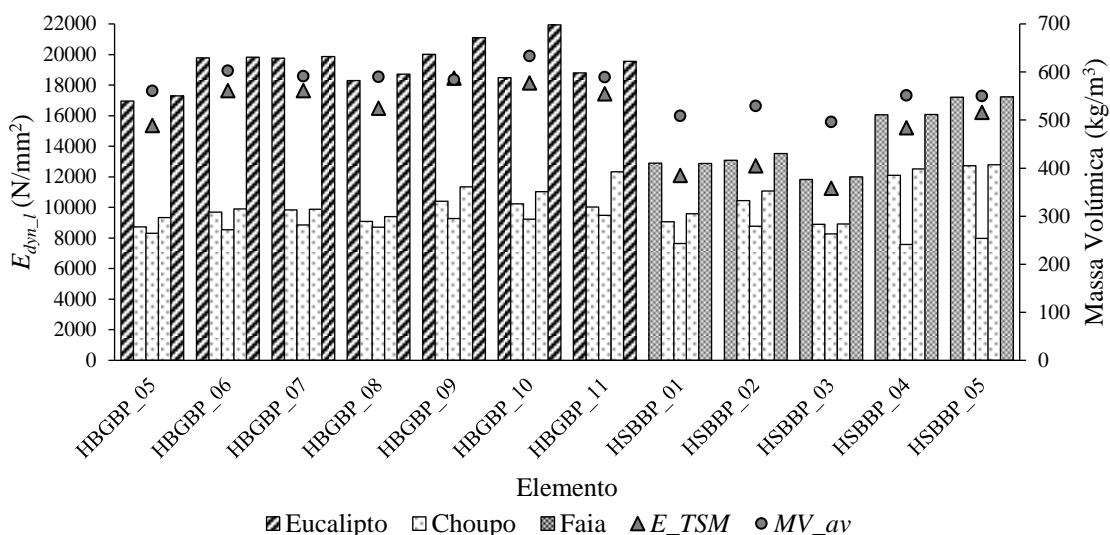


Figura 4.5 - Distribuição de módulo de elasticidade dinâmico para as vigas híbridas de Choupo e Eucalipto (HBGBP) e vigas híbridas de Choupo e Faia (HSBBP).

4.2.3. Colas

De entre as várias colas disponíveis no mercado, o conhecimento existente relativo ao desempenho da colagem com folhosas não é extenso. Assim, no seguimento do estudo realizado por Martins (2018) em que se consideraram diversos tipos e referências de colas, verificou-se um excelente desempenho para colas do tipo PRF. De entre estas é de destacar o desempenho na colagem de face de Choupo com cola Aerodux 185 + HRP 155 (resina + endurecedor) na razão de 100/20 de resina/endurecedor, com a quantidade de cola de 450 g/m² por face e 0,8 N/mm² de pressão de aperto durante 4 horas. Deste modo, adotaram-se para o presente estudo, as mesmas condições de colagem (proporção resina/endurecedor, pressão e tempo de prensagem). No entanto, o endurecedor usado foi o HRP 150, por questões de disponibilidade nas instalações do SerQ. Por questões de rotura de stock, e para não comprometer a execução dos trabalhos, ocorreu a necessidade de utilizar também uma outra referência de cola PRF (Prefere 4094 + Prefere 5827) na proporção de resina/endurecedor de 100/20, na quantidade de 400 g/m², com pressão de aperto de 0,8 N/mm² aplicada durante 17 horas. Esta cola foi considerada em 4 vigas de Faia (SB_b03, SB_b04; SB_b05 e SB_b06) e em 3 vigas híbridas

de Choupo e Faia (HSBBP_01, HSBBP_02 e HSBBP_03). As colas e condições de colagem adotadas são apresentadas no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 - Resumo dos parâmetros de colagem utilizados.

Cola	Aerodux 185 + HRP 185	Prefere 4094 + Prefere 5827
Quantidade de cola (g/m ²)	450	400
Resina / Endurecedor	100/20	100/20
Pressão de aperto (N/mm ²)	0,8	0,8
Tempo de prensagem (h)	4	17
Temperatura ambiente (°C)	20	20

4.2.4. Assemblagem das vigas

O processo de colagem decorreu no menor intervalo de tempo possível entre a realização da mistura e a aplicação da pressão, salvaguardando o tempo de fechado mínimo da cola indicado pela respetiva ficha técnica. O tempo de fechado é o intervalo de tempo compreendido entre a colocação da última lamela e a aplicação da pressão.

A mistura da resina com o endurecedor foi efetuada imediatamente antes da aplicação. A cola foi aplicada em apenas uma das faces de cada lamela, controlando a quantidade (g/m²) através da pesagem, como ilustra a Figura 4.6. Para garantir um filme de cola uniforme foi utilizada uma espátula denteada.



Figura 4.6 - Aplicação de cola com espátula denteada e controlo da quantidade de cola por pesagem.

Aplicada a cola e assembladas as vigas, estas mesmas foram colocadas numa prensa constituída por 6 atuadores hidráulicos espaçados de 500 mm entre eixos e com capacidade máxima de

50 kN, equipamento este que permite a colagem de elementos até 3000 mm de comprimento e 200 mm de largura (ver Figura 4.7).

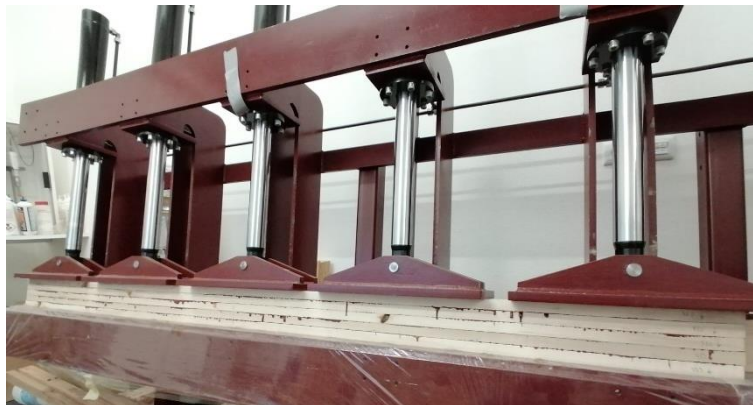


Figura 4.7 - Fase de pressão na colagem de uma viga de Choupo.

Após o processo de fabricação as dimensões das vigas eram de aproximadamente 100 mm de largura, 120 mm de altura e entre 2400 e 2500 mm de comprimento. Durante e após a colagem, as vigas foram mantidas em ambiente controlado ($20\pm 2^\circ\text{C}$ de temperatura e $65\pm 5\%$ de humidade relativa) durante pelo menos 7, dias para assegurar a cura completa da cola.

4.3. Propriedades mecânicas

4.3.1. Caracterização não destrutiva das vigas de MLC

Completada a cura da cola, as vigas foram aparelhadas lateralmente para assegurar uma largura constante de 92 mm ao longo da viga. Os topos foram cortados para um comprimento mínimo de 2300 mm, garantindo o vão de ensaio de 2160 mm (18 vezes a altura), requisito da EN 408 (CEN, 2012).

Do mesmo modo que nas tábuas e lamelas, foi realizada a caracterização não destrutiva das vigas para determinar o valor de módulo de elasticidade dinâmico (E_{MTG}), bem como avaliar a viabilidade da caracterização não destrutiva na previsão das propriedades mecânicas das vigas. Para dados de entrada, considerou-se o teor de água médio das lamelas constituintes da viga antes da colagem. Por outro lado, as restantes dimensões (altura, largura e comprimento) e a massa foram medidas individualmente. Em cada ensaio foram registados o módulo de elasticidade dinâmico e a frequência de vibração.

4.3.2. Método analítico de previsão das propriedades mecânicas

Na previsão das propriedades mecânicas, com enfoque no módulo de elasticidade em flexão, para além do método de vibração longitudinal, foi considerado também o método analítico da Seção Transformada (TSM). Este método é equivalente à aplicação do Teorema de Steiner na

medida em que compreende a transformação da secção transversal compósita da viga de MLC numa secção homogénea, permitindo a aplicação da teoria elástica para vigas e suas formulações.

A aplicação do método é descrita no Anexo 4 da norma ASTM D 3737-5 (ASTM, 2005), compreendendo a divisão da secção transversal em 3 zonas de rigidez, como ilustrado na Figura 4.8. Para isso é necessário conhecer algumas propriedades das lamelas constituintes da viga, nomeadamente o módulo de elasticidade, a altura da lamela e a distribuição das lamelas na secção transversal.

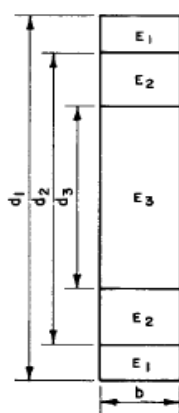


Figura 4.8 - Viga dividida em 3 zonas de rigidez (Anexo 4 da ASTM D 3737-5 (ASTM, 2005)).

A determinação do módulo de elasticidade através do TSM (E_{TSM}) segue as Equações (12) e (13).

$$T_i = \frac{[E_1 d_1^2 - d_2^3 (E_1 - E_2) - d_3^3 (E_2 - E_3)]}{E_1 d_1^3} \quad (12)$$

$$E_{TSM} = E_1 T_i \quad (13)$$

sendo T_i o coeficiente de transformação da secção, E_1 , E_2 e E_3 a média do módulo de elasticidade dinâmico das lamelas de cada zona de rigidez e d_1 , d_2 e d_3 a distância de cada zona de rigidez ao baricentro da secção.

4.3.3. Ensaio estáticos de flexão

Os ensaios estáticos realizados neste trabalho tiveram como objetivo a determinação das principais propriedades mecânicas de flexão, nomeadamente: i) módulo de elasticidade local à flexão ($E_{m,l}$), ii) módulo de elasticidade global à flexão ($E_{m,g}$) e iii) resistência à flexão (f_m). Para a obtenção destas propriedades, foram realizados ensaios de flexão de 4 pontos. Todos os

procedimentos de ensaio, distâncias entre apoios e pontos de aplicação de carga, instrumentação de medição e expressões de cálculo seguiram as indicações da EN 408 (CEN, 2012).

Módulo de elasticidade estático em flexão (MOE)

Os ensaios para a determinação do módulo de elasticidade em flexão foram realizados em todas as vigas, depois de terminados os ensaios não destrutivos para a previsão do módulo de elasticidade. As cláusulas 9 e 10 da EN 408 (CEN, 2012) estabelecem os pressupostos e as expressões para a determinação do módulo de elasticidade local e global à flexão, respetivamente.

Seguindo estes pressupostos, foi adotado um vão de 2160 mm (18 vezes a altura), sendo a distância entre apoios igual à distância entre pontos de aplicação de carga e apoios, distância essa de 720 mm (6 vezes a altura).

Dada a configuração da instrumentação, foi possível a determinação do módulo de elasticidade local e global no decorrer do mesmo ensaio. Na medição dos deslocamentos foram utilizados transdutores de deslocamento de 20 e de 50 mm de curso máximo.

A carga foi aplicada com recurso a um atuador hidráulico com capacidade de 100 kN e curso máximo de 300 mm, ao qual foram acoplados uma rótula unidirecional e o sistema de distribuição de carga (ver Figura 4.9).

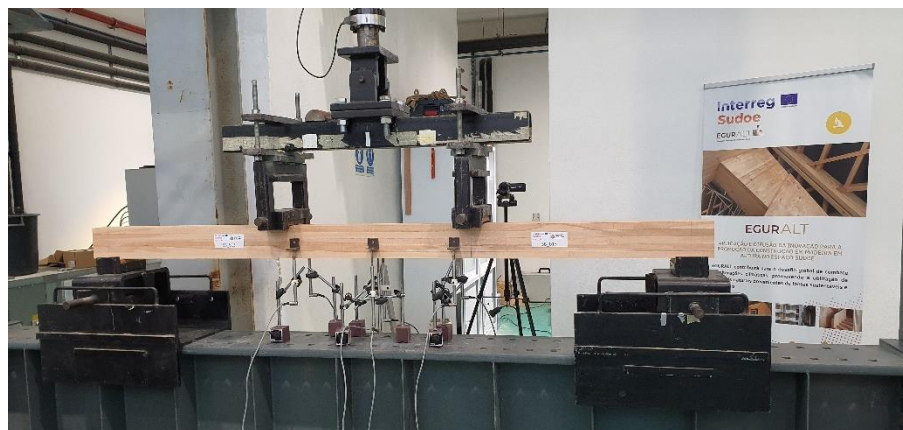


Figura 4.9 - Instrumentação (*layout*) de uma viga de Faia no ensaio do módulo de elasticidade.

A carga máxima aplicada foi cerca de 40% da carga máxima estimada, tendo o ensaio sido realizado em controlo de deslocamento com velocidade constante de 0,36 mm/s. A aquisição de dados foi realizada em intervalos de 0,1 s.

Quer nos apoios quer nos pontos de aplicação de carga foram dispostas peças de madeira (Pinho bravo) entre a viga e a chapa de aço para que os efeitos de compressão localizada nas vigas de madeira lamelada colada fossem minimizados.

Os valores do módulo de elasticidade local ($E_{m,l}$) e global ($E_{m,g}$) foram determinados de acordo com as Equações (14) e (15), respetivamente.

$$E_{m,l} = \frac{al_1^2(F_2 - F_1)}{16I(w_2 - w_1)} \quad (14)$$

$$E_{m,g} = \frac{3al^2 - 4a^3}{2bh^3 \left(2 \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} - \frac{6a}{5Gbh} \right)} \quad (15)$$

onde a é a distância entre ponto de aplicação de carga e apoio, l_1 a distância entre pontos de medição de deformação (5h), l o comprimento do vão de ensaio (18h), I a inércia da viga, G é o módulo de distorção (considerado como infinito), b a largura da viga, h altura da viga e $(F_2 - F_1)/(w_2 - w_1)$ é a relação entre a força aplicada e a deformação da viga (para visualizar os pontos de medição, consultar Figura 1 da EN 408 (CEN,2012)).

Resistência à flexão

Concluídos os ensaios para a determinação do módulo de elasticidade (local e global) à flexão, foi retirada toda a instrumentação de medição e iniciado um novo procedimento de carga em controlo de deslocamento (Figura 4.10). De acordo com a cláusula 19 da EN 408 (CEN, 2012), a rotura deve ocorrer aos 300 ± 120 s, e para cumprir com este requisito, o deslocamento imposto foi de 0,20 mm/s nas vigas de Choupo (PTP_b) e híbridas de Choupo e Eucalipto (HBGBP) e de 0,25 mm/s nas vigas de Faia (SB_b) e híbridas de Choupo com Faia (HSBBP), fazendo ajustes sempre que necessário consoante a presença de algum defeito ou de valores de E_{MTG} inferiores.



Figura 4.10 - Viga de Choupo durante o procedimento de carga (ensaio de resistência à flexão).

Para determinar a resistência à flexão (f_m) apenas é necessário conhecer a força máxima aplicada ao elemento, no entanto durante o ensaio foram adquiridos os dados relativos à força e deslocamento do êmbolo do atuador hidráulico. O atuador foi o utilizado no ensaio do módulo de elasticidade (carga máxima de 100 kN), e a aquisição dos dados foi em intervalos de 0,1 s.

A resistência à flexão foi calculada de acordo com a Equação (16).

$$f_m = \frac{3F_{max}a}{bh^2} \quad (16)$$

em que F é o valor máximo de carga atuante registada no ensaio, a é a distância entre o ponto de carga e o apoio, b e h são a largura e altura da viga, respetivamente.

4.4. Resultados e discussão

4.4.1. Resultados dos ensaios estáticos

De seguida apresenta-se nos Quadro 4.2, Quadro 4.3, Quadro 4.4 e Quadro 4.5 o resumo das propriedades físicas e mecânicas determinadas no presente estudo por tipo de viga.

Quadro 4.2 - Resumo das propriedades físicas e mecânicas das 9 vigas de Choupo.

	E_{MTG} (N/mm ²)	E_{TSM} (N/mm ²)	$E_{m,l}$ (N/mm ²)	$E_{m,g}$ (N/mm ²)	f_m (N/mm ²)	ρ (kg/m ³)	ω (%)
Média	11322	11427	12363	10745	62,6	439,8	13,0
Mínimo	10271	10432	10586	9804	50,1	401,4	12,9
Máximo	13049	12524	13990	12095	72,5	462,9	13,3
COV (%)	8,1	6,6	9,2	8,0	10,4	4,2	0,9

Quadro 4.3 - Resumo das propriedades físicas e mecânicas das 17 vigas de Faia.

	E_{MTG} (N/mm ²)	E_{TSM} (N/mm ²)	$E_{m,l}$ (N/mm ²)	$E_{m,g}$ (N/mm ²)	f_m (N/mm ²)	ρ (kg/m ³)	ω (%)
Média	12350	12906	12032	11655	69,8	699,9	16,1
Mínimo	11165	11160	10226	9763	50,8	667,4	14,3
Máximo	14008	15529	14123	13234	83,3	731,2	16,6
COV (%)	6,3	8,5	10,7	8,1	12,0	2,4	3,5

Quadro 4.4 - Resumo das propriedades físicas e mecânicas das 7 vigas de Eucalipto e Choupo.

	E_{MTG} (N/mm ²)	E_{TSM} (N/mm ²)	$E_{m,l}$ (N/mm ²)	$E_{m,g}$ (N/mm ²)	f_m (N/mm ²)	ρ (kg/m ³)	ω (%)
Média	13649	17314	18378	16262	87,7	602,4	13,6
Mínimo	12241	15363	14978	14383	75,0	579,0	13,3
Máximo	14520	18461	19919	17117	92,6	637,8	13,9
COV (%)	5,7	5,7	9,2	5,5	6,2	2,8	1,5

Quadro 4.5 - Resumo das propriedades físicas e mecânicas das 5 vigas de Faia e Choupo.

	E_{MTG} (N/mm ²)	E_{TSM} (N/mm ²)	$E_{m,l}$ (N/mm ²)	$E_{m,g}$ (N/mm ²)	f_m (N/mm ²)	ρ (kg/m ³)	ω (%)
Média	11757	13511	12778	12129	69,1	542,0	14,5%
Mínimo	9870	11256	9863	9669	47,4	502,1	14,0%
Máximo	13871	16222	17128	14785	85,0	572,5	14,9%
COV (%)	13,2	14,0	20,4	15,8	17,7	5,2	2,0

Numa análise geral dos resultados, observa-se que em todas as vigas se obteve $E_{m,l}$ superior ao $E_{m,g}$ em termos de valores médios. Esta diferença ocorre devido às deformações medidas serem inferiores para o $E_{m,l}$ que para o $E_{m,g}$, uma vez que no $E_{m,l}$ as deformações são medidas apenas no trecho central, em estado de flexão pura, enquanto que no $E_{m,g}$ estas são medidas em relação à flecha a meio vão considerando a distância entre os apoios (na lamela inferior ou no eixo neutro), incorporando as deformações devidas a esforço transversal dos trechos laterais.

Relativamente aos métodos não destrutivos para previsão das propriedades mecânicas em flexão, o TSM foi o que conduziu a melhores resultados nas vigas híbridas quando comparado com o MTG (método de vibração longitudinal). A diferença dos valores obtidos com o TSM e os resultados para o módulo de elasticidade em flexão foi superior em todas as tipologias de viga, nomeadamente nas vigas PTP_b (5,3%), nas vigas SB_b (6,3%), nas vigas HBGBP (4,8%) e nas vigas HSBBP (8,7%). Quanto às previsões das propriedades mecânicas através do

MTG, estas foram superiores nas vigas PTP_b (4,3%) e nas vigas SB_b (1,8%), enquanto nas vigas HBGBP e HSBBP foram inferiores em 17,4% e 5,4%, respetivamente.

As correlações entre as propriedades determinadas são apresentadas no Quadro 4.6. Nas vigas PTP_b obtiveram-se correlações muito fortes (acima de 0,90) entre os módulos de elasticidade dinâmicos e estáticos, e com a resistência à flexão as correlações obtidas têm coeficientes entre 0,56 (forte) e 0,75 (muito forte) nomeadamente entre $E_{TSM}-f_m$ e $E_{m,g}-f_m$. Também nas vigas SB_b, à exceção da correlação $E_{MTG}-E_{m,l}$, (0,46), as correlações entre módulos de elasticidade foram muito fortes, enquanto com a resistência à flexão as correlações são insignificantes.

Nas vigas híbridas, todas as propriedades determinadas nas vigas HSBBP se correlacionam entre si com coeficientes muito fortes, com ênfase na correlação obtida entre $E_{TSM}-E_{MTG}$ onde a correlação foi de 1,00. Nas vigas HBGBP, excetuando as correlações com $E_{m,l}$, as correlações obtidos foram fortes ou muito fortes.

Quadro 4.6 - Correlações obtidas entre as propriedades mecânicas para todas as tipologias de viga.

	PTP_b (a preto) e SB_b (a cinzento)					HBGBP (a preto) e HSBBP (a cinzento)				
	E_{TSM}	E_{MTG}	$E_{m,l}$	$E_{m,g}$	f_m	E_{TSM}	E_{MTG}	$E_{m,l}$	$E_{m,g}$	f_m
E_{TSM}	-	0,94	0,95	0,99	0,75	-	0,80	0,38	0,95	0,82
E_{MTG}	0,78	-	0,90	0,94	0,56	1,00	-	0,20	0,82	0,73
$E_{m,l}$	0,81	0,46	-	0,96	0,66	0,85	0,87	-	0,24	0,56
$E_{m,g}$	0,93	0,71	0,90	-	0,71	0,95	0,96	0,97	-	0,85
f_m	-0,13	0,12	-0,01	0,08	-	0,68	0,71	0,84	0,84	-

Numa análise das propriedades mecânicas entre as tipologias de vigas, no módulo de elasticidade médio, as vigas SB_b obtiveram valores superiores (8,5%) em relação às PTP_b, e as HBGBP superiores em 51,3% comparativamente às PTP_b, superiores (39,5%) comparativamente às SB_b e também superiores (34,1%) em relação às HSBBP. Por outro lado, as vigas HSBBP obtiveram valores inferiores (3,9%) às SB_b.

Relativamente às vigas constituídas por uma só espécie, as vigas SB_b apresentaram, em média, f_m superior (11,6%) quando comparadas com as PTP_b. No entanto, as vigas obtidas através da combinação de 3 lamelas interiores de Choupo com lamelas exteriores de Faia (HSBBP) praticamente não evidenciaram perdas quando comparadas com as integralmente em Faia (SB_b) no que à resistência à flexão diz respeito (69,1 e 69,8 N/mm², respetivamente), concluindo-se que, não obstante o uso de matéria-prima de menor qualidade nas lamelas interiores, o desempenho das vigas se mantém praticamente igual, evidenciando que são as lamelas exteriores que têm grande influência na resistência à flexão do elemento. Isto leva a

que se possam produzir vigas mais leves e igualmente resistentes, e que desse modo, ocorra uma taxa de aproveitamento do material mais próxima da unidade e a valorização da matéria-prima de propriedades mecânicas inferiores.

De todas as vigas produzidas e ensaiadas, as que atingiram valores de carga e rigidez mais elevados foram as vigas HBGBP, devido à incorporação de Eucalipto nas lamelas exteriores. Em termos de valores médios de resistência à flexão, as vigas com a configuração HBGBP obtiveram resultados superiores em 40,2% quando comparadas com as vigas PTP_b, 27,0% quando comparadas com as vigas HSBBP e 21,8% comparativamente às vigas SB_b.

Os resultados obtidos nas vigas PTP_b, em valores médios, foram 2,0% e 11,2% superiores aos determinados por Martins (2018) em vigas de Choupo para o módulo de elasticidade e resistência à flexão, respetivamente. Quando comparados com os resultados de Castro e Paganini (2003) nas vigas de Choupo, neste trabalho os valores obtidos foram superiores quer no módulo de elasticidade (11,5%) quer na resistência à flexão (42,0).

Nas SB_b obtiveram-se resultados dentro da gama dos reportados por Ehrhart *et al.* (2018), o módulo de elasticidade foi entre 17,9 e 28,1% inferior e a resistência à tração foi entre 10,9% inferior e 20,1 superior, consoante o grupo de vigas estudado. De forma semelhante, em valores médios, o módulo de elasticidade obtido foi inferior (entre 5,2 e 27,2%) e a resistência à flexão superior (entre 9,6 e 61,2%) aos reportados por Frese e Blaß (2006), uma vez mais dependendo do grupo de vigas considerado.

Comparando os resultados das vigas HBGBP com vigas da mesma tipologia estudadas por outros autores, o módulo de elasticidade foi 11,1% inferior e a resistência à flexão foi 3,6% inferior aos resultados reportados por Martins *et al.* (2020), e relativamente aos de Castro e Paganini (2003), foram entre 11,7 e 54,1% superiores no módulo de elasticidade e entre 46,6 e 88,6 na resistência à flexão, consoante o clone de Eucalipto considerado.

Quando comparadas as vigas HBGBP com vigas apenas de Eucalipto, nas vigas HBGBP obteve-se resistência à flexão inferior (23,7%) à reportada por Martins *et al.* (2020) que obteve 114,9 N/mm² de resistência à flexão. Quanto às vigas do estudo de Castro e Paganini (2003), as deste trabalho obtiveram resultados entre 5,9% inferiores e 56,9% superiores, uma vez que no conjunto dos 4 clones estudados obtiveram resistência à flexão entre 55,6 e 93,2 N/mm²,

4.4.2. Eficiência estrutural

Considerando que as três espécies consideradas neste estudo têm propriedades físicas distintas, nomeadamente a massa volúmica, procurou-se realizar uma análise do desempenho mecânico de uma forma equitativa, isto é, uma análise através da eficiência estrutural (EE) que é o

quociente entre propriedade mecânica e a massa volúmica (quociente entre a massa e o volume obtido com base nas dimensões da viga pré-ensaio).

Nas Figuras 4.11 e 4.12 apresentam-se graficamente os valores de eficiência estrutural para o módulo de elasticidade e para a resistência à flexão, respetivamente, onde E_{mg} é o módulo de elasticidade global (médio), f_m é a resistência à flexão (média), EE_{av} , EE_{min} e EE_{max} são, respetivamente, as eficiências estruturais média, mínima e máxima.

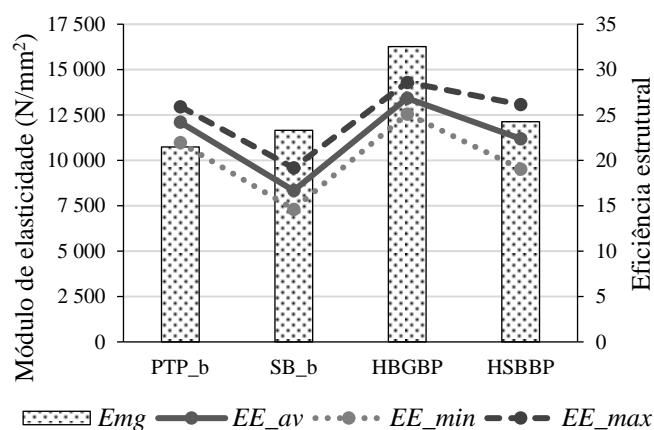


Figura 4.11 - Módulo de elasticidade (médio) e eficiência estrutural por tipo de viga.

As vigas HBGBP apresentam eficiência estrutural média de 26,9, o valor mais elevado das vigas estudadas. Com valores semelhantes estão as vigas PTP_b e HSBBP com 24,2 e 22,4, respetivamente. As vigas SB_b, apesar de terem $E_{m,g}$ superior às vigas PTP_b e muito próximo das HSBBP, têm massa volúmica mais elevada, o que conduz a valores inferiores de eficiência estrutural no que ao módulo de elasticidade diz respeito com 16,7. É possível observar que a amplitude da eficiência estrutural, à exceção das vigas HSBBP, é semelhante e revela proximidade (dispersão pequena) entre os resultados obtidos dentro da mesma tipologia de vigas.

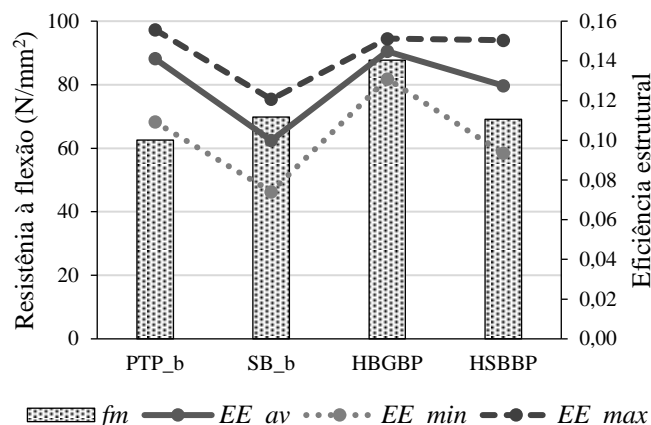


Figura 4.12 - Resistência à tração (média) e eficiência estrutural por tipo de viga.

Quanto a valores médios da resistência à flexão, as vigas HBGBP (0,14) a par das PTP_b (0,14) apresentam melhores resultados, com ligeira superioridade (2,6%) nas HBGBP. Apesar das vigas SB_b terem resultados superiores aos das vigas HSBBP na resistência à flexão, o rendimento estrutural destas (0,10) é inferior às HSBBP (0,13) como seria de esperar, uma vez que a massa volúmica das vigas SB_b (699 kg/m^3) é superior à das HSBBP (539 kg/m^3). Com a exceção das vigas HBGBP, foi possível observar dispersão dos resultados obtidos, nomeadamente na amplitude da EE que é de 0,06 nas HSBBP e de 0,05 nas PTP_b e SB_b.

Considerando as vigas SB_b e HBGBP, é possível observar que a integração de Choupo nas lamelas interiores das vigas HBGBP aumenta a eficiência estrutural desta tipologia de vigas, tornando-se mais vantajoso em relação às vigas constituídas apenas por uma espécie, uma vez que há maior aproveitamento dos materiais por conta da utilização de lamelas de qualidade inferior no centro da viga. Relativamente às vigas PTP_B e HBGBP, apesar da combinação de espécies não conduzir a ganhos significativos na eficiência estrutural, com as vigas HBGBP consegue-se, à semelhanças das HSBBP, usar de forma mais racional as matérias -primas, conduz a significativos na resistência à flexão, sendo uma boa alternativa às vigas exclusivamente de Eucalipto.

4.4.3. Propriedades mecânicas de referência

Concluídos os ensaios de caracterização das propriedades mecânicas das vigas de MLC à flexão, procedeu-se à determinação do teor de água e da massa volúmica da viga. Os provetes foram obtidos, sempre que possível, o mais próximo das linhas de rotura e isentos de defeitos. Mediram-se as dimensões (altura, largura e comprimento) e pesaram-se os provetes, destes valores se obtendo a massa volúmica.

O teor de água foi determinado através do método de secagem em estufa estabelecido na EN 13183-1 (CEN, 2002) e como considerado anteriormente na secção 3.3.2 e aplicando a Equação (3). Tendo em conta que as vigas apresentaram um valor de teor de água médio diferente do valor de referência, procederam-se aos ajustes para 12% de teor de água, seguindo as equações (4) e (5), conforme descrito na secção 3.3.2 para madeira maciça.

A resistência à flexão deve ser ajustada ($f_{m,adj}$) tendo em conta diversas condicionantes, nomeadamente: i) através do fator (k_h) que considera um ajuste para uma altura de referência de 600 mm, determinado através da Equação (17); ii) fator que considera o ajuste para uma espessura das lamelas de 40 mm (k), determinado através da Equação (18). Ambos os fatores são referidos na NP EN 14080 (IPQ, 2019), multiplicando-se a resistência à pelos respetivos fatores de ajuste (Equação (20)). A resistência à flexão deve ser também ajustada, conforme a EN 384 (CEN, 2010), para as dimensões de ensaio prescritas na EN 408 (CEN, 2012), através do fator k_l (Equação (19)). Para tal dividiu-se a resistência à flexão por este último fator de ajuste (Equação (20)).

$$k_h = \max\left(\left(\frac{h}{600}\right)^{0,1}; 0,90\right) \quad (17)$$

$$k = \min\left(\left(\frac{40}{t}\right)^{0,1}; 1,05\right) \quad (18)$$

$$k_l = \left(\frac{48h}{l + 5a_1}\right)^{0,2} \quad (19)$$

$$f_{m,adj} = \frac{f_m k_h k}{k_l} \quad (20)$$

em que k_h é o fator de ajuste relativo à altura da viga, h é a altura da viga, k é o fator de ajuste em função da espessura das lamelas, t é a espessura das lamelas, k_l é o fator de ajuste em função das distâncias de ensaio preconizadas na EN 408 (CEN, 2012), l é a distância entre apoios do ensaio, a é a distância entre pontos de aplicação de carga e $f_{m,adj}$ é a resistência à flexão ajustada.

O valor médio do módulo de elasticidade foi calculado de acordo com a Equação (21) que ajusta este parâmetro para flexão pura, seguindo o prescrito na cláusula 5.3.2 da EN 384:2010.

$$E_{m,mean} = \left(\sum E_i / n\right) 1,3 - 2690 \quad (21)$$

Onde E_i é o módulo de elasticidade da viga i (de 1 a n) e n é a dimensão da amostra.

O valor característico da massa volúmica (ρ_k), à semelhança do procedimento seguido na secção 3.3.2, foi calculado com recurso à Equação (8).

Na determinação do valor característico da resistência à flexão ($f_{m,k}$) foi seguido o cálculo paramétrico explicitado na EN 14358 (CEN, 2016), recorrendo às Equações (22) e (23).

$$k_s(n) = \frac{6,5n + 6}{3,7n - 3} \quad (22)$$

$$f_{m,k} = \exp\left(\overline{f_{m,adj}} - k_s(n) \times s_{f_{m,adj}}\right) \quad (23)$$

em que $k_s(n)$ é o fator de ajuste relativo à dimensão da amostra, n é a dimensão da amostra, $\overline{f_{m,adj}}$ e $s_{f_{m,adj}}$ são, respetivamente, a média e desvio padrão da resistência à flexão considerando uma distribuição log-normal.

No enquadramento e atribuição de classes de resistência à flexão de vigas (homogéneas e combinadas), estabelecidas na NP EN 14080 (IPQ, 2019), tiveram-se em conta os valores característicos da resistência à flexão e da massa volúmica assim como a média do módulo de elasticidade. Para as restantes configurações de vigas não há regulamentação, uma vez que a NP EN 14080 não contempla vigas de MLC de madeira de espécies folhosas (à exceção do Choupo) ou de espécies combinadas.

De seguida apresenta-se nos Quadros 4.7 e 4.8 o resumo das propriedades físicas e mecânicas determinadas no presente estudo sobre MLC por tipo de viga, com as propriedades para atribuição da classe de resistência à flexão realçadas a **negrito** e, a sublinhado, a classe de resistência atribuída.

Quadro 4.7 - Resumo das propriedades físicas e mecânicas de referência das vigas PTP_b e SB_b.

	PTP_b			SB_b		
	$\rho_{12\%}$ (kg/m ³)	$E_{12\%}$ (N/mm ²)	$f_{m,adj}$ (N/mm ²)	$\rho_{12\%}$ (kg/m ³)	$E_{12\%}$ (N/mm ²)	$f_{m,adj}$ (N/mm ²)
Média	437,5	10857 (11425)	59,1	685,4	12135 (13086)	65,9
Mínimo	399,6	9917	47,3	652,5	10198	48,0
Máximo	460,4	12217	68,4	719,4	13549	78,6
COV (%)	4,2	7,9	10,4	2,4	7,8	12,0
Valor característico	407,6	-	46,1	663,4	-	50,6
Classe de resistência	GL26h	<u>GL22h</u>	GL32h	GL32c	<u>GL30c</u>	GL32c
Número de vigas		9			17	

Nota: os valores entre parêntesis foram calculados de acordo com a cláusula 5.3.2 da EN 384 (CEN, 2010).

Quadro 4.8 - Resumo das propriedades físicas e mecânicas de referência das vigas HBGBP e HSBBP.

	HBGBP			HSBBP		
	$\rho_{12\%}$ (kg/m ³)	$E_{12\%}$ (N/mm ²)	$f_{m,adj}$ (N/mm ²)	$\rho_{12\%}$ (kg/m ³)	$E_{12\%}$ (N/mm ²)	$f_{m,adj}$ (N/mm ²)
Média	597,6	16519 (18785)	82,8	535,3	12430 (13469)	65,2
Mínimo	574,8	14590	70,8	495,4	9928	44,8
Máximo	633,1	17380	87,5	566,8	15159	80,2
COV (%)	2,8	5,6	6,1	5,3	15,6	17,7
Valor característico	579,3	-	70,6	498,1	-	37,4
Classe de resistência	<u>GL32c</u>	<u>GL32c</u>	<u>GL32c</u>	GL32c	<u>GL30c</u>	GL32c
Número de vigas		7			5	

Nota: os valores entre parêntesis foram calculados de acordo com a cláusula 5.3.2 da EN 384 (CEN, 2010).

Como analisado anteriormente, as vigas de Choupo (PTP_b) apresentaram resultados elevados de resistência à flexão e, considerando a massa volúmica reduzida e a presença de alguns nós nas peças, apresenta-se como uma espécie com elevada relação resistência/massa volúmica. No entanto, apenas se lhe pode atribuir a classe GL22h, classificação condicionada pelo módulo de elasticidade, que apresenta valores reduzidos.

As vigas de Faia (SB_b) apresentam maior resistência à flexão quando analisadas apenas as vigas constituídas por uma só espécie, enquadrando-se na classe GL30c, a segunda classe mais elevada de resistência à flexão para combinado definida na NP EN 14080 (IPQ,2019).

De referir que esta análise engloba todas as vigas SB_b produzidas, ou seja, 9 vigas homogêneas (SB_b_h) e 8 vigas combinadas (SB_b_c). Analisando apenas as 9 vigas homogêneas de Faia obtiveram-se $E_{12\%}$ médio de 12650 N/mm² (calculado pela Equação (22)), ρ_k de 658,9 kg/m³ e f_{mk} de 56,2 N/mm². Com estes resultados, as vigas SB_b_h fabricadas neste estudo podem ser enquadradas numa classe de resistência à flexão de GL28h, classificação condicionada pelo módulo de elasticidade. De referir que a resistência à flexão das vigas SB_b_h, em valores característicos, é 11,0 % superior quando comparado com as vigas SB_b e 28,8% superior comparando com as SB_b_c.

Quanto às 8 vigas SB_b_c resultaram em $E_{12\%}$ médio de 13577 N/mm² (calculado pela Equação (22)), ρ_k de 669,2 kg/m³ e f_{mk} de 43,7 N/mm², podendo ser enquadradas na classe de resistência à flexão de GL32c, classe mais alta que existe regulamentada.

Relativamente às vigas híbridas, estas são claramente as mais eficientes uma vez que, com as vigas de Choupo e Eucalipto (HBGBP), podem atingir-se resistências superiores às das mais altas classes atualmente existentes. Efetivamente, e em termos de valor característico de resistência à flexão, estas vigas apresentaram valores de 66,8 N/mm², ligeiramente acima do dobro da resistência à flexão da classe mais alta, que é de 32 N/mm². Também ao nível do módulo de elasticidade em flexão estas vigas apresentam resultados na ordem do 16776 N/mm², resultados interessantes na medida em que o interior destas vigas é de Choupo com propriedades físicas e mecânicas reduzidas quando comparado com as do Eucalipto conseguindo-se, ainda assim, uma relação resistência/massa volúmica elevada, fazendo um melhor uso dos materiais disponíveis e permitindo elementos estruturais mais leves e igualmente resistentes.

Quanto às vigas híbridas de Choupo e Faia (HSBBP), o enquadramento numa classe resistente é semelhante às vigas SB_b uma vez que é também $E_{12\%}$ que limita a classe a GL30c. Não se observaram ganhos e/ou perdas significativas com a combinação de espécies no que à resistência e rigidez de flexão diz respeito, em valores médios, quando comparado com as vigas SB_b. Houve um ligeiro ganho na rigidez (0,9%) e um decréscimo na resistência à flexão (1,0%).

Comparando vigas HBGBP face às HSBBP, as primeiras apresentaram propriedades mais elevadas no que diz respeito à rigidez e à resistência à flexão. Os valores nas HBGBP foram superiores em 31,8% e 27,0% para o módulo de elasticidade e para a resistência à flexão, respetivamente, quando comparadas com as vigas HSBBP.

4.5. Análise do comportamento mecânico

Os modos e localização das roturas foi analisado, registado e documentado fotograficamente. Teve-se em conta o tipo de rotura ocorrido, a extensão da mesma e se a sua origem foi condicionada por algum defeito.

Foi observada a formação de pregas de compressão, como se observa na Figura 4.13, em 2 vigas PTP_b, em 5 vigas SB_b, em 3 vigas HBGBP e em 3 vigas HSBBP. Estas pregas formam-se quando as vigas libertam alguma da energia e plastificam localmente, traduzindo-se num comportamento elasto-plástico que não é de todo usual em elementos de madeira à flexão.

Referir que em 92,1% de todas as vigas a rotura ocorreu no troço central. Nas vigas PTP_b, as roturas foram principalmente (77,8%) por tração nas lamelas inferiores com alguma projeção longitudinal por corte principalmente a partir da lamela central para os topos, assim como nas vigas HBGBP (100,0%), nas vigas HSBBP (80,0%) e nas SB_b (82,3%). Reportar ainda que 1 viga HSBBP (20,0%) e 1 viga SB_b (5,8%) a rotura foi por corte longitudinal a partir de um dos topos, roturas provocadas pelas tensões de corte elevadas nas extremidades das vigas, e que nas restantes vigas SB_b (11,8%) das SB_b formaram-se pequenas roturas de tração que levaram a rotura irregular e com a separação de lascas de madeira.



Figura 4.13 - Pregas de compressão numa viga HBGBP.

Com a formação das pregas de compressão, e face ao gráfico força vs tempo traçado aquando dos ensaios ter evidenciado comportamento dúctil, procedeu-se ao traçar dos gráficos força vs deslocamento, partindo dos dados adquiridos do atuador hidráulico, nomeadamente da força e deslocamento aplicados. As curvas força vs deslocamento referentes ao comportamento de cada viga com o incremento de carga são apresentadas da Figura 4.14 à 4.18. É possível observar que um grande número de vigas apresentou comportamento elasto-plástico.

Os ensaios prosseguiram mesmo quando a carga máxima era atingida nas vigas onde ainda havia alguma capacidade resistente, considerando-se o deslocamento correspondente à carga máxima assim como o deslocamento máximo (correspondente ao deslocamento quando houve rotura da viga). As curvas correspondentes a vigas do mesmo módulo de elasticidade alvo estão traçadas com a mesma cor.

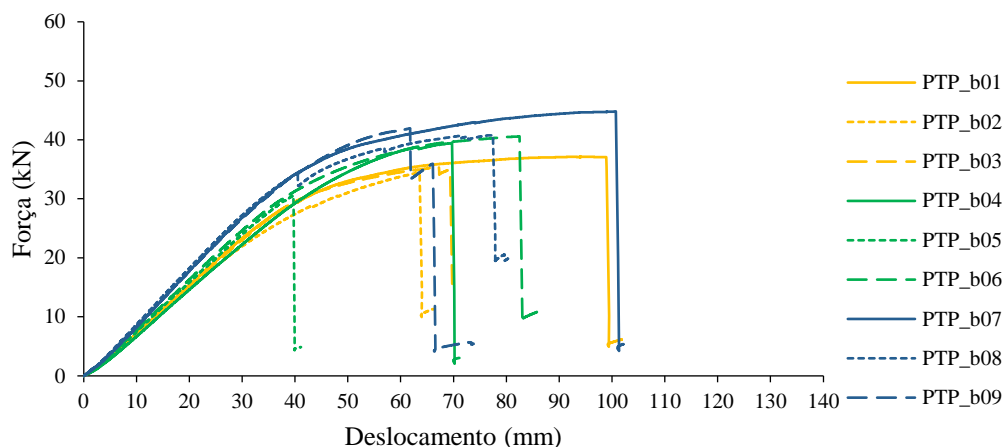


Figura 4.14 - Curvas força-deslocamento obtidas para as vigas de Choupo.

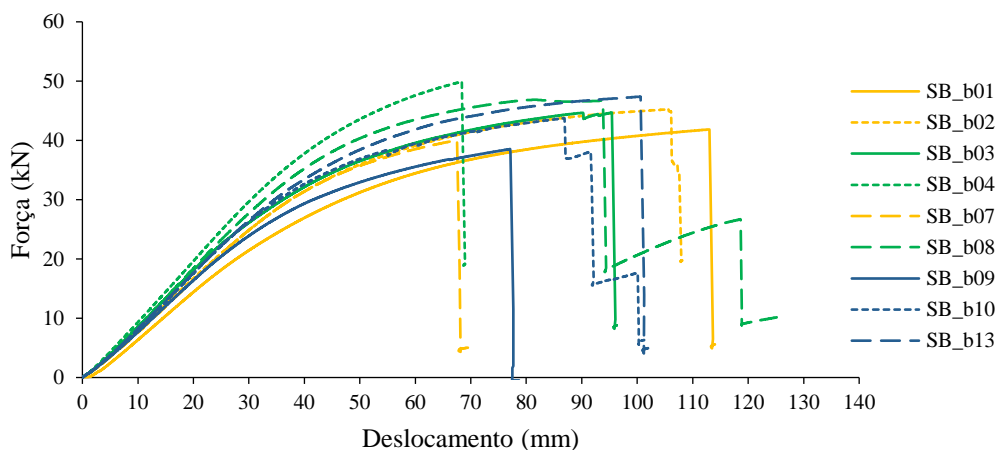


Figura 4.15 - Curvas força-deslocamento obtidas para as vigas homogêneas de Faia.

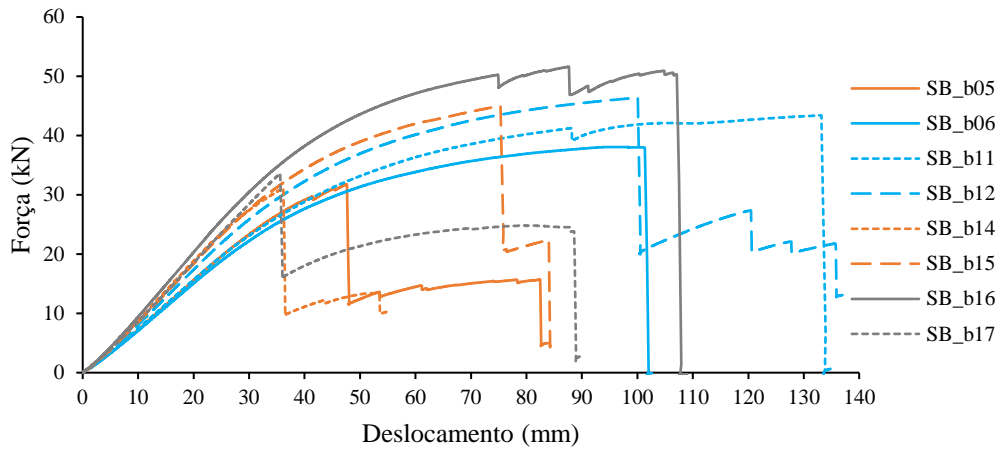


Figura 4.16 - Curvas força-deslocamento obtidas para as vigas combinadas de Faia.

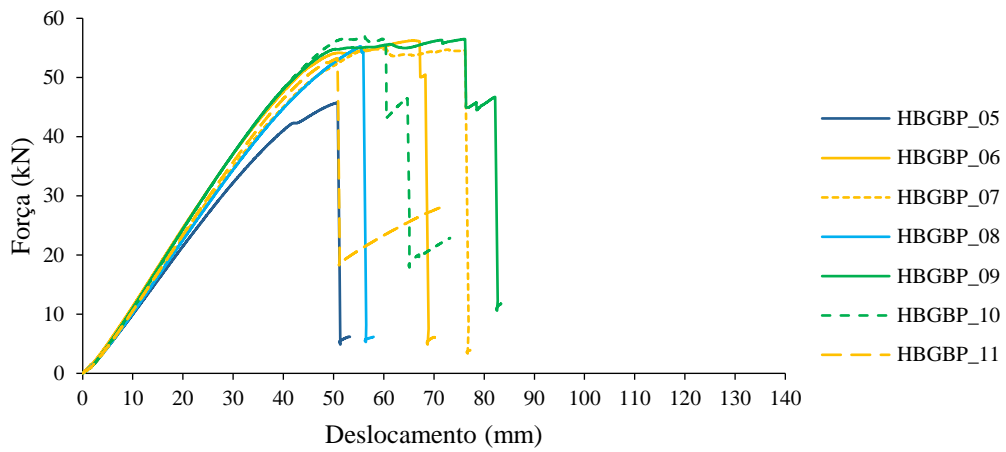


Figura 4.17 - Curvas força-deslocamento obtidas para as vigas de Eucalipto e Choupo.

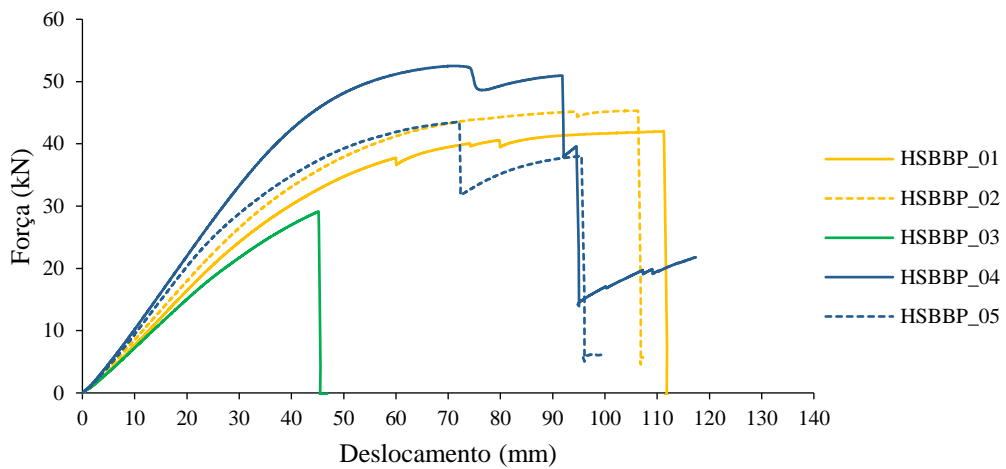


Figura 4.18 - Curvas força-deslocamento obtidas para as vigas de Faia e Choupo.

De seguida, no Quadro 4.9, estão resumidos os valores de rotura obtidos para cada tipo de viga.

Quadro 4.9 - Resumo das cargas e deslocamentos máximos aplicados por tipo de viga.

Tipo de viga	Carga de rotura (kN)			Deslocamento máximo (mm)		
	Média	Mínima	Máxima	Médio	Mínimo	Máximo
PTP_b	38,3	30,6	44,8	74,4	39,7	100,7
SB_b	42,3	31,2	51,6	84,6	35,6	132,9
SB_b_h	44,2	38,5	49,9	89,9	67,5	113
SB_b_c	40,1	31,2	51,6	78,7	35,6	132,9
HBGBP	54,1	45,8	57,0	62,6	50,8	76,2
HSBBP	42,5	29,2	52,5	85,4	45,2	111,3

Na série PTP_b, apenas 1 viga apresentou comportamento linear até à rotura. A viga em questão foi a PTP_b05, que teve rotura com início numa secção em que se registou a presença de um nó. Quanto às restantes, houve pelo menos um pequeno trecho de alguma não linearidade mobilizada nas vigas.

No caso da Faia, grande parte das vigas (11) tiveram um comportamento não-linear acentuado, enquanto 3 tiveram um comportamento levemente não-linear e as restantes (3) tiveram comportamento linear até à rotura. De referir que 8 vigas atingiram deslocamentos acima dos 95 mm, com máximo de 132,9 mm.

As vigas HBGBP apresentaram os menores deslocamentos, em termos de valores médios, na ordem dos 62,6 mm. Porém, devido à elevada rigidez, as cargas aplicadas foram expressivamente superiores à de todas as outras configurações de vigas apresentadas, excedendo-as de um valor da ordem dos 54 kN, em média. Apenas 1 das vigas apresentou comportamento aproximadamente linear até à rotura.

Excetuando a viga HSBBP_03, que teve comportamento marcadamente linear, também nesta configuração (HSBBP) se conseguiu observar comportamento não linear. Em termos de resultados, estes não foram muito diferentes dos obtidos para as vigas SB_b, quer em carga quer em deslocamento máximos. Realçar o deslocamento acima dos 90 mm obtidos nas vigas com comportamento não linear. A viga HSBBP_03 tem rotura prematura, possivelmente devido às propriedades das lamelas constituintes (lamelas exteriores na ordem dos 12 kN/mm² e as lamelas interiores abaixo dos 9 kN/mm²), levando a que quer no TSM quer no MTG resultem valores de módulo de elasticidade dinâmicos razoavelmente mais baixos que as restantes vigas desta tipologia, assim como o valor do módulo de elasticidade estático em flexão que é inferior às restantes vigas, e dada a correlação entre o módulo de elasticidade e a resistência à tração, seria expectável que esta viga tivesse pior desempenho que as restantes desta configuração.

Dado o número reduzido de vigas desta gama de módulo de elasticidade dinâmico das lamelas constituintes, recomenda-se produzir mais algumas vigas semelhantes para que se possam retirar conclusões sólidas.

4.6. Avaliação do desempenho e qualidade de colagem

Com o objetivo de averiguar e validar a qualidade de colagem das vigas, após a rotura foram obtidos para além dos provetes para determinação do teor de água e massa volúmica provetes para determinar a resistência à delaminação e a resistência ao corte das linhas de cola das vigas produzidas.

A obtenção dos provetes foi efetuada no menor intervalo de tempo após o ensaio de rotura à flexão das vigas e após o corte foram sempre mantidos em espaço climatizado até à realização dos ensaios.

4.6.1. Delaminação

Os provetes para os ensaios de delaminação seguiram os pressupostos do anexo C da NP EN 14080 (IPQ, 2019), no que respeita às dimensões e procedimento de ensaio. Imediatamente após a obtenção dos provetes, foram feitas a pesagem e as medições das dimensões (largura, altura e comprimento) e do comprimento das linhas de cola nos topos. As dimensões médias dos provetes foram de $76 \times 91 \times 120 \text{ mm}^3$ e o comprimento médio das linhas de cola foi de 90,7 mm. Foi também avaliado se havia já algum tipo de delaminação e/ou se as lamelas tinham algum tipo de defeito junto à linha de cola. Estes defeitos foram anotados e todas as faces foram fotografadas para posterior consulta do estado inicial dos provetes.

De acordo com a NP EN 14080 (IPQ, 2019) existem 3 métodos para avaliação do desempenho de colagem das linhas de cola de MLC. É referido o método C para análise de elementos produzidos para exposição em Classes de Serviço 1 e 2. No entanto, para a Classe de Serviço 3 não é especificado qual o método a seguir pelo que se optou pelo Método A, amplamente utilizado por vários estudos, nomeadamente por Martins (2018), entre outros, permitindo assim realizar uma análise comparativa válida. Os provetes foram colocados em autoclave, imersos em água e, com recurso a uma bomba, foi aplicado vácuo de $0,8 \text{ N/mm}^2$ durante 5 minutos. Foi retirado o vácuo, adicionada água até preencher o autoclave na totalidade e aplicada pressão entre $5,0 \text{ N/mm}^2$ e $6,0 \text{ N/mm}^2$ durante 60 minutos. Este ciclo de vácuo-pressão foi repetido, para cumprir com o estabelecido na norma. Após a conclusão do segundo ciclo, os provetes foram levados para uma conduta de secagem, espaçados entre si pelo menos 50 mm, com os anéis de crescimento na direção perpendicular à circulação de ar. Permaneceram neste equipamento durante pelo menos 21 h (não excedendo as 22 h) com temperatura de $65 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$, humidade relativa inferior a 15 % e deslocação de ar de $2 \pm 0,5 \text{ m/s}$. Este processo foi repetido

novamente, completando assim 2 ciclos completos, pelo que após o 2º ciclo se procedeu à leitura das delaminações ocorridas.

Com recurso a uma lupa de ampliação de 10x, as delaminações foram medidas e anotadas, e por fim foram fotografadas novamente as faces avaliadas, tal como ilustra a Figura 4.19, não excedendo, este processo, 1 h de duração.



Figura 4.19 - Delaminações após o 3º ciclo, provete HBGBP (à esquerda), provete PTP (à direita).

Efetuiu-se mais um processo de impregnação-secagem, completando assim um 3º ciclo, após o qual se registaram novamente as delaminações ocorridas.

A delaminação total foi calculada pela Equação (24) e a delaminação máxima da linha de cola pela Equação (25), expressões nas quais $l_{total,delam}$ é o comprimento total de delaminação no provete, $l_{total,linha\ cola}$ o comprimento total das linhas de cola do provete, $l_{max,delam}$ o comprimento máximo de delaminação da linha de cola e $l_{linha\ cola}$ o comprimento da respetiva linha de cola.

$$\%_{delam,total} = 100 \frac{l_{total,delam}}{l_{total,linha\ cola}} \quad (24)$$

$$\%_{delam,linha} = 100 \frac{l_{max,delam}}{2l_{linha\ cola}} \quad (25)$$

Os limites para a delaminação total para espécies resinosas são de 5% ao final do 2º ciclo e de 10% ao final do 3º ciclo. A delaminação máxima numa linha de cola isolada não deve exceder os 30%.

Os resultados obtidos encontram-se sintetizados no Quadro 4.10.

Quadro 4.10 - Resumo dos ensaios de delaminação das vigas ensaiadas à flexão.

Viga	Cola	Delaminação total		
		Número de provetes	2º ciclo (%)	3º Ciclo (%)
PTP_b	Aerodux185 + HRP 150	16	1,8 (4,2)	2,9 (8,0)
SB_b	Aerodux185 + HRP 150	13	3,0 (19,4)	4,6 (29,1)
	Prefere 4094 + Prefere 5827	4	2,6 (<u>5,5</u>)	5,1 (8,5)
HBGBP	Aerodux185 + HRP 150	13	6,6 (12,4)	8,3 (14,1)
HSBBP	Aerodux185 + HRP 150	2	2,7 (<u>5,5</u>)	7,4 (<u>12,5</u>)
	Prefere 4094 + Prefere 5827	3	3,9 (8,0)	4,5 (8,5)

Nota: Valores médios e, entre parêntesis, os valores máximos. Os valores a negrito correspondem a valores médios acima dos limites de delaminação estabelecidos na NP EN 1400 (CEN, 2019). Os valores sublinhados correspondem a situações em que se verificou apenas 1 provete com delaminação total acima do limite. Os valores a negrito e sublinhados correspondem a situações em que 2 ou mais provetes verificaram delaminação acima do limite.

Para a cola obtida pela mistura Prefere 4094 + Prefere 5827, quer nas vigas SB_b quer nas HSBBP obteve-se um desempenho bom, tendo em ambos os casos ocorrido delaminação total em excesso em 1 provete no final do 2º ciclo e no 3º ciclo todos os provetes cumpriram os limites de delaminação máxima.

No caso de Aerodux 185 + HRP 150, para as vigas PTP_b não houve qualquer problema na colagem de face, tendo todos os provetes cumprido com os limites máximos para a delaminação para ambos os ciclos. No caso das vigas HSBBP, houve uma viga com delaminação ligeiramente acima do limite devido à disposição dos anéis de crescimento que são tangenciais. Por outro lado, nas vigas SB_b e HBGBP houve problemas ao nível da delaminação com pelo menos 2 provetes a terem delaminação acima do limite em ambos ciclos. No caso das vigas HBGBP, a delaminação ocorre principalmente na interface Choupo-Eucalipto, no caso das SB_b a delaminação deve-se à disposição dos anéis de crescimento que são tangenciais na maioria das linhas de cola onde ocorreram delaminações.

Estes resultados estão de acordo com os resultados obtidos por Martins (2018), que obteve bom desempenho na colagem de face de vigas PTP_b e delaminação acima dos limites para as vigas HBGBP na interface Eucalipto-Choupo.

No entanto há a ressaltar que estes resultados em nada afetaram as características mecânicas determinadas anteriormente, uma vez que nas vigas não foi observada qualquer rotura pelas linhas de cola.

4.6.2. Resistência ao corte das linhas de cola

Os provetes para resistência ao corte obedeceram aos pressupostos do anexo D da NP EN 14080 (IPQ, 2019), a nível de dimensões e procedimento de ensaio. Os provetes foram preparados para as dimensões finais de $50 \times 50 \times 120 \text{ mm}^3$. Foram medidos e registados os comprimentos das linhas de cola nas quatro faces, e, através da média das dimensões opostas, foi calculada a área do plano de corte de cada linha de cola.

Para a realização dos ensaios foi considerado um dispositivo de aplicação de carga de corte e um atuador hidráulico de 50 kN (Figura 4.20). A força foi aplicada em controlo de deslocamento com velocidade tal que a rotura ocorresse depois dos 20 segundos de ensaio. Deste ensaio apenas foi realizada a aquisição da força aplicada em intervalos de 0,1 s. Os provetes foram inseridos no dispositivo de carga de modo que a linha de cola ficasse coincidente com o plano de corte, e foi iniciado o ensaio até à rotura do provete. Foi avaliada a percentagem de rotura na madeira (PRM) com arredondamento a 5% e calculada a resistência ao corte (f_v) pela Equação (26), sendo k_v o fator de correção para peças cuja espessura na direção do fio é inferior a 50 mm, F_{max} o valor máximo da carga atuante e A a área da linha de cola.



Figura 4.20 - Layout de ensaio de resistência ao corte de uma linha de cola.

$$f_v = k_v \frac{F_{max}}{A} \quad (26)$$

As percentagens mínimas de rotura pela madeira, definidas na NP EN 14080 (IPQ, 2019), são indicadas no Quadro 4.11.

Quadro 4.11 - Percentagens mínimas de rotura pela madeira relativas à resistência ao corte.

Resistência ao corte f_v (N/mm ²)	Média			Valores individuais		
	6	8	$f_v \geq 11$	$4 \leq f_v \leq 6$	6	$f_v \geq 10$
Percentagem mínima de rotura pela madeira (%)	90	72	45	100	74	20

Todas as linhas de cola que apresentaram algum tipo de defeito antes ou após os ensaios foram descartadas desta análise, pois a análise pretende avaliar o comportamento da colagem entre madeira isenta de defeitos. Os resultados obtidos estão sumariados no Quadro 4.12.

Quadro 4.12 - Resumo dos ensaios de resistência ao corte das vigas ensaiadas à flexão.

Viga	Cola	Resistência ao corte média		
		Nº de linhas de cola	Resistência ao corte (N/mm ²)	PRM (%)
PTP_b	Aerodux 185 + HRP 150	61	10,3 (1,2)	99,9
	Aerodux 185 + HRP 150	66	14,7 (1,2)	98,5
SB_b	Prefere 4094 + Prefere 5827	28	14,7 (1,6)	98,9
	Aerodux 185 + HRP 150	50	10,5 (1,5)	96,8
HSBBP	Aerodux 185 + HRP 150	14	10,9 (1,7)	100,0
	Prefere 4094 + Prefere 5827	14	10,4 (1,1)	100,0

Nota: Entre parêntesis são apresentados os valores do desvio padrão.

Todas as linhas de cola cumpriram com os requisitos mínimos de resistência ao corte pela linha de cola em termos de valores individuais, e todos os provetes cumpriram com a resistência ao corte média. Desta forma, a qualidade de colagem das vigas relativamente à resistência ao corte pelas linhas de cola está verificada, e, portanto, conclui-se que ambas as referências de cola apresentaram um bom desempenho ao nível da colagem de face, mesmo considerando que os requisitos são para espécies resinosas.

Verificou-se também que os valores mais elevados de resistência ao corte foram nas vigas SB_b independentemente do tipo de cola usado com 14,7 N/mm² de resistência corte média. Seguiram-se as vigas HSBBP com 10,4 e 10,9 N/mm² para a cola com Prefere e para a cola com Aerodux, respetivamente, e onde ocorreu a percentagem de rotura pela madeira foi de 100%. Aprofundando a análise das linhas de cola, observou-se que a resistência ao corte foi superior na interface Faia-Choupo do que na interface Choupo-Choupo, sendo estes valores de 11,6 e de 9,5 N/mm², respetivamente. Os valores médios mais baixos foram obtidos para as vigas HBGBP com 10,5 N/mm² e para as PTP_b com 10,3 N/mm². Nas vigas HBGBP, analisando em termos de interfaces nas linhas de cola, a interface Eucalipto-Choupo foi a que

obteve melhor resultado com uma resistência de 11,1 N/mm² enquanto na interface Choupo-Choupo foi de 9,9 N/mm². Por outro lado, a percentagem de rotura pela madeira na interface Choupo-Choupo (98,4%) foi ligeiramente superior da interface Eucalipto-Choupo (95,2%).

No gráfico abaixo (Figura 4.21) pode-se analisar a dispersão dos resultados obtidos e da envolvente que define o limite da percentagem de rotura pela madeira da linha de cola em função da resistência ao corte. Nesta figura observa-se que nenhum dos resultados dos ensaios individuais das linhas de cola está abaixo do limite e que a maioria está próxima dos 100% de rotura pela madeira.

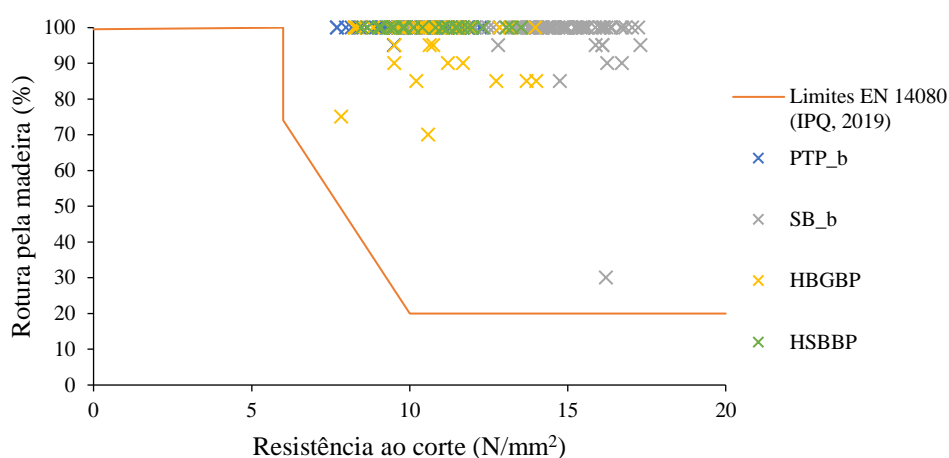


Figura 4.21 - Resultados da resistência ao corte e da percentagem de rotura pela madeira.

Numa das linhas de cola de uma viga de Faia (SB_b16; linha de cola 4) houve uma percentagem reduzida de rotura pela madeira (30%). Após a análise do provete, verificou-se que naquela linha de cola as lamelas provinham de tábuas com corte tangencial, que os anéis de crescimento estavam voltados em sentidos opostos como se observa na Figura 4.22, que o provete provém de uma viga onde o provete retirado para a resistência à delaminação não cumpriu com os limites. Salientar ainda que a viga em causa (SB_b16) foi momentaneamente submetida a pressão superior a 0,8 N/mm² no momento da aplicação da pressão, o que pode ter levado a que tenha havido exsudação em demasia da cola aplicada. No entanto, foram cumpridos os requisitos mínimos, quer para as linhas de cola individuais quer para o provete. Confirmou-se também os dados obtidos dos ensaios de delaminação para aquela viga e constatou-se que ocorreu delaminação acima dos limites estabelecidos quer para o segundo quer para o terceiro ciclos. Na Figura 4.22 observam-se fotografias do provete após ensaio, sendo possível observar a posição dos anéis de crescimento, bem como as duas faces da interface da linha de cola onde se registou a menor PRM.



Figura 4.22 - Provete SB_b16 após rotura no ensaio de resistência ao corte da linha de cola visto do topo (à esquerda) e vista da linha de cola 4 (à direita).

4.7. Conclusão

Foram ensambladas e produzidas em laboratório 9 vigas homogêneas de Choupo, 9 vigas homogêneas e 8 combinadas de Faia, 7 híbridas de Eucalipto e Choupo e 5 híbridas de Faia e Choupo. A distribuição das lamelas na secção transversal foi simétrica relativamente ao módulo de elasticidade dinâmico obtido para cada uma das lamelas.

As vigas foram caracterizadas através de métodos não destrutivos com a finalidade de previsão das suas propriedades mecânicas. Todas foram sujeitas a ensaios de flexão de 4 pontos de acordo com a EN 408 (CEN, 2012) com finalidade de determinar as propriedades mecânicas, nomeadamente o módulo de elasticidade em flexão e a resistência à flexão.

Foram obtidos para o módulo de elasticidade em flexão (médio) 10857 N/mm^2 nas vigas de Choupo, 12135 N/mm^2 nas vigas de Faia, 16519 N/mm^2 nas vigas de Eucalipto e Choupo e 12430 N/mm^2 nas vigas de Faia e Choupo. Na resistência à flexão resultaram valores médios de $59,1 \text{ N/mm}^2$ para as vigas de Choupo, $65,9 \text{ N/mm}^2$ para as vigas de Faia, $82,8 \text{ N/mm}^2$ para as vigas de Eucalipto e Choupo e $65,2 \text{ N/mm}^2$ para as vigas de Faia e Choupo. De referir que estes valores foram ajustados para as dimensões de ensaios e corrigidos para o teor de água de referência de 12%.

Relativamente ao enquadramento em classes de resistência das vigas produzidas, as vigas de Choupo apresentaram propriedades compatíveis com a atribuição da classe GL22h, as vigas de Faia para a classe GL30c (GL28h, se consideradas apenas as vigas homogêneas), as vigas híbridas de Eucalipto e Choupo para GL32c e as de Faia e Choupo para GL28c.

Foi avaliada a qualidade de colagem das vigas através de ensaios de delaminação e de resistência ao corte. No que à delaminação total diz respeito, todos os provetes retirados das

vigas de Choupo cumpriram com os limites de delaminação total. Considerando a média dos provetes, as tipologias de vigas Faia e Faia com Choupo cumpriram os requisitos de delaminação, apesar de pelo menos um provete ter apresentado delaminação acima dos limites estabelecidos para o 2º ciclo. As vigas de Eucalipto com Choupo apresentaram delaminação excessiva quer no final do 2º ciclo quer no final do 3º ciclo. Quanto aos ensaios de resistência ao corte todos os provetes ensaiados tiveram desempenho acima do mínimo estabelecido nas normas.

5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1. Conclusões

Este trabalho, inserido no projeto EGURALT (programa Interreg Sudoeste), foi realizado nas instalações do SerQ – Centro de Inovação e Competências da Floresta, e teve início na receção e caracterização da matéria-prima com recurso a métodos não destrutivos, nomeadamente o MTG. Foram caracterizadas 158 tábuas de Choupo e 320 tábuas de Faia de segunda qualidade. Da caracterização inicial resultaram, para a amostra de Choupo, dimensões médias de 2576 mm × 115 mm × 39 mm (comprimento × largura × espessura), massa volúmica de 428,3 kg/m³, e E_{dyn} de 11321 N/mm². Para a amostra de Faia dimensões de 2815 mm × 121 mm × 30 mm (comprimento × largura × espessura), massa volúmica de 693,7 kg/m³ e E_{dyn} de 12583 N/mm².

Foram selecionadas amostras mais reduzidas para ensaios de tração paralela às fibras de forma que se tivesse uma distribuição representativa da amostra inicial em termos de módulo de elasticidade, que fez um total de 45 tábuas de Choupo e 46 tábuas de Faia. Dos ensaios de tração resultaram, para o Choupo, módulo de elasticidade em tração de 12418 N/mm² e resistência à tração de 46,6 N/mm², e para a Faia, módulo de elasticidade em tração de 13198 N/mm² e resistência à tração de 63,5 N/mm². A massa volúmica determinada no Choupo foi de 412 kg/m³ e na Faia de 660 kg/m³. Estes são valores médios e ajustados às condições de teor de água e dimensões de ensaio.

Tendo em conta estes resultados, a amostra de Choupo enquadra-se numa classe de resistência à tração de T12, e a amostra de Faia na classe de resistência de DT22 (classe proposta por Kovryga *et al.* (2020) para caracterização de madeira de espécies folhosas em tração). Obtiveram-se correlações fortes e muito fortes na previsão das propriedades mecânicas de ambas as amostras (acima de 0,58).

Selecionaram-se também tábuas para a produção em laboratório de 9 vigas homogéneas de Choupo, 17 vigas de Faia (9 homogéneas e 8 combinadas), 7 híbridas de Eucalipto com Choupo e 5 híbridas de Faia com Choupo. Estas vigas foram sujeitas a ensaios de flexão de 4 pontos de acordo com a EN 408 (CEN, 2012) para a determinação das propriedades mecânicas, nomeadamente o módulo de elasticidade em flexão e a resistência à flexão.

Relativamente às vigas de uma só espécie, obtiveram-se para o módulo de elasticidade em flexão e para a resistência à flexão médios, respetivamente, 10857 N/mm² e 59,1 N/mm² para as vigas de Choupo, e 12135 N/mm² e 65,9 N/mm² para as vigas de Faia. Quanto às vigas híbridas, obtiveram-se, 16519 N/mm² e 82,8 N/mm² para as vigas de Eucalipto e Choupo, e

12430 N/mm² e 65,2 N/mm² para as vigas de Faia e Choupo (valores já ajustados e corrigidos para o teor de água e dimensões de ensaio).

Face aos resultados obtidos, as vigas de Choupo podem-se enquadrar numa classe GL22h, as vigas de Faia na classe de GL30c (ou GL28h se consideradas apenas as vigas homogêneas, ou GL32c se consideradas as combinadas), as vigas híbridas de Eucalipto e Choupo de GL32c e as de Faia e Choupo de GL30c.

Excetuando as vigas de Eucalipto com Choupo, todas as outras configurações de vigas obtiveram, em média, bom desempenho das linhas de cola à delaminação, tendo as vigas de Choupo apresentado valores muito bons. Na resistência ao corte das linhas de colagem, todas as linhas ensaiadas cumpriram com os critérios estabelecidos nas normas.

As propriedades mecânicas determinadas neste trabalho estão enquadradas com as propriedades mecânicas obtidas por outros autores, quer para as mesmas espécies, mas com proveniências diferentes, quer para espécies folhosas com massas volúmicas semelhantes às massas volúmicas da matéria-prima utilizada neste estudo, nomeadamente espécies de baixa e de média massa volúmica.

Considerando os resultados obtidos neste trabalho, o método da vibração longitudinal conduz a bons resultados na previsão das propriedades mecânicas quer de elementos de madeira maciça quer de elementos de MLC.

Face às propriedades determinadas, as espécies Choupo (*Populus spp.*) e Faia (*Fagus sylvatica L.*) revelaram potencial para serem usadas em elementos estruturais como vigas de MLC, assim como a combinação entre espécies para a produção de vigas de MLC. No entanto, para que tal seja possível, é necessária a definição de classes de resistência para ensaios de tração em espécies folhosas, assim como regulamentação para o fabrico de MLC com espécies folhosas.

5.2. Trabalhos futuros

De futuro, e no seguimento do trabalho apresentado nesta dissertação, podem ser realizados estudos tais como:

- Estudo do comportamento de ligações de entalhes múltiplos em espécies folhosas e o seu efeito na composição de vigas de MLC;
- Caracterização de *finger-joints* em madeira de Choupo e/ou de Faia (segunda qualidade) à tração;

- Caracterização de madeira de Faia (primeira qualidade) em comparação com a madeira de Faia (segunda qualidade) com e sem *finger-joints*;
- Ensaios para a avaliação da aderência e qualidade de colagem com outros tipos de cola, nomeadamente colas do tipo PUR (poliuretano);
- Modelação numérica para replicação do comportamento elasto-plástico das vigas de MLC de uma só ou de 2 espécies combinadas;
- Estudo do comportamento da combinação das espécies folhosas na produção de outros produtos estruturais, tais como CLT, vigas I entre outros produtos;
- Quantificação económica de novas soluções de madeira estrutural de folhosas com demonstrado potencial de propriedades mecânicas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alvite, J., Vázquez, M., Infante, F. (2002). “Manual de la madera de eucalipto blanco”. Fundación para o Fomento da Calidade Industrial e Desenvolvemento Tecnológico de Galicia, Ourense.

American Society for Testing and Materials (ASTM), (2005). “D 3737-05: Standard Practices for Establishing Allowable Properties for Structural Glued Laminated Timber (Glulam)”. ASTM International, Estados Unidos da América.

Brandt, K. (2019). “Active centenarian that changed the industry: Glulam 100-years in Sweden”. Wood Magazine, Issue 3, pp 13-21.

Carvalho, A. (1996). “Madeiras portuguesas”. Instituto florestal, Lisboa.

Castro, G., Paganini, F. (2003). “Mixed glued laminated timber of poplar and *Eucalyptus grandis* clones”. Holz Roh Werkst, Vol. 61, pp. 291–298. <https://doi.org/10.1007/s00107-003-0393-6>.

Castro, G., Fragnelli, G. (2006). “New Technologies and Alternative Uses for Poplar Wood”. Boletín del CIDEU, N°2, pp. 27-36.

Cibecchini, D., Cavalli, A., Goli, G., Togni, M. (2016). “Beech sawn timber for structural use: A case study for mechanical characterization and optimization of the Italian visual strength grading rule”. Journal of Forest Science, Vol. 62, pp. 521-528

Comité Europeu de Normalização (CEN), (2002). “EN 13183-1: Moisture content of a piece of sawn timber - Part 1: Determination by oven dry method”. European Committee for Standardization, Bruxelas.

Comité Europeu de Normalização (CEN), (2003). “EN 338: Structural timber - Strength Classes”. European Committee for Standardization, Bruxelas.

Comité Europeu de Normalização (CEN), (2010). “EN 384: Structural timber - Determination of characteristic values of mechanical properties and density”. European Committee for Standardization, Bruxelas.

Comité Européen de Normalization (CEN), (2012). “EN 408+A1: Timber structures - Structural timber and glued laminated timber - Determination of some physical and mechanical properties”. European Committee for Standardization, Brussels.

Comité Européen de Normalization (CEN), (2016). “EN 14358: Timber structures - Calculation and verification of characteristic values”. European Committee for Standardization, Brussels.

Ehrhart, T., Fink, G., Steiger, R., Frangi, A. (2016a). “Experimental investigation of tensile strength and stiffness indicators regarding European beech timber”. Proceedings of 14th World Conference on Timber Engineering WCTE, Vienna, Austria.

Ehrhart, T., Fink, G., Steiger, R., Frangi, A. (2016b). “Strength grading of European beech lamellas for the production of GLT and CLT”. INTER - Meeting Forty-Nine. Graz, Austria, pp. 29-43.

Ehrhart, T., Steiger, R., Palma, P., Frangi, A. (2018). “Mechanical properties of European beech glued laminated timber”. Paper 51-12-4. INTER - Meeting Fifty-One. Tallinn, Estonia, pp. 343-358.

FAO (1979). “Poplars and Willows in Wood Production and Land Use”. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma, Italia.

Frese, M., Blaß, HJ. (2005). “Characteristic bending strength of beech glulam”. Materials and Structures, Vol. 40, pp 3–13. DOI 10.1617/s11527-006-9117-9

Gameiro, R. M., (2022). “Floresta espanhola cobre cerca de 36% do país, tal como em Portugal”. <https://florestas.pt/conhecer/floresta-espanhola-cobre-cerca-de-36-do-pais-tal-como-em-portugal/>. (consultado em 4/8/2022).

Gil-Moreno, D., Ridley-Ellis., D, O’Ceallaigh, C., Harte, A. (2022). “The relationship between bending and tension strength of Irish and UK spruce and pine”. European Journal of Wood and Wood Products, Vol. 80, pp. 585–596. <https://doi.org/10.1007/s00107-022-01787-6>

Glen, S. (2022). “Elementary Statistics for the rest of us!: Correlation Coefficient: Simple Definition, Formula, Easy Steps”. <https://www.statisticshowto.com/probability-and-statistics/correlation-coefficient-formula/>. (consultado em 26/7/2022).

Guntekin, E., Ozkan, S., Yilmaz, T. (2014). “Prediction of bending properties for beech lumber using stress wave method”. Maderas. Ciencia y tecnología, Vol. 16, Issue 1, pp. 93-98.

Hodousek, M., Dias, A., Martins, C., Marques, A., Böhm, M. (2017). “Comparison of Non-Destructive Methods Based on Natural Frequency for Determining the Modulus of Elasticity of *Cupressus lusitanica* and *Populus x canadensis*.” *Bioresources*, Vol. 12, Issue 1, pp 270-282.

ICNF (2019). “IFN6 – Relatório final (versão 1.0)”. Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas, Lisboa.

IGN (2021). “Le mémento – Inventaire Forestier”. Institut national de l’information géographique et forestière, Paris.

José Luis Madeiras (2022). “Faia”. <https://www.jlm.com.pt/faia/>. (consultado em 4/8/2022).

Kovryga, A., Schlotzhauer, P., Stapel, P., Militz, H., van de Kuilen, J. (2019). “Visual and machine strength grading of European ash and maple for glulam application”. *Holzforschung*, Vol. 73, Issue 8, pp. 773-787. <https://doi.org/10.1515/hf-2018-0142>.

Kovryga, A., Stapel, P., van de Kuilen, J. (2016). “Tensile strength classes for hardwoods”. *INTER Proceedings, Metting 49, Graz, Áustria* (pp. 97-113).

Kovryga, A., Stapel, P., van de Kuilen, J. (2020). “Mechanical properties and their interrelationships for medium-density European hardwoods, focusing on ash and beech”. *Wood Material Science & Engineering*, Vol. 15, Issue 5, pp. 289-302, DOI:10.1080/17480272.2019.1596158.

Maderame (2022). “Madera de Haya: Propiedades y Utilización”. <https://maderame.com/enciclopedia-madera/haya/>. (consultado em 4/8/2022).

Martins, M. (2015). “Caracterização do Eucalipto globulus para aplicação estrutural”. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra, 1º Vol..

Martins, C. (2018). “Avaliação Estrutural de Elemento de Madeira Lamelada Colada”. Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra, 1 Vol..

Martins, C., Dias, A., Cruz, H. (2020). “Blue gum: assessment of its potential for glued laminated timber beams”. *European Journal of Wood Products*, Vol. 78, pp. 905–913. <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01567-0>.

Martins, C., Ferreira, C., Baño, V., Dias, A. (2022). “Experimental characterization of beech through tensile and bending tests”. 6th International Conference on Structural Health Assessment of Timber Structures, Praga, República Checa.

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) (2021). “Anuario de Estadística Forestal 2019”. Madrid, Espanha.

Moltini, G., Baño, V., Martins, C., Dias, A. (2022). “Derivation of MTG machine settings of Southern blue gum from Spain and Portugal tested in Tension according to EN 14081-2:2018”. Grading Report No. TG1/2021/11/03_03

Monteiro, S., Martins, C., Dias, A., Cruz, H. (2019a). “Mechanical characterization of clear wood from Portuguese Poplar”. *BioResources*, Vol. 14, Issue 4, pp. 9677-9685.

Monteiro, S., Martins, C., Dias, A., Cruz, H. (2019b). “Mechanical performance of wood-based products fabricated with Portuguese Poplar”. 7th International Scientific Conference on Hardwood Processing, Delft, Países Baixos. pp. 176-183.

Naturally:wood (2022). “Glue-laminated timber (glulam): The fabrication, uses, performance and sustainability of glulam”. <https://www.naturallywood.com/products/glulam/>. (consultado em 3/8/2022).

NP EN 14080 (2019). “Estruturas de madeira - Madeira lamelada colada e madeira maciça colada – Requisitos”. Instituto Português da Qualidade, Lisboa.

Ravenshorst, G. (2015). “Species independent strength grading of structural timber”. Tese de Doutorado, Technische Universiteit Delft, Países Baixos.

Rescalvo, F., Timbolmas, C., Bravo, R., Valverde-Palacios, I., Gallego, A. (2021) “Improving Ductility and Bending Features of Poplar Glued Laminated Beams by Means of Embedded Carbon Material”. *Construction and Building Materials*, Vol. 304, Article 124469. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124469>.

Wood Solutions (2022). “Glulam”. <https://www.woodsolutions.com.au/wood-species/wood-products/glulam>. (consultado em 4/8/2022).