

Romeu Manuel Paiva Santos

UTILIZAÇÃO DE MODELOS NUMÉRICOS PARA PREDIÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MADEIRA LAMELADA COLADA

PREDICTION OF MECHANICAL PROPERTIES OF GLUED LAMINATED TIMBER USING NUMERICAL MODELS

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Estruturas, orientada pelo
Professor Doutor Alfredo Manuel Pereira Geraldes Dias e pelo Engenheiro Carlos Eduardo de Jesus Martins

Coimbra, 26 de dezembro de 2017



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



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

Romeu Manuel Paiva Santos

UTILIZAÇÃO DE MODELOS NUMÉRICOS PARA PREDIÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MADEIRA LAMELADA COLADA

PREDICTION OF MECHANICAL PROPERTIES OF GLUED LAMINATED TIMBER USING NUMERICAL MODELS

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Estruturas, orientada pelo Professor Doutor Alfredo Manuel Pereira Geraldês Dias e pelo Engenheiro 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.

Coimbra, 26 de dezembro de 2017

AGRADECIMENTOS

A todas as pessoas e instituições, que de uma forma ou de outra, contribuíram não só para a elaboração da presente dissertação, bem como o sucesso do meu percurso académico, o meu mais sincero agradecimento.

Sem prejuízo, no caso de esquecimento de alguém, queria agradecer em especial a:

À Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra, nomeadamente ao departamento de Engenharia Civil e aos professores que o integram, pela correta e distinta formação académica que me proporcionaram ao longo dos últimos anos, permitindo a minha evolução pessoal e profissional;

Aos meus orientadores, Professor Doutor Alfredo Dias e Eng.º Carlos Martins, pela forte colaboração, disponibilidade e apoio prestados no desenvolvimento da presente dissertação;

Ao SerQ – Centro de Inovação e Competências da Floresta, pela disponibilização das suas instalações e equipamentos para a realização dos ensaios, bem como, a todos os seus colaboradores pela cooperação;

Às empresas, Pedrosa & Irmãos Lda pelo fornecimento da matéria-prima e Dynea AS pelo fornecimento das colas estruturais utilizadas no fabrico dos elementos de madeira lamelada colada;

À minha irmã, pela preocupação e por todo o incentivo e motivação que me deu ao longo dos anos, quer a nível académico quer a nível pessoal;

Aos meus pais, por tudo aquilo que me ensinaram, por todos os valores que me transmitiram e pelo apoio, paciência e motivação que me deram ao longo do meu percurso académico;

A todos os meus amigos e colegas que conheci na Universidade de Coimbra e com quem tive a possibilidade de partilhar o meu percurso académico.

RESUMO

O presente trabalho apresenta uma análise realizada a elementos estruturais de madeira lamelada colada, produzida usando espécies nacionais, a qual tem como objetivo avaliar as suas principais propriedades mecânicas.

Esta análise compreendeu três fases distintas: i) análise das matérias-primas, ii) fabrico de elementos estruturais de madeira lamelada colada, iii) modelação e realização de ensaios estáticos aos elementos estruturais de madeira lamelada colada.

Na primeira fase, relativa à análise das matérias-primas, foi realizada a classificação da amostra com recurso a ensaios não-destrutivos.

Na segunda fase procedeu-se ao fabrico em ambiente laboratorial, de 10 elementos estruturais de madeira lamelada colada, com disposições diversas de módulos de elasticidade de lamelas de modo a configurar uma amostra diversa para comparar com os resultados obtidos pela modelação numérica.

Na terceira fase realizou-se a pesquisa e desenvolvimento de modelos numéricos teóricos que permitissem prever algumas propriedades mecânicas dos elementos de madeira lamelada colada fabricados. Executaram-se ensaios não-destrutivos e destrutivos aos elementos estruturais de madeira lamelada colada fabricados, para determinar algumas das suas propriedades mecânicas. Estes ensaios foram realizados de acordo com os requisitos indicados na norma europeia EN 408 (CEN, 2012).

Posteriormente, analisaram-se os resultados obtidos, nomeadamente através de comparações e correlações entre as diversas propriedades e parâmetros analisados, com vista a avaliar os modelos numéricos utilizados. Os elementos fabricados foram ainda alvo de uma análise da sua qualidade de colagem segundo a norma europeia EN 14080 (CEN, 2013).

PALAVRAS-CHAVE: Madeira lamelada colada; Modelação numérica; Propriedades mecânicas; Ensaio estático; Qualidade de colagem.

ABSTRACT

The present thesis presents an analysis of structural elements of Glued Laminated Timber, produced using national species, which aims to evaluate its main mechanical properties.

This analysis involved three distinct phases: (i) raw material characterization, (ii) Glued Laminated Timber structural elements production, (iii) modelling and realization of static tests on the structural elements of Glued Laminated Timber.

In the first phase, concerning the analysis of raw materials, the sample was classified using non-destructive tests.

In the second phase, 10 structural elements of Glued Laminated Timber were fabricated in laboratory environment, with different modulus of elasticity configurations in order to configure a diverse sample to compare with the results obtained by numerical modelling.

In the third phase, the research and development of theoretical numerical models which allow the prediction of some mechanical properties of the Glued Laminated Timber elements manufactured, were carried out. Non-destructive and destructive tests were performed on the fabricated Glued Laminated Timber structural elements to determine some of their mechanical properties. These tests were performed according to the indications given in the European Standard EN 408 (CEN, 2012).

Subsequently the results obtained were analysed, namely through comparisons and correlations between the different properties and parameters analysed, in order to evaluate the numerical models used. The fabricated Glued Laminated Timber elements were also tested in terms of bonding performance according to the European Standard EN 14080 (CEN, 2013).

KEY-WORDS: Glued Laminated Timber; Numeric modelling; Mechanical properties; Static tests; Bonding quality.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
ÍNDICE.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE QUADROS	ix
SIMBOLOGIA	x
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Conceito e Enquadramento geral.....	1
1.2. Âmbito e objetivos	2
1.3. Organização da dissertação	2
2. ESTRUTURAS DE MLC	4
2.1. Introdução.....	4
2.2. Resenha histórica.....	4
2.3. Vantagens da Madeira Lamelada Colada	7
2.4. Normalização relativa ao fabrico de Madeira Lamelada Colada	9
2.5. Fabrico de Madeira Lamelada Colada.....	10
2.5.1. Introdução	10
2.5.2. Processo de fabrico	10
2.5.3. Controlo da qualidade de fabrico / Certificação	15
2.6. Modelos de cálculo para vigas de MLC	16
3. MODELOS DOS ELEMENTOS A ENSAIAR	22
3.1. Introdução.....	22
3.2. Modelo segundo Timoshenko	23
3.2.1. Introdução	23

3.2.2.	Determinação da Rigidez de Flexão	23
3.2.3.	Módulo de elasticidade da seção.....	26
3.3.	Modelo segundo o Anexo B do Eurocódigo 5	26
3.3.1.	Introdução	26
3.3.2.	Rigidez de Flexão Efetiva.....	26
3.3.3.	Módulo de elasticidade homogeneizado da seção	27
4.	CAMPANHA EXPERIMENTAL	28
4.1.	Objetivos.....	28
4.2.	Materia prima	28
4.2.1.	Descrição da amostra	28
4.2.2.	Classificação não destrutiva da matéria-prima	29
4.2.3.	Colas	31
4.3.	Execução das vigas	31
4.3.1.	Preparação das colagens	31
4.3.2.	Aparelhamento de tábuas e colagem.....	32
4.4.	Ensaio realizados (Procedimentos)	36
4.4.1.	Ensaio estáticos de flexão não-destrutivos.....	36
4.4.2.	Ensaio estáticos de flexão destrutivos	39
4.4.3.	Avaliação da qualidade de colagem.....	40
4.4.3.1.	Ensaio de corte.....	40
4.4.3.2.	Ensaio de delaminação	42
4.5.	Massa volúmica e Teor de água	44
4.6.	Correção das propriedades mecânicas.....	46
5.	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS EXPERIMENTAIS	47
5.1.	Introdução.....	47
5.2.	Ensaio estáticos de flexão não-destrutivos.....	47
5.2.1.	Resultados	47
5.2.2.	Módulos de elasticidade local e global antes e após aparelhar lateralmente	49
5.2.3.	Comparação entre módulos de elasticidade global e local	51
5.2.4.	Comparação entre módulos de elasticidade estáticos e dinâmicos.....	51

5.3.	Ensaio estático de flexão destrutivo.....	53
5.3.1.	Resultados.....	53
5.3.2.	Correlação entre resistências à flexão e módulos de elasticidade.....	55
5.4.	Avaliação da qualidade de colagem	55
5.5.	Comparação entre resultados experimentais e modelos numéricos das propriedades resistentes	58
5.5.1.	Módulos de elasticidade.....	58
5.6.	Utilização de dois tipos de colas	60
5.7.	Comparação de resultados entre vigas constituídas apenas por choupo e viga mista choupo-pinho.....	60
6.	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS.....	62
6.1.	Conclusão	62
6.2.	Trabalhos Futuros	64
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 2

Figura 2.1 – Cobertura do Velódromo nacional de Sangalhos (www.holzbau.rubner.com)	6
Figura 2.2 – Ponte rodoviária, solução mista madeira-betão, Quiaios	6
Figura 2.3 - Ponte pedonal, Góis (goisvive.blogspot.pt).....	6
Figura 2.4 - Vista da cobertura da Altice Arena, anterior pavilhão da Utopia e Meo Arena (http://www.nfeiras.com/meo-arena/)	7
Figura 2.5 – Finger joints/ligações de topo por entalhes múltiplos (https://www.pinterest.pt/writemealya/glulamwood/).....	11
Figura 2.6 - Orientação das lamelas na seção transversal para classes 1 e 2 (esquerda) e para classe 3 (direita) (Gaspar, 2006).....	13
Figura 2.7 – Produção de madeira lamelada colada (adaptado de http://www.glulam.co.uk/about_production.htm)	14
Figura 2.8 – Correlação entre valores previstos e ensaiados de módulo de rotura – $R^2 = 0,6317$	
Figura 2.9 – Correlação entre valores previstos e ensaiados de módulo de elasticidade – $R^2 = 0,82$	17
Figura 2.10 – Correlações entre ensaios estáticos e modelação, à esquerda, e entre ensaios estáticos e registos dinâmicos, à direita.....	19
Figura 2.11 – Correlações obtidas por Fink et al. (2015) entre valores estimados e obtidos de módulos de elasticidade estimados e capacidade de carga.....	20

Capítulo 3

Figura 3.1 – Elemento genérico a modelar.....	22
Figura 3.2 – Seção transversal genérica de uma viga de MLC composta por cinco lamelas...23	
Figura 3.3 – Posição relativa do C.G., eixos x,y e x',y'	24

Capítulo 4

Figura 4.1 – Medição do teor de água com recurso a humidímetro de agulhas	29
Figura 4.2 - Equipamento para classificação não destrutiva	30
Figura 4.3 - Orientação das lamelas em classe de serviço 3.....	33
Figura 4.4 - Viga após colagem com PRF.....	34
Figura 4.5 – Viga sob prensagem, colada com cola do tipo MUF	34
Figura 4.6 – Perfil transversal da viga mista choupo-pinho, viga R6	36
Figura 4.7 – Perfil transversal de uma viga de choupo	36
Figura 4.8 – Esquema de ensaio para o $E_{m,local}$, de acordo com a norma EN 408 (CEN, 2012)	37

Figura 4.9 – Esquema de ensaio para o $E_{m,global}$, de acordo com a norma EN 408 (CEN, 2012)	37
Figura 4.10 - Esquema de colocação dos deflectómetros numa viga – Um lado	38
Figura 4.11 – Esquema de ensaio para f_m , de acordo com a norma EN 408 (CEN, 2012)	39
Figura 4.12 - Dispositivo utilizado nos ensaios de corte	40
Figura 4.13 – Provette de resistência ao corte pela linha de cola de elemento colado com MUF, ao qual foi aplicada solução.....	42
Figura 4.14 – Condução de secagem dos provetes (à esquerda) e autoclave para aplicação de ciclos vácuo/pressão (à direita).....	43
<u>Capítulo 5</u>	
Figura 5.1 – Distribuição por pontos dos módulos de elasticidade dinâmicos médio das lamelas e antes de aparelhar e estáticos globais antes de aparelhar	48
Figura 5.2 – Correlações entre módulos de elasticidades (locais e globais) antes e após aparelhar lateralmente.....	49
Figura 5.3 - Distribuição do módulo de elasticidade estático local ($E_{m,local}$).....	50
Figura 5.4 - Distribuição do módulo de elasticidade estático global ($E_{m,global}$).....	50
Figura 5.5 – Correlações entre E_m dinâmico e E_m estático antes de aparelhar e entre E_m dinâmico e E_m estático após aparelhar, considerando os resultados da viga R8	52
Figura 5.6 – Correlações entre E_m dinâmico e E_m estático antes de aparelhar e entre E_m dinâmico e E_m estático após aparelhar, não considerando os resultados da viga R8.....	52
Figura 5.7 – Correlações entre resistência à flexão e módulos de elasticidade.....	55
Figura 5.8 – Nuvem de resultados individuais obtidos para tensões de corte e percentagens de rotura pela madeira	56
Figura 5.9 – Correlação entre valores de módulos de elasticidade obtidos pelos modelos numéricos e pelos ensaios estáticos.....	59
Figura 5.10 – Gráfico Carga vs. Deslocamento para as vigas R1, R5 e R6	61

ÍNDICE DE QUADROS

Capítulo 2

Quadro 2.1 - Consumo energético de vários materiais (Chrisp et al., 2003, Júnior e Dias, 1997)	8
---	---

Capítulo 4

Quadro 4.1 - Numeração adotada para as vigas realizadas	32
Quadro 4.2 - Critérios de colagem para cada viga	34
Quadro 4.3 – Disposição de módulos de elasticidade dinâmicos e massas volúmicas por viga	35
Quadro 4.4 – Percentagem mínima de rotura pela madeira imposta pela norma EN 14080 (CEN, 2013) para valores médios por provete e por linha de cola.....	42
Quadro 4.5 - Massa volúmica e teor de água	45

Capítulo 5

Quadro 5.1 - Propriedades obtidas experimentalmente, por viga, durante as várias fases de construção e ensaio	48
Quadro 5.2 - Cargas e resistências máximas obtidas para as vigas	53
Quadro 5.3 – Início provável da rotura de cada viga ensaiada.....	54
Quadro 5.4 - Valores médios da tensão de corte pela linha de cola e rotura pela madeira.	56
Quadro 5.5 - Valores da delaminação total e máxima por provete e por ciclo	57
Quadro 5.6 – Comparação entre valores obtidos para os módulos de elasticidade.....	58

SIMBOLOGIA

$(EI)_{ef}$ – rigidez de flexão efetiva

a – distância entre um dos pontos de aplicação da carga e o apoio mais próximo

a_i – distância ao eixo neutro da camada i

A – área do plano submetido ao corte

A_i - Área da secção transversal da lamela i

b - largura da secção transversal

E - módulo de elasticidade

E_{ensaio} – módulo de elasticidade obtido de ensaio

$E_{corrigido}$ – módulo de elasticidade corrigido

E_i - módulo de elasticidade da lamela i

$E_{m,dyn}$ – módulo de elasticidade dinâmico obtido para uma massa volúmica adotada de 410 kg/m³

$E_{m,dyncorrigido}$ – módulo de elasticidade corrigido para a massa volúmica real

$E_{m,global}$ – módulo de elasticidade global

$E_{m,local}$ – módulo de elasticidade local

$E_{m,MTG}$ – módulo de elasticidade obtido pelo MTG

f_m – tensão de rotura à flexão

f_v – tensão de rotura ao corte

F – força máxima registada

F_u – carga última

$F_2 - F_1$ – incremento de carga dado pela linha de regressão com um coeficiente de correlação de 0,99 ou melhor

G – módulo de elasticidade transversal

h – altura da secção transversal

h_i – altura total da(s) camada(s)

I - inércia da secção transversal em relação ao eixo de flexão

I_i - inércia da secção transversal da camada i

I_{xi} - momento de inércia da secção transversal da lamela i em relação ao eixo x

I_{xyi} - produto de inércia da secção transversal da lamela i em relação ao sistema de eixos xy

I_{yi} - momento de inércia da secção transversal da lamela i em relação ao eixo y

J_x - momento de inércia ponderado em relação ao eixo x

J_{xy} - produto de inércia ponderado em relação ao sistema de eixos xy

J_y - momento de inércia ponderado em relação ao eixo y

k – fator de modificação para peças cuja espessura da peça na direção das fibras seja inferior a 50 mm

-
- l - distancia entre apoios de uma viga (comprimento do vão)
 l_1 – comprimento do troço central utilizado para o calculo do módulo de elasticidade local
 $L_{glueline}$ – comprimento de linha de cola
 $L_{max,delam}$ – comprimento máximo de delaminação
 $L_{tot,delam}$ – comprimento total de delaminação de um provete
 $L_{tot,glueline}$ – soma de todos os comprimentos das linhas de cola de ambas as faces de um provete
 m - posição do centro geométrico da secção transversal em relação a um eixo de referência vertical
 m_1 – valor de massa em gramas do provete antes de ser secado
 m_2 – valor da massa em gramas do provete após a secagem
 M – momento actuante segundo o eixo de ação
 n - posição do centro geométrico da secção transversal em relação a um eixo de referência horizontal
 S_i - momento estático da secção transversal da camada i em relação ao eixo neutro
 $S_{x'i}$ - momento estático da secção transversal da lamela i segundo x
 $S_{y'i}$ - momento estático da secção transversal da lamela i segundo y
 T – comprimento do provete na direção das fibras
 w - teor de água
 $w_{proverte}$ – teor de água de um provete
 $w_2 - w_1$ – incremento de deformação correspondente ao incremento de carga considerado
 y - distância do ponto ao eixo neutro
 γ_i – factor de correcção
 θ - ângulo entre o eixo de acção e o eixo neutro
 θ_1 - ângulo que o eixo principal 1 faz com o eixo x
 θ_2 - ângulo que o eixo principal 2 faz com o eixo y
 $\rho_{adotada}$ – massa volúmica adotada
 $\rho_{corrigida}$ – massa volúmica corrigida para as condições de referência
 $\rho_{inicial}$ – massa volúmica inicial
 ρ_{real} – massa volúmica real
 σ - tensão normal
 $\sigma_{,i}$ – tensão normal devido à compressão na camada i
 $\sigma_{m,i}$ – tensão normal devido à flexão na camada i
 $\%delaminação\ total$ – percentagem de delaminação total
 $\%delaminação\ linha$ – percentagem de delaminação por linha de cola

1. INTRODUÇÃO

1.1. Conceito e Enquadramento geral

A Madeira Lamelada Colada (MLC) é constituída por associação longitudinal e transversal de peças de madeira por meio de colagem de lamelas de espessura reduzida, previamente selecionadas e classificadas. As peças de MLC possibilitam assim, a criação de elementos de madeira de uso estrutural, com dimensões e formas diversas, ultrapassando a limitação dimensional da madeira maciça, como: elementos curvos; elementos com variação de seção transversal ao longo do seu eixo; elementos com seções transversais e vãos de elevada dimensão. O produto MLC apresenta-se como uma solução construtiva mais abrangente, podendo ser usada em aplicações outrora apenas viáveis em betão armado ou aço.

Os primeiros passos da MLC remontam ao início do século XX com o registo de uma patente de fabrico na Suíça. O interesse por esta solução construtiva foi crescendo ao longo dos anos, aumentando significativamente, em meados do século XX, devido à segunda-guerra mundial e à necessidade de encontrar alternativas ao aço, utilizado primariamente em armamento, impulsionando o seu estudo e avanço tecnológico. Em Portugal o interesse por estruturas realizadas com recurso a elementos de MLC apenas ganha relevo a partir de meados da década de 1990, chegando a representar cerca de 75% da construção em madeira realizada entre 1995 e 2010 (Negrão, 2011).

A previsão das propriedades mecânicas revela-se fundamental no processo de dimensionamento de elementos de MLC, contudo não é um processo fácil. A forma mais eficaz de determinação das propriedades mecânicas da MLC, consiste no recurso a ensaios destrutivos, contudo este constitui um processo dispendioso quer em termos temporais quer em termos financeiros, e que inviabiliza a utilização dos elementos ensaiados no fim a que se destina. Desta forma é de extrema importância a utilização de metodologias não-destrutivas para estimar as propriedades mecânicas de elementos de MLC, a partir de outras propriedades de mais fácil determinação. A utilização de modelos numéricos, usando as propriedades das lamelas obtidas por ensaios não-destrutivos, pode configurar assim uma ferramenta rápida e eficaz para prever as propriedades mecânicas da MLC.

1.2. Âmbito e objetivos

Pretende-se estudar neste trabalho a utilização de modelos numéricos com vista à previsão das propriedades mecânicas de elementos estruturais de MLC.

Neste sentido, será necessário classificar e caracterizar física e mecanicamente a matéria-prima utilizada, com vista à obtenção dos dados necessários à sua modelação. Serão utilizados para fabricar os elementos de MLC, lamelas de madeira provenientes de espécies nacionais. Após a sua caracterização serão preparados os elementos de MLC a fabricar, organizando a disposição de lamelas. Os elementos de MLC fabricados serão por sua vez sujeitos a ensaios estáticos destrutivos e não destrutivos para determinação de algumas das suas propriedades mecânicas. Proceder-se-á ao desenvolvimento dos modelos numéricos, e à sua validação pela comparação entre os resultados obtidos pelos mesmos e os obtidos anteriormente pelos ensaios estáticos.

Além dos ensaios estáticos, os elementos de MLC serão ainda alvo de verificação da qualidade de colagem segundo requisitos normativos.

1.3. Organização da dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em seis capítulos, excluindo as Referências Bibliográficas. Neste primeiro capítulo apresentam-se as linhas orientadoras e motivadoras do trabalho realizado nesta dissertação. Realiza-se uma introdução ao tema, apresentando-se de seguida o âmbito e objetivos, culminando com a apresentação da estrutura da presente dissertação.

No capítulo 2 apresenta-se a informação bibliográfica relevante recolhida tendo em vista o âmbito do presente trabalho. É feita uma breve descrição do enquadramento histórico da MLC, e das suas vantagens e desvantagens. São apresentados os documentos normativos e processos que regulam o fabrico e a certificação da MLC e são descritos alguns modelos teóricos e experimentais usados por diversos autores com vista a prever algumas propriedades mecânicas de elementos estruturais de MLC.

No capítulo 3 apresentam-se os modelos desenvolvidos para a modelação dos elementos estruturais de MLC a ser avaliados com base em ensaios experimentais. Adotaram-se dois modelos: i) um que tem por base a teoria da viga de Timoshenko (Gere e Timoshenko, 1997) e ii) um segundo o método apresentado no Anexo B do Eurocódigo 5, EN 1995 (CEN, 2004).

No capítulo 4 apresenta-se toda a campanha experimental realizada. Descreve-se a análise feita à matéria-prima, a execução dos elementos de MLC e os procedimentos a obedecer no seu fabrico, bem como os ensaios realizados e devidas correções às propriedades determinadas tendo em conta o teor de água.

No capítulo 5 procede-se à apresentação e análise dos resultados obtidos, nomeadamente em termos de propriedades mecânicas e respetivas correlações entre si. É conduzida também a comparação entre os valores obtidos pelos ensaios estáticos e dos modelos numéricos considerados.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões retiradas desta dissertação e elencados os trabalhos futuros a realizar no seguimento do trabalho apresentado.

2. ESTRUTURAS DE MLC

2.1. Introdução

No presente capítulo procura-se realizar uma compilação de informação referente à MLC. Efetua-se assim, uma revisão bibliográfica sobre a evolução histórica e tecnológica da MLC, bem como do processo de fabrico e regulamentos normativos a que esta está sujeita. A revisão bibliográfica focou-se também em estudos realizados anteriormente sobre modelação de elementos de MLC.

2.2. Resenha histórica

É aceite na generalidade [da comunidade científica] que as estruturas lameladas coladas tiveram o seu início quando Otto Karl Freidrich Hetzer (1846-1911) registou uma patente em 1901 na Suíça, para uma viga recta composta por várias lamelas coladas (Gaspar, 2006). Otto Ketzner teve a ideia de substituir por cola, as ligações metálicas de braçadeiras e parafusos. Com isso, obteve-se uma secção mais homogénea e sem ocorrência de deslizamentos entre lâminas. Daí em diante, a MLC evoluiu em paralelo com o progresso ocorrido com as colas, as quais se foram tornando cada vez mais eficientes (Szücs *et al.*, 2015).

A MLC começou a ser utilizada na Europa, nos inícios do século XX, enquanto que só cerca de trinta anos mais tarde é que começaram a ser fabricadas estruturas nos Estados Unidos da América (EUA) (LNEC, 1987). Segundo Gaspar (2006) o responsável por esta introdução na América foi o arquitecto e engenheiro alemão Max Hanisch. Hanisch que tinha sido anteriormente associado da empresa de Hetzer, onde aprendeu as técnicas da construção da MLC. O mesmo esteve envolvido na construção das primeiras estruturas com MLC implementadas nos EUA.

A corrente utilização de aço na construção de armamento durante a 2ª Guerra Mundial, originou a necessidade de encontrar outras soluções construtivas. As estruturas de MLC ganharam assim relevo por constituírem uma alternativa viável ao aço, não só na construção de edifícios, mas também em barcos e aviões. Esta utilização expressiva e constante aliada à evolução das resinas sintéticas, permitiu desenvolver a indústria e o conhecimento da MLC (Gaspar, 2006; Cachim, 2014).

Com o desenvolvimento e utilização deste tipo de estruturas, o número de fábricas de elementos de MLC aumentou significativamente. Esta evolução levou à criação do *American Institute of Timber Construction*, (AITC) em 1952, cuja intenção foi a junção de esforços para promover e regulamentar o uso de MLC.

Ao longo das décadas seguintes várias instituições foram fundadas com o intuito de promover a utilização de estruturas de MLC na Europa. A título de exemplo, indica-se a criação em França do *Syndicat National des Constructeurs et Fournisseurs de Charpentes en Bois Lamellé Collé* (SNCCBLC) em 1974 e em Inglaterra a *Glued Laminated Timber Association* (GLTA) em 1987 (Lampreia, 2010).

“Tradicionalmente, falar de estruturas de madeira em Portugal, como na maior parte dos países meridionais da Europa, significava tradicionalmente referirmo-nos a coberturas e/ou pavimentos em construção mista madeira-alvenaria de pedra, bloco ou adobe. Estas estruturas entraram em desuso a partir das décadas de 50 e 60 do século XX, com a generalização da construção em betão armado e o aparecimento de pavimentos aligeirados de vigotas pré-esforçadas. Instalou-se mesmo na sociedade e na comunidade técnica a ideia de que a madeira era um material de fraca qualidade, o que levou à sua substituição... Após mais de três décadas neste estado de coisas, a madeira, nomeadamente na forma de madeira lamelada colada, recuperou algum protagonismo e ocupou uma posição relevante em alguns nichos de construção, como pavilhões desportivos, centros comerciais, pontes e passadiços pedonais e outros”. (Negrão, 2011).

Negrão (2011) refere que esta alteração de mentalidades pode estar relacionada com o impacto mediático da construção do Pavilhão da Utopia (actual Altice Arena). A recolha de dados relativos à construção em madeira levada a cabo pelo mesmo autor permite inferir que desde meados de 1990 até 2010, 75% da construção em madeira é relativa a estruturas de MLC. Apresentam-se de seguida alguns exemplos de construções em MLC em Portugal.



Figura 2.1 – Cobertura do Velódromo nacional de Sangalhos (www.holzbau.rubner.com)



Figura 2.2 – Ponte rodoviária, solução mista madeira-betão, Quiaios



Figura 2.3 - Ponte pedonal, Góis (goisvive.blogspot.pt)



Figura 2.4 - Vista da cobertura da Altice Arena, anterior pavilhão da Utopia e Meo Arena (<http://www.nfeiras.com/meo-arena/>)

2.3. Vantagens da Madeira Lamelada Colada

As vantagens que a MLC possui, advêm essencialmente das diferenças quer físicas quer mecânicas, que esta tem quando comparada com a madeira maciça ou com outras soluções construtivas como o betão ou o aço. Desta forma, de seguida são listadas algumas das vantagens e desvantagens da MLC comparativamente à madeira maciça:

Vantagens

- **Fabrico de elementos estruturais de grandes dimensões** podendo essas dimensões variar ao longo do elemento. As dimensões existentes no mercado para elementos de madeira maciça são limitadas naturalmente pelas dimensões das árvores. A MLC consegue ultrapassar esse problema através da colagem de sucessivos elementos de madeira de menores dimensões, obtendo-se assim elementos com seções transversais e comprimentos elevados, sendo tecnicamente viável realizar estruturas de grandes vãos, tendo como exemplo as coberturas do velódromo de Sangalhos (Figura 2.1) e da Altice Arena (Figura 2.4) (Cruz, 2007). A MLC consegue ainda ultrapassar outros requisitos de projeto ao poder ser executada com variação dimensional, alcançando elementos curvos e de secção transversal variável;

- **Redução da presença de defeitos próprios da madeira**, como nós, descaios, empenos, bolsas de resina entre outros, têm menor influência na resistência da MLC comparando com a madeira maciça. A utilização de lamelas de espessura reduzida aliada à

realização de *finger-joints* (Capítulo 2.5.2), permite extrair alguns dos defeitos descritos. Este processo garante uma maior homogeneidade do material ao nível das propriedades mecânicas por todo o volume do elemento de MLC, diminuindo a existência de zonas críticas de confluência de vários defeitos.

- **Maior resistência ao fogo**, pelo fato de as seções transversais serem maiores, comparando com a madeira maciça. A camada carbonizada que vai sendo gerada na superfície de um elemento sujeito à ação do fogo, cria um efeito protetor, retardando assim o avanço da combustão (Gaspar, 2006). A execução de MLC requer o uso de colas, o que poderia ser um fator impulsionador da combustão, contudo, estas não sofrem alterações importantes a temperaturas inferiores à de carbonização da madeira (Cruz, 2007);

Desvantagens

- **Maior consumo de energia** e recurso a equipamentos especializados e dispendiosos para o fabrico de MLC;

- **Custos mais elevados de transporte** e operação para elementos de MLC de grandes dimensões. O tipo de elemento fabricado pode originar a necessidade de utilizar transporte especial, mais oneroso que o transporte normal;

- **A utilização de colas** no fabrico de MLC, aumenta o impacto ambiental do produto (Dias, 2016).

Relativamente a soluções como o betão ou o aço, a MLC possui as seguintes vantagens e desvantagens:

Vantagens

- **Constitui um material mais ecológico**, visto utilizar um produto natural, a madeira, e recorrer a menos energia para obter elementos estruturais acabados comparando com o aço. O Quadro 2.1 apresenta a energia incorporada em alguns materiais de construção;

Quadro 2.1 - Consumo energético de vários materiais (Chrisp *et al.*, 2003, Júnior e Dias, 1997)

Material	Consumo energético (GJ/m ³)
Betão Armado	1,92
Madeira Serrada	2,3
Madeira Lamelada Colada	5,4
Alvenaria	7
Aço	234

- **Apresenta uma relação resistência-peso favorável.** Para resistir às mesmas ações, seções equivalentes contruídas em betão ou aço, possuem sempre maior peso, quando comparadas com as seções de MLC. Assim a utilização de elementos de MLC em estruturas, conduz à redução da massa da estrutura o que por sua vez permite reduzir os custos relacionados com as fundações (Gaspar, 2006);

- **Boa resistência química,** sendo preferível ao aço e ao betão em ambientes corrosivos, desde que corretamente aplicada e protegida (Gaspar, 2006);

- O uso de madeira em elementos estruturais pode conferir um **aspecto arquitetónico mais natural** e agradável às estruturas construídas;

Desvantagens

- **A durabilidade** de elementos de MLC pode ser vista como uma desvantagem. Contudo, existe a possibilidade de recorrer a tratamentos preservadores aplicáveis à madeira antes ou após a colagem (Dias, 2016). Outra das soluções pode ser a aplicação de pinturas ou velaturas nos elementos após a sua colagem.

- **A madeira é um material combustível.**

2.4. Normalização relativa ao fabrico de Madeira Lamelada Colada

Os desenvolvimentos da indústria da MLC, bem como os estudos efetuados sobre este produto construtiva ao longo das últimas décadas, levaram a que hoje seja amplamente conhecida. Assim de forma a poder regular e controlar o fabrico de elementos de MLC foram desenvolvidas normas para este produto. No caso da União Europeia, esta normalização é criada pelo *European Committee for Standardization* (CEN), que tem diversas normas relacionadas com a produção de lamelado colado. Atualmente a produção de lamelado colado rege-se pela Norma Harmonizada EN 14080 (CEN, 2013). Esta norma engloba um conjunto de informação anteriormente dispersa por várias publicações: EN 1194 (CEN, 1999), EN 14080 (CEN, 2005), EN 385 (CEN, 2001), EN 386 (CEN, 2001), EN 387 (CEN, 2001), EN 390 (CEN, 1994), EN 391 (CEN, 2001) e a EN 392 (CEN, 1995).

Além da norma específica para MLC, outras normas serão referidas ao longo da presente dissertação, nomeadamente normas relativas a procedimentos de ensaios que foram levados a cabo no decorrer da campanha experimental (Capítulo 4). A explicação das regras específicas de cada norma, será efetuada ao longo da dissertação, em cada capítulo e subcapítulo em que se verificou o seu uso.

2.5. Fabrico de Madeira Lamelada Colada

2.5.1. Introdução

De forma a constituir uma solução construtiva com as vantagens referidas no subcapítulo 2.3, os elementos de MLC devem ser corretamente fabricados, obedecendo a toda uma panóplia de requisitos normativos, quer referentes a equipamentos utilizados quer referentes às espécies utilizadas, bem como aos procedimentos e demais requisitos de produção e controlo de qualidade. Compreende-se assim a necessidade de recorrer a indústria especializada para o fabrico de MLC. No subcapítulo que se apresenta agora, serão expostas as várias fases do processo de fabrico da MLC desde a obtenção da matéria-prima até ao produto final acabado.

2.5.2. Processo de fabrico

As várias etapas do processo de fabrico da MLC, apresentam-se de seguida por ordem cronológica, encontrando-se ilustradas na Figura 2.7.

1ª Operação – Obtenção da matéria-prima: Para poder começar o processo de fabrico é necessário obter a matéria-prima, ou seja, toros de madeira. A norma EN 14080 (CEN, 2013) regula/controla elementos de MLC que sejam fabricados com uma das 17 espécies apresentadas como aptas para utilização. O mercado apresenta mais do que as 17 espécies, contudo essas necessitam ainda de estudos que comprovem a viabilidade de utilização no fabrico de MLC.

2ª Operação – Serragem dos toros: Após a receção/seleção da matéria-prima, a mesma deve ser serrada, de forma a se obterem tábuas. Nesta fase, poderá proceder-se à rejeição de tábuas se estas apresentarem defeitos considerados condicionantes como a presença excessiva de nós e/ou de descaios exagerados.

3ª Operação – Secagem das tábuas: Depois de efetuada a serragem, as tábuas devem ser armazenadas em local/instalação de secagem com o intuito de se obterem valores de teor de água requeridos para o fabrico. Segundo a norma EN 14080 (CEN, 2013), o teor de água da madeira utilizada no fabrico de MLC deve estar inserido dentro de um intervalo pré-definido. Assim a norma indica que o teor de água para madeira não tratada deverá estar entre 6% e 15% e para madeira tratada entre 11% e 18%. Indica ainda que adicionalmente as recomendações do fabricante da cola a usar devem ser seguidas e que a diferença de teores de água entre duas lamelas a colar não deve ser superior a 5%.

Nesta fase do processo, tendo em conta a classe de risco a que o elemento de MLC estará exposto, pode ser equacionada a aplicação de tratamento preservador, com vista à melhoria da durabilidade da madeira. A madeira deve assim ser armazenada com espaço entre cada tábuas, para que a secagem seja o mais uniforme possível. O fabricante deverá proceder a várias medições de forma a poder garantir o correto teor de água das tábuas antes de estas serem utilizadas. A determinação e controlo do teor de água deve ser efetuado segundo a norma EN 14080 (CEN, 2013), que refere que os métodos de medição utilizados devem conseguir medir o valor do teor de água com uma precisão de mais ou menos 2%. Esta medição pode ser feita por dois métodos normalizados: o método da resistência elétrica segundo a norma EN 13183-2 (CEN, 2002); e o método capacitivo segundo a norma EN 13183-3 (CEN, 2005). Deverá ser sempre que possível feita uma aferição dos valores obtidos pelos dois métodos anteriores, com a realização de medições de massas em estufas, seguindo para isso a norma EN 13183-1 (CEN, 2002).

4ª Operação – Classificação da resistência das tábuas: Após a secagem, a classificação das tábuas relativamente à sua resistência deve ser efetuada. Esta classificação tem de ser não destrutiva, por forma a viabilizar a utilização das tábuas, esta pode ser realizada de forma mecânica ou visual, estando ambos os métodos previstos em regulamentação normativa na EN 14081-1 (CEN, 2005).

5ª Operação – Execução de ligações de topo (*Finger-joints*): Nesta fase são executadas as ligações de topo, procedendo-se à união das tábuas topo-a-topo, até se perfazer o comprimento desejado. As ligações são efetuadas cortando nos topos das tábuas entalhes de formato idêntico ao ilustrado na Figura 2.5 e que devem obedecer aos pressupostos do Anexo I da EN 14080 (CEN, 2013).



Figura 2.5 – Finger joints/ligações de topo por entalhes múltiplos
(<https://www.pinterest.pt/writemealya/glulamwood/>)

Depois de realizar os entalhes, é aplicada cola nos mesmos e colados os topos das tábuas sob pressão. Este subprocedimento deve cumprir o disposto na norma EN 14080 (CEN, 2013).

6ª Operação – Aparelhamento das tábuas: Antes de proceder à colagem das tábuas, estas devem ser aparelhadas. O aparelhamento das tábuas tem como intuito não só a redução da espessura até ao pretendido, mas também a remoção de possíveis contaminantes que possam interferir com a colagem e a regularização de possíveis desigualdades dimensionais que podem ter ocorrido com a variação do teor de água durante o processo de secagem. (Gaspar, 2006, Almeida, 2013).

Relativamente à espessura a adotar para as lamelas, o valor depende da classe de serviço a que o elemento de MLC vai estar sujeito. Estas classes de serviço estão previstas no Eurocódigo 5 (CEN, 2004) e são divididas em três classes.

O intervalo de espessuras recomendado pela norma EN 14080 (CEN, 2013) para estruturas afetadas à classe de serviço 1 e 2 é entre 6 e 45 mm e para estruturas afetadas à classe de serviço 3 é entre 6 e 35 mm.

A norma EN 14080 (CEN, 2013), prevê um intervalo de tempo máximo de 6h, que decorre desde o aparelhamento das tábuas até à colagem, que depende do tipo de madeira em uso. Em termos práticos, o ideal é realizar o aparelhamento das tábuas imediatamente antes da colagem (Lampreia, 2010).

7ª Operação – Colagem e união das lamelas: Esta fase do processo divide-se em duas fases, a primeira consiste na aplicação de cola nas faces das lamelas e a segunda na montagem/asmblagem do elemento de MLC, sobrepondo as lamelas com a orientação correta e na posição definitiva, prontas a serem sujeitas à aplicação da pressão de aperto.

O tipo de cola a aplicar, assim como a espessura é dependente do tipo de classe de serviço definido para o elemento de MLC que se pretende fabricar. Desta forma a norma EN 14080 (CEN, 2013) define dois tipos de colas a utilizar, i) o tipo I que define as colas possíveis de utilizar para realizar elementos sujeitos a classes de serviço 1, 2 e 3, ii) e o tipo II que define as colas possíveis de utilizar para realizar apenas elementos sujeitos a classe de serviço 1.

Tendo em conta o tipo de cola adotado, o fabricante da mesma deverá indicar os tempos de aberto (tempo que decorre entre a aplicação da cola na lamela e a assemblagem com a lamela adjacente) e fechado (tempo que decorre entre a conclusão da assemblagem e a aplicação da

pressão de aperto), a quantidade mínima de cola a aplicar, o tempo de pressão e a pressão de aperto ideal (Dias, 2016).

Na assemblagem das lamelas é necessário ter em atenção a orientação dos anéis de crescimento e cumprir o disposto na norma EN 14080 (CEN, 2013). A norma preconiza orientações diferentes consoante a classe de serviço seja a 3 ou as classes de serviço 1 e 2. O posicionamento recomendado para as classes de serviço 1 e 2 é tal que a medula se encontre direcionada para o mesmo lado em todas as lamelas, para que na existência de empenos estes aconteçam com a mesma concavidade em todas as lamelas, minimizando as tensões nas linhas de cola. No caso de a classe de serviço ser a 3 as lamelas externas devem ser orientadas com a medula para o exterior do elemento, visto o lado da medula sofrer menor retração comparando com o lado oposto, sendo assim menor a propensão da face exposta para fender. (Lampreia, 2010). A Figura 2.6 ilustra as duas orientações possíveis.

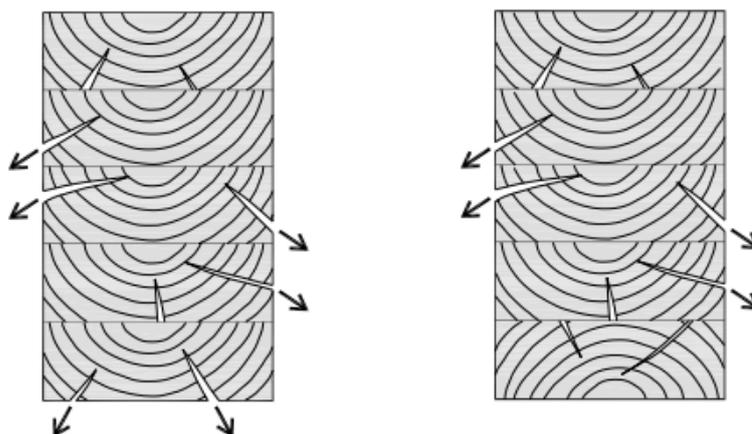


Figura 2.6 - Orientação das lamelas na seção transversal para classes 1 e 2 (esquerda) e para classe 3 (direita) (Gaspar, 2006)

8ª Operação – Aplicação da pressão de aperto: Aplica-se nesta fase a pressão nas lamelas durante um intervalo de tempo para que a colagem seja bem executada. Não obstante à informação prestada pelo fabricante relativamente aos tempos de pressão e à pressão de aperto, a norma EN 14080 (CEN, 2013) recomenda pressões de aperto entre 0,6 MPa e 0,8 MPa para lamelas com espessura inferior a 35 mm, 0,8 MPa e 1,0 MPa para lamelas com e sem ranhuras respetivamente de espessura entre 35 mm e 45 mm, e entre 0,8 MPa e 1,0 MPa para lamelas com espessura entre 45 mm e 85 mm.

9ª Operação – Aparelhamento e acabamento: Após aplicação da pressão de aperto, os elementos devem repousar, por um determinado tempo, designado de tempo de cura antes de efetuar o

aparelhamento das faces e de possíveis aplicações de tratamentos preservadores. Depois de aplicar a pressão, a cola tem resistência para poder permitir posteriores operações de fabrico, contudo a resistência à água apenas será atingida ao fim de alguns dias, pelo que durante este período, os elementos não deverão sofrer ações que possam enfraquecer as linhas de cola. (Gaspar, 2006). O tempo de cura depende do tipo de cola e espécie de madeira utilizados no fabrico do elemento. Posteriormente procede-se ao aparelhamento até se obterem as dimensões finais pretendidas. O tratamento preservador pode, se requerido, ser aplicado nesta fase, devendo-se ter cuidado de forma a efetuar uma correta secagem do elemento após o tratamento preservador.

10ª Operação – Embalagem e expedição: Nesta etapa, deve-se proteger o elemento contra as ações ambientais, nomeadamente contra humidades, envolvendo-o num involucro/embalagem que permita o transporte nas condições requeridas.

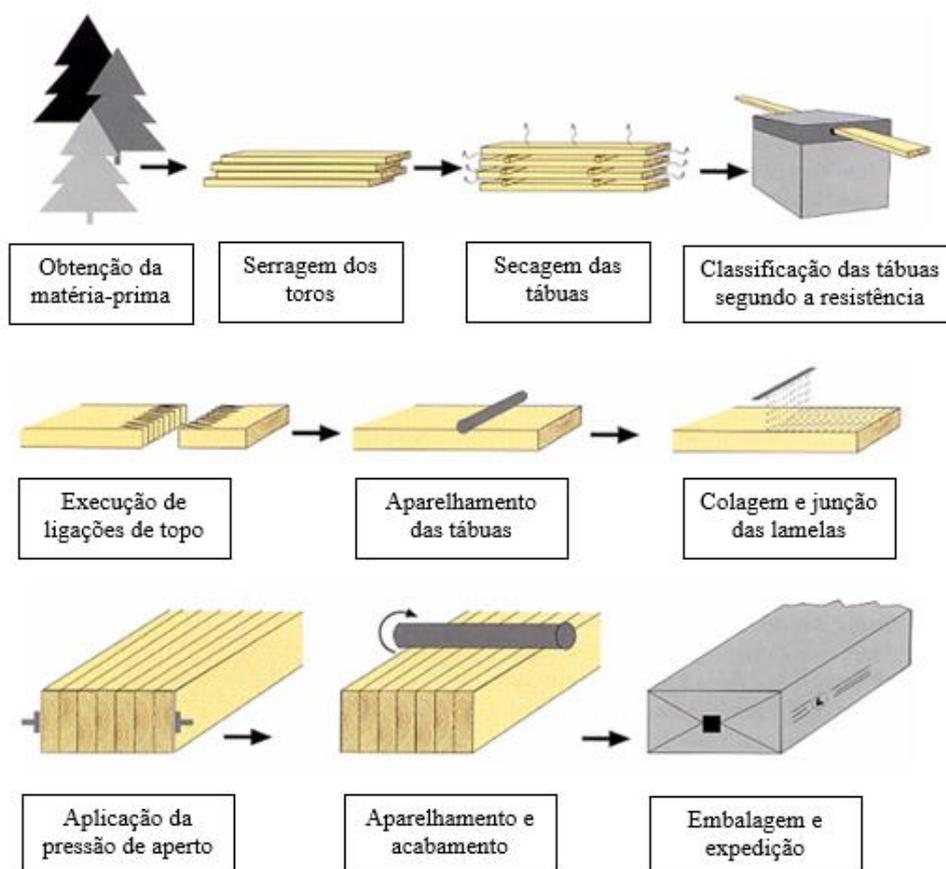


Figura 2.7 – Produção de madeira lamelada colada (adaptado de http://www.glulam.co.uk/about_production.htm)

2.5.3. Controlo da qualidade de fabrico / Certificação

O controlo de qualidade é um fator muito importante no fabrico de MLC. Esta verificação deve ser dividida em duas partes, numa parte interna imputada ao fabricante e numa parte externa, que deverá ser feita por uma entidade independente certificada para o efeito, de forma a verificar o cumprimento dos requisitos normativos. O controlo de qualidade interno é assim composto por ensaios de flexão e tração às juntas de topo (*Finger-joints*), para verificar o seu comportamento, ensaios de delaminação e corte para avaliar a qualidade e integridade das linhas de cola, bem como, a monitorização de parâmetros de fabrico como: a temperatura e humidade relativa do ar; limpeza e afinação de máquinas; calibração de equipamentos de medida; teor de água; dimensões, qualidade, resistência e orientação das lamelas; mistura, qualidade e quantidade de cola; tempos, temperatura e pressão de colagem (Cruz, 2007). O controlo externo consiste na realização de auditorias por entidades independentes certificadas para o efeito aos procedimentos e controlos adotados pelo fabricante.

Seguidamente, descrevem-se de forma sucinta os ensaios referentes à avaliação da qualidade das linhas cola. Relativamente aos ensaios de flexão e tração às juntas de topo, o seu procedimento não será aqui descrito, visto que o presente trabalho não contemplou o recurso a este tipo de ligações, contudo apenas referir que estes ensaios se encontram estipulados na norma EN 14080 (CEN, 2013).

Ensaio de delaminação: Segundo Gaspar (2006), os ensaios de delaminação consistem em criar um gradiente de teor de água na madeira, com o intuito de gerar tensões internas perpendiculares à linha de cola, provocando eventuais roturas na linha de cola. O procedimento a adotar e os requisitos a cumprir na execução dos ensaios de delaminação estão apresentados no Anexo C da norma EN 14080 (CEN, 2013). É necessário a recolha de provetes dos elementos fabricados, que serão ensaiados segundo um de três métodos existentes na norma, método A, B e C. No caso de estruturas sujeitas a classe de serviço 3, deverá aplicar-se o método A ou B. O conceito dos três métodos assenta na realização de ciclos de vácuo e pressão com os provetes imersos em água e secagem dos mesmos em conduta com ar circulante (temperatura e humidades controladas), seguindo-se o registo das delaminações ocorridas no fim de cada ciclo. A conclusão do ensaio acontece com a aferição do cumprimento ou não dos limites máximos normalizados.

Ensaio de corte: Os ensaios de corte consistem na aplicação de tensões de corte nas linhas de cola, na direção paralela à direção das fibras, com a finalidade de provocar a rotura da ligação colada existente (Dias, 2016). O procedimento a adotar e os requisitos a cumprir na execução dos ensaios de corte estão apresentados no subcapítulo 4.4.3 e também no anexo D da norma

EN 14080 (CEN, 2013). Assim como no ensaio de delaminação é necessária a recolha/obtenção de provetes com dimensões normalizadas. Para cada plano de colagem deve ser registada a carga de rotura e a percentagem de rotura pela madeira. A conclusão do ensaio acontece com a verificação do cumprimento ou não dos limites normalizados.

Em anexo na norma EN 14080 (CEN, 2013), encontra-se definido o sistema de comprovação de conformidade aplicável a elementos de MLC, que pressupõe a atuação permanente de uma entidade independente (organismo notificado), garantindo a existência de um controlo de qualidade fabril adequado. A certificação com marcação CE, constitui o nível mais elevado de garantia de qualidade e consistência do produto. Esta marcação acarreta benefícios para o mercado, facilita a identificação do produto e garante o fornecimento de produtos submetidos a um controlo de qualidade minucioso (Cruz, 2007).

2.6. Modelos de cálculo para vigas de MLC

Ao longo dos tempos, a MLC foi alvo de diversos estudos sobre o seu comportamento, quer mecânico quer físico, permitindo hoje em dia a existência de normas específicas relativas ao seu fabrico e dimensionamento. Várias técnicas e métodos têm sido utilizados para prever com maior ou menor precisão as propriedades mecânicas de elementos estruturais de MLC.

Lee *et al.* (2005) estabeleceram em estudo, um modelo de previsão das propriedades de MLC em flexão, considerando como principais variáveis as distribuições de nós otimizadas e os módulos de elasticidade de cada lamela.

O estudo englobou um total de 60 vigas realizadas em 10 combinações de disposições de lamelas, cujo módulo de elasticidade individual foi determinado. As vigas foram realizadas em Larício Japonês, *Larix kaempferi*, produzido na Coreia do Sul, constituídas por associação de seis lamelas. A dimensão final das vigas fabricadas foi aproximadamente de 200 x 140 x 3600 [mm].

Os autores realizaram a classificação não-destrutiva das lamelas a utilizar no fabrico das vigas, com recurso a um equipamento denominado MSR – Machine Strength Rating, com capacidade de aplicar forças e medir deslocamentos, para gerar resultados. Efetuaram uma investigação relativa aos nós presentes na matéria-prima, registando a sua localização e dimensões, chegando a dividir em três classes as lamelas dependendo da maior ou menor presença de nós.

Após o fabrico das vigas, realizaram ensaios estáticos regulados pela norma ASTM D 198, ensaios de flexão de quatro pontos semelhante ao preconizado pela norma EN 408 (CEN, 2012).

A partir destes determinaram-se as propriedades mecânicas, com intuito de comparar com os resultados obtidos pela modelação.

O método de previsão considerado baseou-se então no *input* dos módulos de elasticidade das lamelas determinados não-destrutivamente e na otimização de nós. Para poder trabalhar os dados relativos aos nós de forma a prever as propriedades mecânicas da MLC, os autores identificaram as distribuições otimizadas a partir de testes estatísticos Kolmogorov-Smirnov utilizando várias distribuições estatísticas. Os valores previstos para o módulo de elasticidade e módulo de rotura, foram obtidos por um programa computacional desenvolvido com base no método da seção transformada, apresentado na ASTM D 3737 (Anexo A4). Nas imagens seguintes apresentam-se duas correlações que os autores efetuaram entre os valores obtidos pela modelação e valores obtidos pelos ensaios estáticos, relativamente aos módulos de rotura (Figura 2.8) e aos módulos de elasticidade (Figura 2.9).

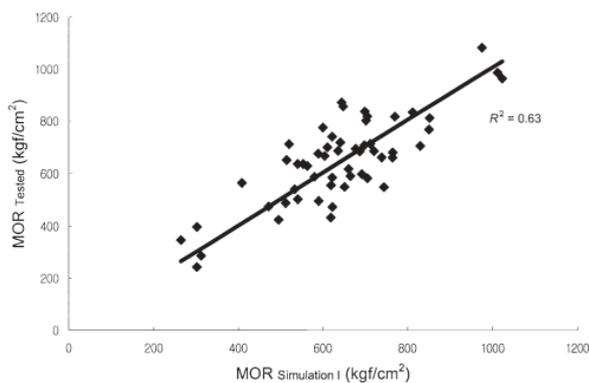


Figura 2.8 – Correlação entre valores previstos e ensaiados de módulo de rotura – $R^2 = 0,63$

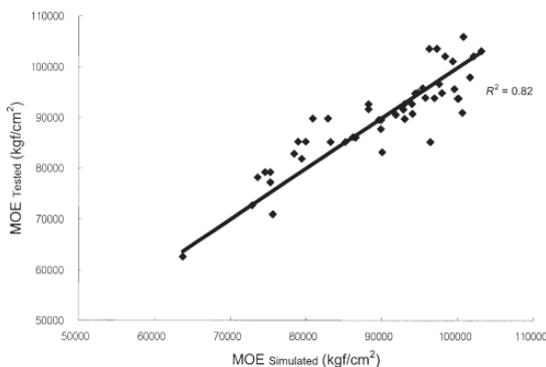


Figura 2.9 – Correlação entre valores previstos e ensaiados de módulo de elasticidade – $R^2 = 0,82$

Após a comparação dos resultados, as conclusões a que chegaram foram as seguintes:

- As distribuições otimizadas para o número de nós e módulos de elasticidade para cada lamela foram determinadas como distribuições normais, enquanto que para o tamanho de nós determinou-se a distribuição Log-normal;
- A comparação entre o módulo de rotura das vigas de MLC previsto e testado, indicou que o módulo de rotura por lamela, uma das variáveis de entrada no modelo, que foi obtido a partir da relação de regressão entre o módulo de elasticidade e o módulo de rotura de pequenos provetes limpos de nós, produziu resultados razoáveis;
- O modelo de previsão desenvolvido neste estudo mostrou muito bom acordo com os resultados do teste em módulos de rotura e módulos de elasticidade;

Kandler *et al.* (2015) preconizaram em estudo a previsão da rigidez efetiva de vigas de MLC com base na distribuição de rigidez das lamelas individuais. Investigaram também a influência da variabilidade da rigidez longitudinal de cada lamela na rigidez efetiva da MLC.

Numa primeira fase foram, observadas 350 lamelas de Espruce-da-Noruega, *Picea Abies*, e determinado por um equipamento ótico (laser scanner) a orientação das fibras de madeira ao longo das superfícies das lamelas. Em combinação com a informação obtida relativa à orientação das fibras, foi utilizado um modelo micromecânico adaptado para madeira, com o intuito de gerar os perfis de rigidez ao longo de cada lamela.

Registando a orientação e localização das lamelas dentro de cada viga de MLC, 50 vigas de MLC foram fabricadas, compostas por 4, 7 e 10 lamelas. Foram obtidos os módulos de elasticidade dinâmicos por excitação axial de cada viga e ensaiadas segundo o ensaio de flexão de quatro pontos, de forma a determinar os módulos de elasticidade estáticos.

Conhecendo os perfis de rigidez de cada lamela e a sua localização em cada viga, foram realizadas modelações em elementos finitos, representando as vigas de MLC fabricadas. Tendo em conta os resultados conseguidos, os autores obtiveram algumas correlações, onde comparam resultados obtidos estaticamente com os resultados dos ensaios dinâmicos e pela modelação em elementos finitos. Duas dessas correlações apresentam-se na Figura 2.10, onde se pode verificar que os resultados obtidos pelo estudo apresentam correlações elevadas na ordem de 0,94 (coeficiente de correlação R).

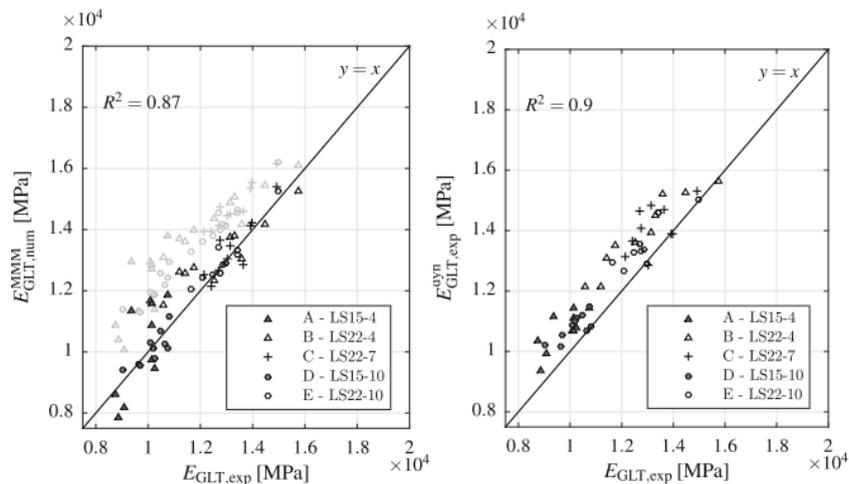


Figura 2.10 – Correlações entre ensaios estáticos e modelação, à esquerda, e entre ensaios estáticos e registos dinâmicos, à direita.

Após a análise dos resultados, as conclusões a que chegaram foram as seguintes:

- A variação de rigidez diminui com o aumento do número de lamelas, revelando o efeito de laminação;
- Os registos dinâmicos sobrestimaram a rigidez em cerca de 7%;
- Usando os registos dinâmicos como *input* na modelação em elementos finitos, a rigidez dinâmica das vigas fabricadas foi bem reproduzida pela modelação conseguindo uma correlação de coeficiente de correlação R de aproximadamente 0,94, demonstrando que a modelação em elementos finitos consegue ter em conta de forma correta as flutuações de rigidez devidas a nós;
- Tendo em conta o modelo micromecânico para a determinação dos perfis de rigidez de cada lamela, a modelação em elementos finitos conseguiu prever a rigidez obtida pelos ensaios estáticos efetuados a cada viga com um coeficiente de correlação R de 0,93. Este resultado, comprova a possibilidade de determinar a rigidez de MLC utilizando a informação obtida para cada lamela via laser scanning, combinada com um modelo micromecânico, que apenas necessita da introdução de parâmetros específicos da espécie utilizada, densidade e teor de humidade.

Fink *et al.* (2015) desenvolveram um modelo probabilístico com vista à reprodução das propriedades da MLC considerando as características naturais do crescimento da madeira. A estrutura do modelo utilizado compreende as seguintes fases: simulação de lamelas de madeira, fabrico de vigas de MLC, cálculo das propriedades dos materiais e modelação numérica para previsão da capacidade de carga.

Foram fabricadas virtualmente 24 vigas de MLC, utilizando lamelas simuladas também virtualmente, modeladas utilizando um modelo probabilístico anteriormente desenvolvido pelos autores. A estimativa das propriedades resistentes da MLC, resistência à flexão, módulo de elasticidade, e do tipo de rotura é assim realizada recorrendo a um modelo numérico baseado nas deformações das vigas, englobando o modelo probabilístico considerado, as propriedades dos materiais em considerados e a disposição adotada de lamelas para as vigas fabricadas virtualmente.

A validação do modelo numérico foi realizada pelo fabrico e ensaio de 24 vigas de MLC compostas por lamelas de Espruce-da-Noruega, *Picea Abies*, classificadas não destrutivamente por equipamento denominado GoldenEye-706. A Figura 2.11 apresenta as correlações obtidas entre valores estimados e obtidos de módulos de elasticidade e capacidade de carga.

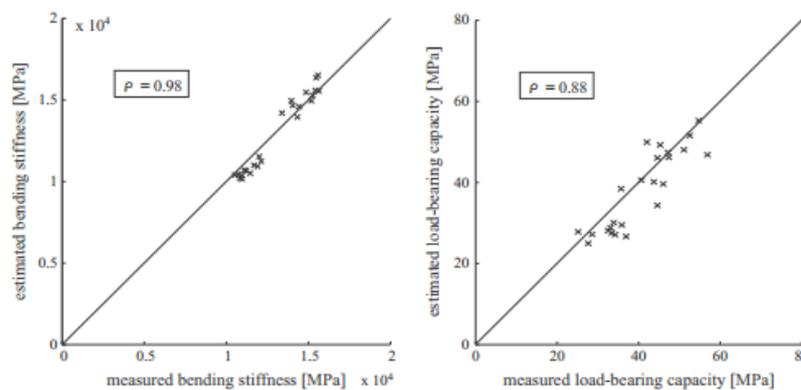


Figura 2.11 – Correlações obtidas por Fink et al. (2015) entre valores estimados e obtidos de módulos de elasticidade estimados e capacidade de carga.

Após a análise dos resultados, as conclusões a que chegaram foram as seguintes:

- Observou-se uma boa correlação entre valores estimados e medidos para as propriedades do material. Como resultado, parece provável que seja possível com alguma precisão estimar as propriedades módulos de elasticidade e capacidade de carga de vigas de MLC, efetuando uma boa caracterização da matéria-prima utilizada. Contudo em estudos seguintes, o modelo deve ser analisado em espécimes maiores.
- Os resultados deste estudo, comprovam a capacidade de conseguir prever com segurança a resistência à flexão da MLC, baseando-se nas propriedades do material utilizado, e pode ser usado no futuro como base para uma representação mais simplificada e compreensível da resistência à flexão de valores tabelados.

Verificou-se a existência de alguns modelos, com menor ou maior complexidade e com diferentes graus de precisão, com vista a modelar o comportamento de MLC. Ainda assim, não foi encontrado nenhum estudo em que tenha sido usada a teoria da viga de Timoshenko ou seguida a formulação realizada pelo Anexo B da norma EN 1995 (CEN, 2004). Sendo a teoria da viga de Timoshenko utilizada comumente para avaliar vigas compostas por mais que um material, considerando o efeito do esforço transversal, deve-se analisar a sua adaptabilidade a vigas de MLC. Tendo em conta a idêntica fundamentação teórica dos dois métodos, segundo Timoshenko e segundo o Anexo B, que se pretendem utilizar, são esperados resultados semelhantes entre os mesmos, contudo interessa analisar ambos.

3. MODELOS DOS ELEMENTOS A ENSAIAR

3.1. Introdução

Com maior frequência desde os finais do século XX até ao presente, realizaram-se alguns estudos adotando diferentes abordagens, com o intuito de modelar o comportamento e propriedades resistentes da MLC.

Na grande maioria dos estudos realizados sobre MLC, inclusive o presente, o principal objetivo em termos de engenharia é obter a melhor relação possível entre precisão de resultados e simplicidade de cálculo. A obtenção deste tipo de relações, facilita o uso e dimensionamento de elementos de MLC, permitindo otimizar a madeira à disposição no fabrico de MLC.

Os elementos a modelar consistem em vigas de MLC, compostas por 5 camadas (lamelas) de espessura aproximadamente igual, mas com módulos de elasticidade diferentes. Considera-se os elementos simplesmente apoiados e sujeitos a um carregamento duplo pontual, de forma a replicar o carregamento a que os elementos fabricados estarão sujeitos quando ensaiados, segundo a norma EN 408 (CEN, 2012). A figura seguinte ilustra um elemento genérico a modelar.

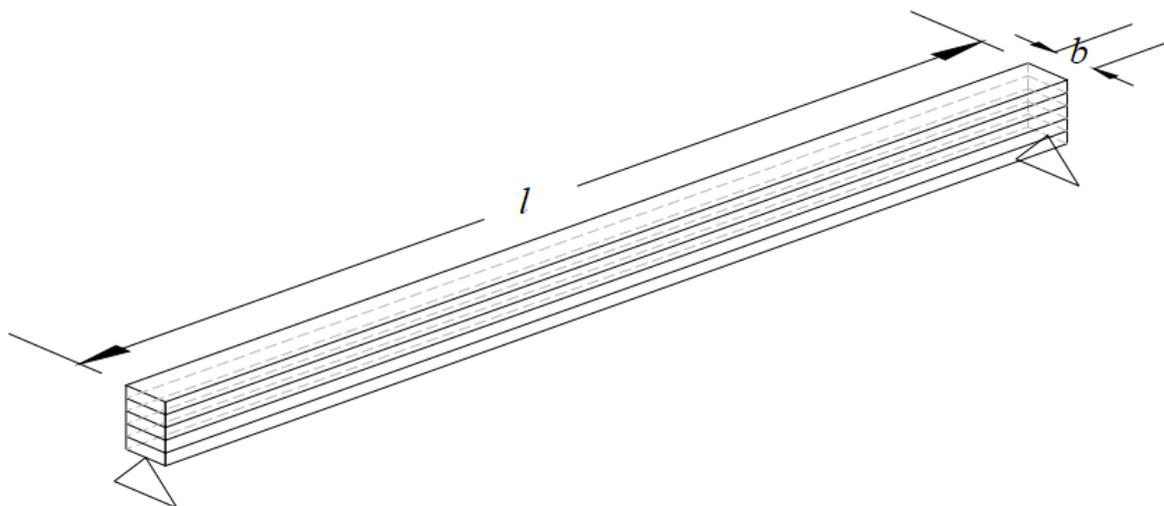


Figura 3.1 – Elemento genérico a modelar

O primeiro modelo considerado, baseia-se na viga de Timoshenko e o segundo no método apresentado no Anexo B da norma EN 1995 (CEN, 2004).

3.2. Modelo segundo Timoshenko

3.2.1. Introdução

A Teoria da Timoshenko, realizando uma análise elástica linear, pressupõe que as seções transversais dos elementos considerados se mantêm planas, ainda que não necessariamente normais ao eixo após a deformação, considerando as deformações por corte.

3.2.2. Determinação da Rigidez de Flexão

Segundo Dias da Silva (2013), em peças mistas, constituídas por mais do que um material, a compatibilização das deformações no plano da seção transversal deve ser efetuada. Não efetuando a compatibilização, será introduzido no cálculo das tensões um erro. Erro este que, se considera relativamente pequeno desde que os coeficientes de Poisson dos materiais não sejam substancialmente diferentes. No presente caso, este pressuposto pode ser adotado, pois os elementos a modelar são compostos por várias lamelas de madeira, que possuem valores diferentes de propriedades mecânicas, contudo os coeficientes de Poisson admitem-se como iguais/idênticos.

Desta forma considera-se uma seção transversal genérica, constituída por 5 lamelas, na qual está a atuar um momento fletor perpendicularmente a um eixo de ação (e.a.) e um sistema de eixos auxiliares $x'y'$, ilustrados na Figura 3.2.

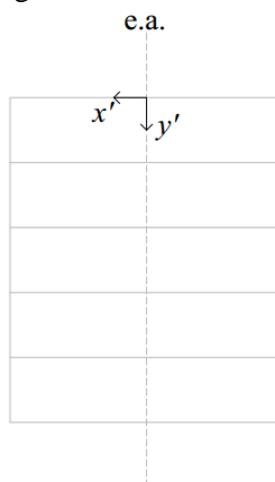


Figura 3.2 – Seção transversal genérica de uma viga de MLC composta por cinco lamelas

Sendo o elemento viga composto por diferentes lamelas, com propriedades físicas e mecânicas diferentes, é necessário determinar a posição do centro de gravidade da seção, denominado C.G., ponderando os momentos estáticos de cada lamela com os seus respetivos módulos de elasticidade.

Tendo em conta a posição dos eixos auxiliares $x'y'$ a meio da largura na superfície superior da seção e considerando a simetria da seção em relação ao eixo de ação (y'), conclui-se que no cálculo da posição do C.G., a abcissa terá valor igual a zero, sendo apenas necessário determinar o valor da ordenada. A posição do C.G. é calculada segundo as duas equações seguintes:

$$n = \frac{\sum_{i=1}^n S_{x'i} E_i}{\sum_{i=1}^n A_i E_i} \quad (1)$$

$$m = \frac{\sum_{i=1}^n S_{y'i} E_i}{\sum_{i=1}^n A_i E_i} \quad (2)$$

Em que:

E_i – representa o módulo de elasticidade da lamela i

A_i – representa a área da seção transversal da lamela i

$S_{x'i}$ – representa o momento estático da seção transversal da lamela i segundo x

$S_{y'i}$ – representa o momento estático da seção transversal da lamela i segundo y

Após a determinação da posição do C.G. a partir das coordenadas m,n , é criado um novo par de eixos (xy) com origem no C.G, ilustrado na Figura 3.3.

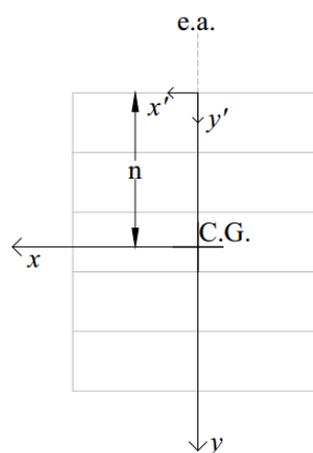


Figura 3.3 – Posição relativa do C.G., eixos x,y e x',y'

A determinação da posição dos eixos x,y , permite calcular os momentos e produto de inércia ponderados da seção em relação ao centro de gravidade. As equações que permitem obter os momentos e produto de inércia são:

$$J_x = \sum_{i=1}^n E_i \int_{A_i} y^2 dA_i = \sum_{i=1}^n E_i I_{xi} \quad (3)$$

$$J_y = \sum_{i=1}^n E_i \int_{A_i} x^2 dA_i = \sum_{i=1}^n E_i I_{yi} \quad (4)$$

$$J_{xy} = \sum_{i=1}^n E_i \int_{A_i} xy dA_i = \sum_{i=1}^n E_i I_{xyi} \quad (5)$$

Em que:

J_x – representa o momento de inércia ponderado em relação ao eixo x

J_y – representa o momento de inércia ponderado em relação ao eixo y

J_{xy} – representa o produto de inércia ponderado em relação aos eixos x,y

I_{xi} – representa o momento de inércia da seção transversal da lamela i em relação ao eixo x

I_{yi} – representa o momento de inércia da seção transversal da lamela i em relação ao eixo y

I_{xyi} – produto de inércia da seção transversal da lamela i em relação aos eixos x,y

Depois de obter a posição dos eixos x,y , podemos determinar a posição relativa dos eixos principais de inércia em relação aos primeiros. Para isso, é necessário calcular o ângulo θ através da equação seguinte:

$$\tan(2\theta) = -\frac{2J_{xy}}{J_x - J_y} \Leftrightarrow \begin{cases} \theta_1 = \frac{\tan^{-1}\left(-\frac{2 \times J_{xy}}{J_x - J_y}\right)}{2} \\ \theta_2 = \theta_1 + 90^\circ \end{cases} \quad (6)$$

Em que:

θ_1 – representa o ângulo que o eixo principal 1 faz com o eixo x

θ_2 – representa o ângulo que o eixo principal 2 faz com o eixo x

Tendo em conta que a seção genérica adotada possui simetria em relação ao eixo vertical y que passa no centro geométrico, o produto de inércia da seção transversal será zero. Assim θ_1 vem igual a zero e θ_2 igual a 90° . Dos valores obtidos, podemos concluir que os eixos principais de inércia são coincidentes com o par de eixos x,y determinados anteriormente.

Sendo os eixos coincidentes, os momentos principais de inércia ponderados são obtidos da mesma forma que os momentos de inércia relativos aos eixos x e y , pelas equações 3 e 4.

3.2.3. Módulo de elasticidade da seção

Utilizando a rigidez de flexão da seção considerada, podemos obter o módulo de elasticidade homogeneizado equivalente da seção. Este valor é dado pela aplicação da equação seguinte:

$$E = \frac{J_x}{\sum_{i=1}^n I_{xi}} \quad (7)$$

3.3. Modelo segundo o Anexo B do Eurocódigo 5

3.3.1. Introdução

O método apresentado no Anexo B no EC5, propõe uma forma de análise de uma viga laminada, baseando-se para isso na teoria elástica linear e considerando um fator de correção para a determinação da rigidez à flexão. Este método é válido para as seguintes condições:

- Vigas simplesmente apoiadas, contínuas ou em consola;
- Os elementos individuais de madeira têm todos o comprimento total da viga ou então são colados topo a topo para perfazer o comprimento total;
- O carregamento atua segundo a vertical resultando num momento de variação sinusoidal ou parabólica e num esforço transversal.

3.3.2. Rigidez de Flexão Efetiva

Considerando uma seção genérica composta por n camadas, semelhante à ilustrada na Figura 3.2, a rigidez de flexão efetiva é obtida por:

$$(EI)_{ef} = \sum_{i=1}^n (E_i I_i + \gamma_i E_i A_i a_i^2) \quad (8)$$

Em que:

A_i – representa a área da seção transversal da camada i

I_i – representa a inércia da camada i

a_i – representa a distância do centro de gravidade da camada i ao eixo neutro

Sendo o parâmetro γ_i dado por:

$$\gamma_i = \left[1 + \frac{\pi^2 E_i A_i S_i}{(K_i l^2)} \right]^{-1} \quad (9)$$

Em que:

l – representa o comprimento efetivo, sendo para vigas simplesmente apoiadas $l = l$

O cálculo da distância entre o centro geométrico da camada central e o eixo neutro é dado por:

$$a_i = \frac{\sum \gamma_i E_i S_i}{\sum \gamma_i E_i A_i} \quad (10)$$

Em que:

S_i – representa o momento estático da camada i em relação ao eixo neutro

Tendo em conta que as ligações entre camadas a considerar para o modelo numérico são coladas, não existindo ligadores metálicos, o parâmetro γ_i toma o valor 1 para todas as camadas. Assim, podemos verificar que no cálculo da distância entre o centro geométrico da camada central e o eixo neutro, o mesmo parâmetro não influencia o resultado.

3.3.3. Módulo de elasticidade homogeneizado da seção

Utilizando a rigidez de flexão da seção considerada, podemos obter o módulo de elasticidade homogeneizado equivalente da seção. Este valor é dado pela aplicação da equação seguinte:

$$E = \frac{(EI)_{ef}}{\sum_{i=1}^n I_{xi}} \quad (11)$$

4. CAMPANHA EXPERIMENTAL

4.1. Objetivos

O objetivo do presente trabalho experimental consistiu na execução de vigas de MLC de dimensão considerada estrutural, sujeitando-as a ensaios estáticos de flexão, de forma a ser possível realizar a comparação entre os resultados obtidos experimentalmente e os obtidos pelos modelos numéricos que pretendem determinar as propriedades mecânicas à flexão da MLC.

Foi alvo de análise uma amostra de madeira serrada de 92 tábuas, que foram sujeitas a medições às várias dimensões, bem como, à execução de classificações não destrutivas. Fabricaram-se 10 vigas, compostas por 5 lamelas, que foram classificadas novamente quer por via não destrutiva, quer mecanicamente segundo a norma EN 408 (CEN, 2012), a fim de se obter o módulo de elasticidade estático e a resistência à flexão.

Posteriormente, foram recolhidos provetes das vigas em estudo para aferir a massa volúmica, teor de água e também para realizar ensaios de delaminação e resistência ao corte das linhas de cola segundo a norma EN 14080 (CEN, 2013), avaliando a qualidade de colagem.

Todos os trabalhos experimentais foram realizados no laboratório do SerQ – Centro de Inovação e Competências da Floresta, utilizando para tal os equipamentos à disposição no mesmo laboratório.

4.2. Materia prima

4.2.1. Descrição da amostra

Na realização do trabalho experimental foi utilizada madeira serrada da espécie Choupo-negro (*Populus-nigra*) e Pinheiro Bravo (*Pinus Pinaster Ait.*). As tábuas disponíveis de ambas as espécies foram acondicionadas em ambiente climatizado a $20\pm 2^\circ\text{C}$ de Temperatura e $65\pm 5\%$ de Humidade Relativa.

No total, foram selecionadas 92 tábuas, tendo o critério da escolha incidido sobre as tábuas que apresentavam menos defeitos, como: nós, descaios e empenos. De forma a determinar o valor da massa volúmica de cada tábua, procedeu-se à medição das dimensões, seção transversal e

comprimento, e à sua pesagem. Cada tábua foi medida em 3 secções (em ambos os topos e a meio vão), tendo-se considerado para os cálculos, a média das três medições. As tábuas selecionadas apresentavam dimensões médias de 39x116x2587 [mm], espessura, largura e comprimento, respectivamente.

Após a medição das dimensões, foi medido o teor de água de cada tábua, recorrendo a um humidímetro de agulhas (Figura 4.1). Este procedimento foi realizado segundo a norma EN 13183-2 (CEN, 2002), tendo-se executado três medições do teor de água em cada tábua, uma a 0,60m de cada topo e uma a meio vão.



Figura 4.1 – Medição do teor de água com recurso a humidímetro de agulhas

Da medição do teor de água com o humidímetro de agulhas verificou-se, que algumas das tábuas apresentavam valores acima dos 15% (limite superior recomendado para realização de colagem). Optou-se pela colocação dessas mesmas tábuas numa câmara de secagem (30°C e 50% de HR), de modo a baixar o teor de água das tábuas para valores inferiores a 15%. As restantes tábuas (teor de água inferior a 15% foram mantidas na sala climatizada (20°C e 65%), até serem utilizadas em colagens.

4.2.2. Classificação não destrutiva da matéria-prima

Após a seleção das tábuas e da medição do seu teor de água, procedeu-se à classificação não destrutiva através do método da vibração longitudinal, com recurso a um equipamento específico para classificação de madeira serrada (Figura 4.2). A metodologia consiste na introdução de uma perturbação num dos topos da tábua através do impacto de uma esfera. Esta induz uma vibração que é medida pelo equipamento. Por sua vez esta informação é transmitida para um computador que processa os dados do espectro de resposta e determina não só a

frequência natural de vibração da peça ensaiada, como o módulo de elasticidade dinâmico da mesma. Para esta determinação foi necessária a introdução de alguns dados prévios como *input*, nomeadamente: i) dimensões transversais e longitudinais, ii) massa e iii) teor de água.

Uma das limitações do equipamento utilizado está relacionada com a massa volúmica mínima da peça. Para espécies folhosas, o valor mínimo é de 400 kg/m³. Assim, sempre que uma peça de Choupo apresentava massa volúmica inferior a esse limite, foi adotada uma massa tal que a massa volúmica (assumida) da peça fosse de 410 kg/m³. Note-se que esta alteração em nada afetou a frequência de vibração da peça, tendo-se procedido posteriormente à correção do módulo de elasticidade dinâmico para a massa volúmica real, de acordo com a equação 12.

A equação utilizada para corrigir o módulo de elasticidade dinâmico para a massa volúmica real foi a seguinte:

$$E_{m,dyncorrigido} = E_{m,dyn} \times \frac{\rho_{real}}{\rho_{adotada}} \quad (12)$$

Em que:

$E_{m,dyn}$ – representa o módulo de elasticidade dinâmico obtido para uma massa volúmica adotada de 410 kg/m³

$\rho_{adotada}$ – representa a massa volúmica adotada

ρ_{real} – representa a massa volúmica real



Figura 4.2 - Equipamento para classificação não destrutiva

4.2.3. Colas

Na realização das vigas de MLC foram utilizadas duas colas diferentes, uma cola do tipo PRF – Phenol-Resorcinol-Formaldeído e uma cola do tipo MUF – Melamina-Ureia-Formaldeído. Na maioria das vigas, nove, foi utilizada a cola do tipo PRF, amplamente estudada em trabalhos anteriores, tendo-se optado por fabricar uma viga com cola MUF para perceber se ocorria alguma diferença significativa ao nível do comportamento mecânico e modo de rotura. Ambos os tipos de cola são resistentes a condições ambientais classificadas como classe de serviço 3.

Assim foi utilizada no fabrico das vigas coladas com cola do tipo PRF, a cola Prefere 4040 juntamente com o endurecedor Prefere 5839. No fabrico das vigas coladas com cola do tipo MUF, foi utilizada a cola Prefere 4546 juntamente com o endurecedor Prefere 5021. Os dois tipos de colas requerem o uso de endurecedores, desta forma antes de cada colagem foi sempre preparada uma mistura de cola e endurecedor, para poder ser aplicada nas lamelas. Tendo em conta as fichas técnicas dos dois tipos de colas, o rácio cola/endurecedor adoptado foi de 100/20.

Suportando-se em resultados anteriores obtidos por Martins *et al.* (2017), o rendimento adotado para as misturas utilizadas foi de 450 g/m² para as colagens com cola do tipo PRF e de 350 g/m² para a colagem com cola do tipo MUF. Para ambas as misturas o tempo em aberto recomendado é o mínimo possível, enquanto o tempo em fechado recomendado é 5 a 10 minutos para colas do tipo PRF e 10 a 15 minutos para colas do tipo MUF. Todas as misturas efetuadas e posteriores colagens, foram realizadas em sala climatizada à temperatura de 20±2°C e humidade relativa de 65±5%.

4.3. Execução das vigas

4.3.1. Preparação das colagens

No laboratório do SerQ – Centro de Inovação e Competências da Floresta, foram realizadas 10 vigas de MLC constituídas por associação de 5 lamelas cada.

O planeamento das vigas a realizar e distribuição das tábuas por cada viga foi efectuado por duas fases, tendo-se inicialmente planeado as primeiras cinco vigas e após estas, planeado as restantes cinco. Assim, foram fabricadas nove vigas com a cola tipo PRF e uma viga com a cola tipo MUF. A composição de cada viga, isto é, a seleção das tábuas que iriam compor cada viga a fabricar, foi efetuada tendo em conta os resultados obtidos para o módulo de elasticidade dinâmico das tábuas que compõem a amostra. A disposição dos módulos de elasticidade

dinâmicos obedeceu aos princípios comuns e estabelecidos na EN 14080 (CEN, 2013), em que os valores mais baixos se encontram na zona central. As lamelas adjacentes possuíam módulos de elasticidade dinâmicos superiores e seguindo a mesma tendência para as lamelas mais exteriores (lamelas mais solicitadas em esforços de flexão). Exceção feita para uma viga em que se inverteu a disposição dos módulos de elasticidade das lamelas externas, com as intermédias, para verificar a viabilidade do modelo numérico e o efeito dessa alteração ao nível do comportamento mecânico. A numeração adotada para cada viga realizada foi efetuada tendo em conta o enquadramento do presente trabalho num outro estudo a decorrer em paralelo por Martins (2017), contudo doravante no presente trabalho para mais fácil compreensão, adota-se nomenclatura R1 a R10 respetivamente para as vigas.

Quadro 4.1 - Numeração adotada para as vigas realizadas

Numeração	Tipo de cola usada	Nova nomenclatura
BP_55_R1		R1
BP_56_R2		R2
BP_57_R3		R3
BP_58_R4	PRF	R4
BP_59_R5		R5
BP_60_R6		R6
BP_61_R7	MUF	R7
BP_62_R8		R8
BP_63_R9	PRF	R9
BP_64_R10		R10

4.3.2. Aparelhamento de tábuas e colagem

Esta parte do trabalho experimental dividiu-se essencialmente, em três fases. A primeira constituída pelo aparelhamento das tábuas, a segunda pela aplicação da cola e a terceira pela aplicação da pressão de aperto.

Procedeu-se assim, ao aparelhamento das tábuas previamente selecionadas com recurso a uma plaina desgrossadeira. A espessura final de cada lamela foi de aproximadamente 24 mm e o comprimento de cada viga obedeceu aos valores estabelecidos na EN 408 (CEN, 2012) de 20 vezes a altura da viga. O aparelhamento das tábuas (2,5 m de comprimento), produziu ligeiras imperfeições nos topos das mesmas, que foram descartados após o processo de cura das vigas e antes de serem alvo de análise não destrutiva e destrutiva. O tempo decorrido entre o aparelhamento e a colagem das lamelas, nunca ultrapassou uma hora, o que é bem abaixo do máximo estipulado pela norma EN 14080 (CEN, 2013) de seis horas.

Após aparelhamento, cada tábua designada agora de lamela, sofreu nova medição das suas dimensões e massa, de forma a se obter a massa volúmica da tábua aparelhada e procedeu-se novamente à sua classificação não destrutiva. Foi também realizado o registo fotográfico dos defeitos existentes em cada tábua e definida a orientação das lamelas constituintes de cada viga, de modo a cumprir os pressupostos de utilização em classe de serviço 3 (Figura 4.3).

O processo de colagem seguiu-se com a realização da mistura da cola nas proporções de 100/20 (cola/endurecedor), e aplicação em cada lamela da quantidade necessária e validada pelo estudo de Martins *et al.* (2017). A quantidade de cola aplicada foi controlada através do processo de pesagem e espalhamento, com recurso a espátula denteada assegurando assim uma distribuição o mais uniforme possível da mistura. Foram registados os tempos de aberto e de fechado decorridos para cada viga (Quadro 4.2).

Depois de aplicar a cola nas lamelas, estas foram colocadas no equipamento de prensagem, composto por 6 macacos hidráulicos de capacidade máxima de 50 kN, suportados por um grupo hidráulico. O controlo da pressão de aperto aplicada ao longo do tempo de prensagem, foi efectuado através de uma célula de carga independente do sistema de aplicação de pressão. A pressão de aperto foi seleccionada tendo em conta resultados obtidos de ensaios de delaminação realizados anteriormente por Martins *et al.* (2017). Desta forma para ambos os dois tipos de cola utilizados, PRF e MUF, foi adotada uma pressão de aperto de 1,0 MPa. Na Figura 4.4 é apresentada uma viga colada com cola do tipo PRF decorrido o processo de prensagem. Na Figura 4.5 é apresentada a viga colada com cola do tipo MUF, viga R7, ainda durante o processo de prensagem.



Figura 4.3 - Orientação das lamelas em classe de serviço 3



Figura 4.4 - Viga após colagem com PRF



Figura 4.5 – Viga sob prensagem, colada com cola do tipo MUF

Quadro 4.2 - Critérios de colagem para cada viga

Viga Nº	Relação Cola/End [g/g]	Quantidade de cola [g/m ²]	Tempo aberto [min]	Tempo fechado [min]	Pressão de aperto [MPa]	Tempo de pressão [min]
R1	100/20	450	2,5	5,0	1,0	240
R2		450	2,5	5,0	1,0	240
R3		450	2,0	5,0	1,0	240
R4		450	3,0	5,0	1,0	240
R5		450	3,0	5,0	1,0	240
R6		450	2,5	5,0	1,0	240
R7		350	3,0	5,0	1,0	480
R8		450	2,5	5,0	1,0	240
R9		450	2,5	5,0	1,0	240
R10		450	2,5	5,0	1,0	240

Após o processo de colagem as vigas repousaram aproximadamente uma semana em sala climatizada de condições $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ de temperatura e $65\pm 5\%$ de humidade relativa.

Apresenta-se no Quadro 4.3, a composição adotada para cada viga fabricada, baseada nos módulos de elasticidade dinâmicos de cada lamela, a massa volúmica de cada lamela e os respetivos valores médios por viga. Sendo a lamela 1 a superior e a lamela 5 a inferior.

Quadro 4.3 – Disposição de módulos de elasticidade dinâmicos e massas volúmicas por viga

Nº Viga	Lamela	Módulo elasticidade dinâmico	Massa vol.	Nº Viga	Lamela	Módulo elasticidade dinâmico	Massa vol.
R1	1	12706	483	R2	1	10828	449
	2	8931	439		2	8808	368
	3	8374	373		3	7197	367
	4	9169	424		4	8917	426
	5	13263	509		5	11148	471
	Média	10489	446		Média	9380	416
R3	1	10689	475	R4	1	9810	430
	2	9306	400		2	8579	399
	3	7320	370		3	8183	431
	4	10631	437		4	8251	364
	5	12888	492		5	10212	444
	Média	10167	435		Média	9007	414
R5	1	11684	501	R6	1	12785	607
	2	9441	440		2	9527	438
	3	8928	377		3	8746	381
	4	10216	439		4	9832	450
	5	13100	514		5	13212	598
	Média	10674	454		Média	10820	495
R7	1	11682	449	R8	1	8738	385
	2	8259	370		2	13211	506
	3	7427	374		3	10283	480
	4	8166	380		4	13555	485
	5	13001	483		5	8702	420
	Média	9707	411		Média	10898	455
R9	1	8872	385	R10	1	12594	476
	2	7662	369		2	8334	376
	3	7286	368		3	7358	362
	4	7542	351		4	8951	386
	5	10164	432		5	13023	484
	Média	8305	381		Média	10052	417

Referir que após a secagem se realizaram ensaios estáticos não destrutivos, procedimento apresentado de seguida, antes de aparelhar lateralmente as vigas. As dimensões finais das vigas após aparelhamento, foram 88 x 120 x 2400 [mm] e 92 x 120 x 2400 [mm] para uma e nove vigas respetivamente. Das dez vigas produzidas, nove são constituídas apenas por choupo e uma é constituída por choupo e pinho, a viga R6. A Figura 4.6 e a Figura 4.7 apresentam uma vista em perfil transversal destes dois tipos de vigas, onde é perceptível a diferença entre os dois tipos de vigas. A viga R8, foi realizada com inversão dos módulos de elasticidade das lamelas interiores com as exteriores.

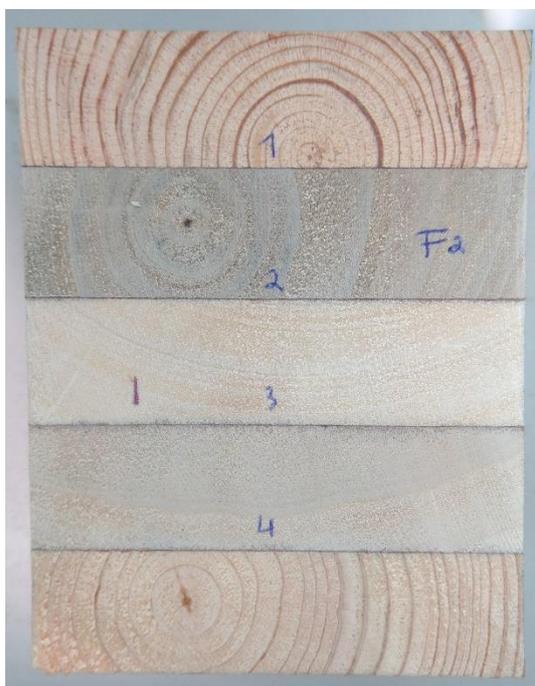


Figura 4.6 – Perfil transversal da viga mista choupo-pinho, viga R6

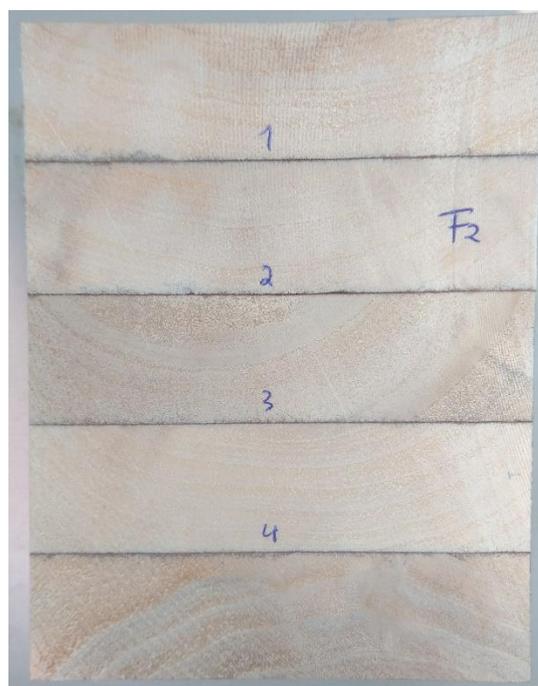


Figura 4.7 – Perfil transversal de uma viga de choupo

4.4. Ensaios realizados (Procedimentos)

4.4.1. Ensaios estáticos de flexão não-destrutivos

Com o objetivo de determinar os módulos de elasticidade estáticos local e global, foram realizados ensaios estáticos de flexão não-destrutivos. A determinação dos módulos de elasticidade estáticos por ensaio foi realizada segundo a norma EN 408 (CEN, 2012), tendo-se determinado o módulo de elasticidade local e global.

A determinação do módulo de elasticidade local ($E_{m,local}$) e do módulo de elasticidade global ($E_{m,global}$) foi realizada com base no esquema apresentado nas Figura 4.8 e Figura 4.9 respetivamente, obtidos da norma EN 408 (CEN, 2012).

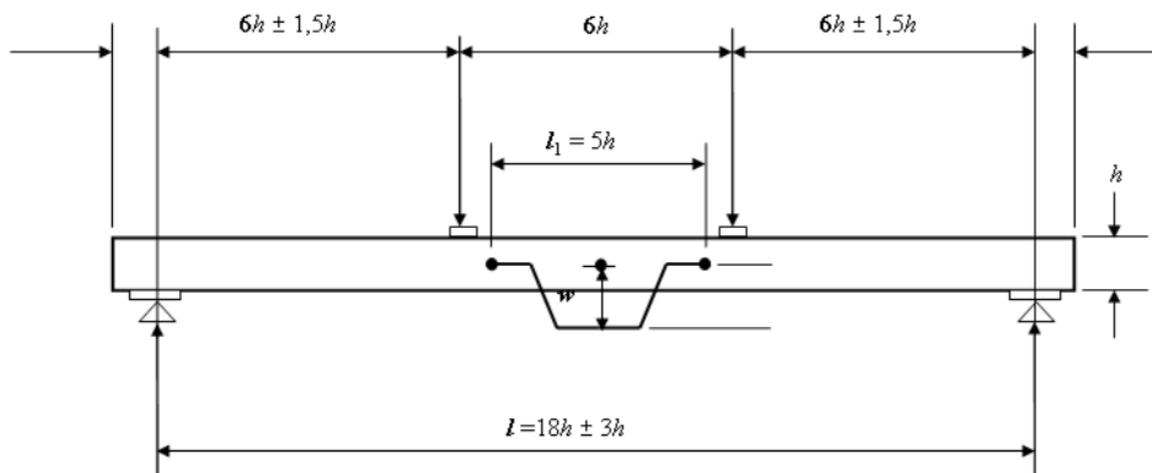


Figura 4.8 – Esquema de ensaio para o $E_{m,local}$, de acordo com a norma EN 408 (CEN, 2012)

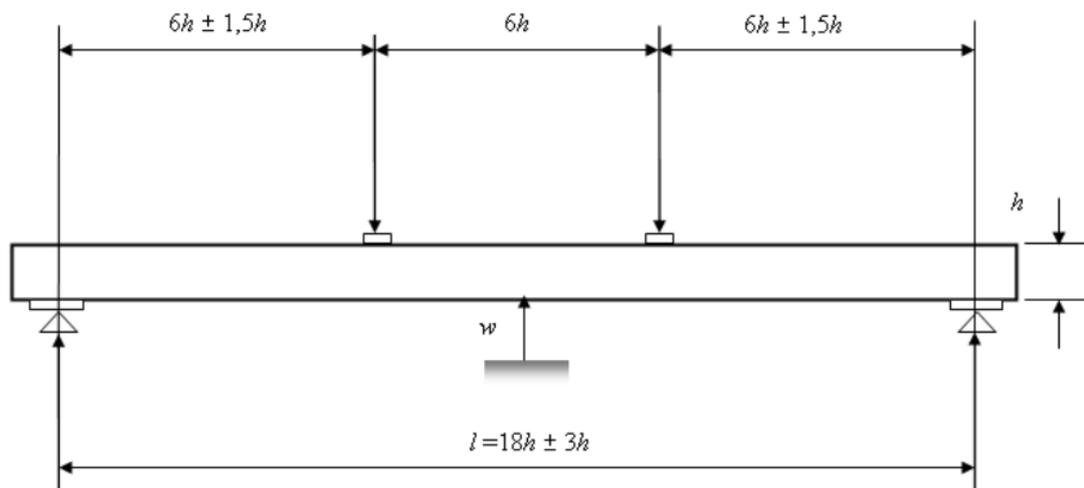


Figura 4.9 – Esquema de ensaio para o $E_{m,global}$, de acordo com a norma EN 408 (CEN, 2012)

A aquisição de dados foi efectuada através de um chassi de 8 canais da HBM (modelo MX 840B), ligado a um computador com software HBM para aquisição contínua e gravação dos dados em intervalos de 1 segundo. No total, foram utilizados 6 transdutores de deslocamento para medição das deformações relativas ao módulo de elasticidade local (3 por face da viga) e

1 transdutor de deslocamento para o módulo de elasticidade global (Figura 4.10). Para ambos os ensaios, foi utilizada uma célula de carga de 200 kN de capacidade máxima para registo da força aplicada.

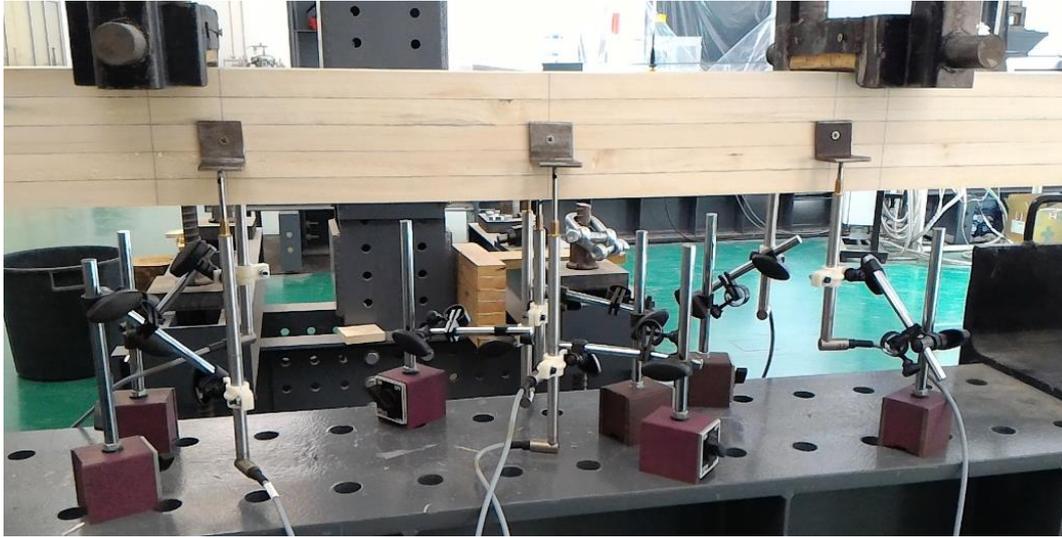


Figura 4.10 - Esquema de colocação dos deflectómetros numa viga – Um lado

O ensaio decorreu em controlo de deslocamento a uma velocidade de 0,003 h ou seja 0,36 mm/s, até um patamar de carga que não excedeu 40% da carga máxima prevista. A carga máxima prevista foi estimada com base em resultados de ensaios prévios não publicados. Estas considerações estão preconizadas na norma EN 408 (CEN, 2012).

O cálculo dos módulos de elasticidade local e global foram realizados segundo a norma EN 408 (CEN, 2012) pelas seguintes expressões:

$$E_{m,l} = \frac{al_1^2(F_2 - F_1)}{16I(w_2 - w_1)} \quad (13)$$

$$E_{m,g} = \frac{3al^2 - 4a^3}{2bh^3 \left(2 \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} - \frac{6a}{5Gbh} \right)} \quad (14)$$

Em que:

a – representa a distância entre um dos pontos de aplicação da carga e o apoio mais próximo [mm]

l_1 – representa o comprimento do troço central utilizado para o cálculo do módulo de elasticidade local [mm]

$F_2 - F_1$ - representa o incremento de carga dado pela linha de regressão com um coeficiente de correlação de 0,99 ou melhor [N]

I - representa a inércia da secção transversal em relação ao eixo de flexão

$w_2 - w_1$ - representa o incremento de deformação correspondente ao incremento de carga considerado [mm]

l - representa o comprimento do vão [mm]

b - representa a largura da secção transversal [mm]

h - representa a altura da secção transversal [mm]

G - representa o módulo de elasticidade transversal

F - representa a força máxima registada [N]

4.4.2. Ensaios estáticos de flexão destrutivos

Com o objetivo de determinar a tensão de rotura (f_m) dos elementos em estudo, realizaram-se ensaios estáticos de flexão destrutivos, segundo a norma EN 408 (CEN, 2012), aproveitando o esquema utilizado para a obtenção dos módulos de elasticidade estáticos, excluindo os defletómetros. O esquema de ensaio seguido é apresentado na Figura 4.11.

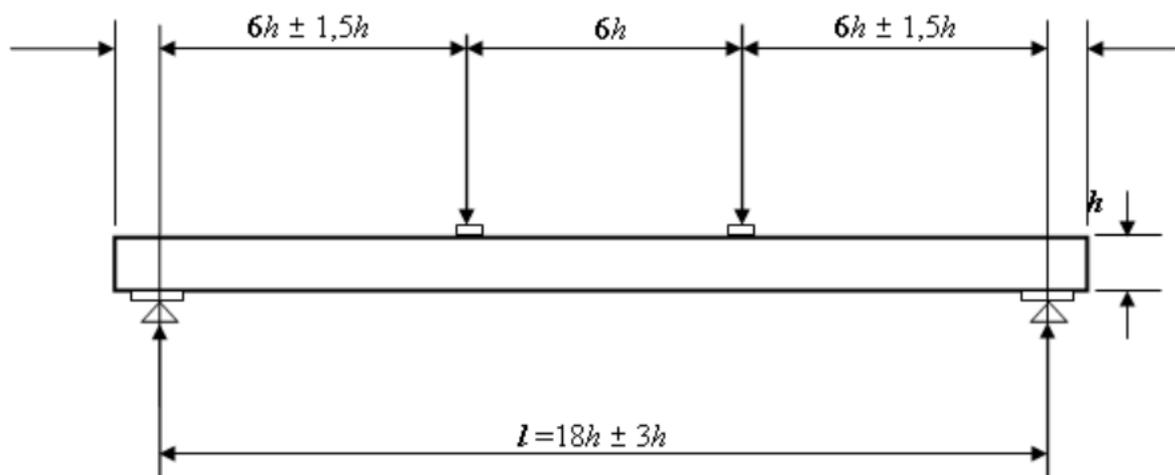


Figura 4.11 – Esquema de ensaio para f_m , de acordo com a norma EN 408 (CEN, 2012)

Estes ensaios, consistiram na aplicação de um carregamento até esta atingir a rotura, de forma a se determinar a força resistente de cada elemento. O cálculo da tensão de rotura foi realizado segundo a norma EN 408 (CEN, 2012) pela seguinte expressão:

$$f_m = \frac{3Fa}{bh^2} \quad (15)$$

Na realização dos ensaios destrutivos, teve-se em atenção a velocidade de ensaio, de forma a que a rotura ocorresse aproximadamente aos 300 ± 120 segundos, como mencionado na norma, também em controlo de deslocamento.

4.4.3. Avaliação da qualidade de colagem

4.4.3.1. Ensaios de corte

Após os ensaios de flexão e tendo em conta o modo de rotura de cada viga, procurou-se obter provetes para ensaio do controlo de qualidade da colagem da respetiva viga.

Das 10 vigas ensaiadas à flexão foram recolhidos provetes para se determinar a resistência ao corte pela linha de cola. A intenção seria recolher dois provetes por viga para realizar ensaios de corte, contudo, devido à sua configuração final na rotura, três vigas apenas permitiram a recolha de um provete, o que resultou na obtenção de 17 provetes para ensaiar ao corte. De forma a respeitar o requerido na norma EN 14080 (CEN, 2013), os provetes retirados tinham dimensões médias iguais a: 50 mm de largura, 50 mm de espessura e 120 mm de altura. Previamente aos ensaios os provetes foram acondicionados em sala climatizada com temperatura (20 ± 2) °C e humidade relativa de (65 ± 5) % respeitando a norma e foram efetuadas medições aos provetes para se aferir a área de cada plano de corte.

O ensaio consistiu na aplicação de carga paralelamente à linha de cola num dispositivo desenvolvido para o efeito existente no SerQ (Figura 4.12). O ensaio seguiu os pressupostos do Anexo D da EN 14080 (CEN, 2013).



Figura 4.12 - Dispositivo utilizado nos ensaios de corte

Os provetes foram posicionados no dispositivo de corte de forma a que fossem carregados na direção das fibras e que a distância do plano da linha de cola ao plano de corte não excedesse 1 mm. Cada provete foi analisado/ensaiado em 4 seções correspondentes às 4 linhas de cola, o que fez um total de 68 ensaios de corte pela linha de cola para todos os provetes. Procurou-se executar os ensaios a velocidade constante de deformação, para que o tempo mínimo de ensaio nunca fosse inferior a 20 segundos, como recomenda a norma.

A tensão de rotura ao corte (f_v) foi calculada dividindo a força de rotura pela área do plano sujeito a ensaio e aplicado um fator de modificação (k) (equação 17), conforme equação (19) apresentada de seguida transcrita da norma EN 14080 (CEN, 2013).

$$f_v = k \left(\frac{F_u}{A} \right) \quad (16)$$

$$k = 0,78 + 0,0044t \quad (17)$$

Em que:

F_u - representa a carga última [N]

A - representa a área do plano submetido ao corte

k - representa o fator de modificação para peças cuja espessura da peça na direção das fibras seja inferior a 50 mm

t - representa o comprimento do provete na direção das fibras [mm].

Depois de efetuados os ensaios, determinou-se a percentagem de rotura que ocorreu pela madeira. Esta contabilização foi efetuada facilmente nos provetes provenientes de vigas coladas com PRF devido à cor da cola ser bem perceptível. Já no caso do provete proveniente de viga colada com MUF, foi necessário recorrer-se ao uso de uma solução que evidencia a presença de lignina, permitindo distinguir da presença de cola na superfície da rotura. A Figura 4.13 ilustra o efeito da solução na superfície de rotura.



Figura 4.13 – Provete de resistência ao corte pela linha de cola de elemento colado com MUF, ao qual foi aplicada solução

A norma EN 14080 (CEN, 2013) preconiza a verificação de percentagens mínimas de rotura pela madeira. Estes valores mínimos são dependentes dos resultados obtidos para a tensão de resistência ao corte, como se apresenta no Quadro 4.4.

Quadro 4.4 – Percentagem mínima de rotura pela madeira imposta pela norma EN 14080 (CEN, 2013) para valores médios por provete e por linha de cola

	Valores Médios			Valores individuais (Linha de cola)		
	Resistência ao corte f_v [MPa]	6	8	$f_v \geq 11$	$4 \leq f_v \leq 6$	6
Rotura mínima pela madeira [%]	90	72	45	100	74	20

Nota: Para valores intermédios de resistência ao corte, recorre-se ao uso de duas expressões para o cálculo da percentagem mínima pela rotura: para valores médios $144 - (9f_v)$; para valores individuais $153,3 - (13,3f_v)$.

4.4.3.2. Ensaios de delaminação

O controlo de qualidade da colagem pode também ser assegurado pela realização de ensaios de delaminação, através da medição da delaminação das linhas de cola após ensaios cíclicos de molhagem e secagem. Estes ensaios realizaram-se de acordo com o disposto na norma EN 14080 (CEN, 2013) no seu Anexo C, seguindo o Método A.

Também no presente caso, foram retirados provetes para serem analisados após ensaio de rotura das 10 vigas. Da mesma forma que para os ensaios de corte, a intenção seria recolher dois provetes por viga, porém a configuração final na rotura de três vigas apenas permitiu a recolha de um provete, resultando na obtenção de 17 provetes para ensaiar à delaminação. Os provetes retirados apresentavam dimensões médias de 92 mm de largura, 120 mm de altura e 75 mm de comprimento, de forma a respeitar o requerido na norma EN 14080 (CEN, 2013), que diz que os provetes devem ter um comprimento na direção das fibras de 75 ± 5 mm. Previamente aos ensaios os provetes foram acondicionados em sala climatizada com temperatura (20 ± 2) °C e humidade relativa de (65 ± 5) % respeitando a norma.

Os equipamentos utilizados para os ensaios consistiram num recipiente pressurizável – Autoclave (vácuo/pressão) e uma conduta de secagem com controlo de temperaturas, humidade relativa e velocidade do ar, visíveis na Figura 4.14.



Figura 4.14 – Conduta de secagem dos provetes (à esquerda) e autoclave para aplicação de ciclos vácuo/pressão (à direita)

O método adotado para execução dos ensaios foi o método A, que é apresentado na norma EN 14080 (CEN, 2013). Antes de iniciar o primeiro ciclo de vácuo-pressão, foram medidos os comprimentos das linhas de cola, registando o comprimento de linhas de cola com presença de nós ou outro tipo de defeito e determinada a sua massa. O procedimento para realizar o ciclo conforme a norma é o seguinte:

1. Colocam-se os provetes na autoclave;
2. Submergem-se os provetes enchendo a autoclave com água a temperatura entre 10°C e 20°C;
3. Aplica-se vácuo na autoclave entre 70 kPa e 85 kPa durante 5 minutos;
4. Aplica-se pressão na autoclave entre 500 kPa e 600 kPa durante 1 hora;

5. Repetiram-se os passos 3 e 4;
6. Colocam-se os provetes na conduta de secagem, durante 21 a 22 horas, finalizando o 1º ciclo;
7. Repetem-se os passos 1 a 6 por forma a realizar o 2º ciclo;
8. Registaram-se as delaminações observadas nas linhas de cola (num período inferior a 1h);
9. Repetiram-se os passos 1 a 6 e realiza-se novo registo das delaminações após o 3º ciclo.

Segundo a norma EN 14080 (CEN, 2013), o terceiro ciclo é considerado adicional e apenas se deve realizar se a percentagem de delaminação total ao fim do segundo ciclo for superior a 5%. Visto este ser um trabalho de investigação, o terceiro ciclo foi realizado para todos os provetes.

Conforme referido no procedimento, no final do segundo e terceiro ciclo foram registadas as delaminações das linhas de cola, recorrendo a uma lupa e marcadores de cores diferentes de forma a distinguir os ciclos e perceber a evolução das delaminações. O tempo decorrido desde que se retiraram os provetes da conduta de secagem até serem registadas as delaminações foi sempre inferior a 1 hora, respeitando os requisitos da norma.

A percentagem de delaminação total e a percentagem de delaminação por linha de cola (delaminação máxima) foram determinadas segundo a norma EN 14080 (CEN, 2013) e pelas equações (18) e (19) respetivamente.

$$\%_{delaminação\ total} = 100 \left(\frac{l_{tot,delam}}{l_{tot,glue\ lines}} \right) \quad (18)$$

$$\%_{delaminação\ linha} = 100 \left(\frac{l_{máx,delam}}{2l_{glue\ line}} \right) \quad (19)$$

Em que:

$l_{tot,delam}$ – representa o comprimento total de delaminação de um provete;

$l_{tot,glue\ lines}$ – representa a soma de todos os comprimentos das linhas de cola de ambas as faces de um provete;

$l_{máx,delam}$ – representa o comprimento máximo de delaminação;

$l_{glue\ line}$ – representa o comprimento de uma linha de cola.

4.5. Massa volúmica e Teor de água

De forma a aferir a massa volúmica e o teor de água das vigas ensaiadas, retiraram-se provetes das vigas após serem ensaiadas à flexão. A aferição do teor de água realizou-se segundo a norma EN 13183-1 (CEN, 2002), recorrendo a uma estufa de secagem. Antes de colocar os provetes

na estufa e executar o procedimento da norma, efetuaram-se medições das dimensões dos provetes de forma a aferir a massa volúmica.

A recolha de provetes foi efetuada de maneira semelhante à realizada para os ensaios ao corte e delaminação, sendo intenção recolher dois provetes por viga. Contudo devido à configuração final na rotura das vigas após os ensaios à flexão, quatro vigas apenas permitiram a recolha de um provete. Assim obtiveram-se 16 provetes. Os provetes foram retirados das vigas a um mínimo de 0,30 m de distância dos topos, e apresentavam dimensões médias de 92 mm de largura, 120 mm de altura e 52 mm de comprimento, de forma a respeitar o requerido na norma EN 13183-1 (CEN, 2002). Após serem medidas as suas dimensões, os provetes foram colocados em tabuleiros, numa estufa à temperatura de $103 \pm 2^\circ\text{C}$, até se obter uma variação de massa, entre duas pesagens consecutivas, intervaladas de 2h, inferior ou igual a 0,5%. O teor de água foi determinado, de acordo com a equação seguinte (20), proveniente da norma:

$$w(\%) = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100 \quad (20)$$

Em que:

m_1 – representa o valor da massa em gramas do provete antes de ser secado

m_2 – representa o valor da massa em gramas do provete após secagem.

O Quadro 4.5 apresenta os valores de massa volúmica e teor de água aferidos dos provetes.

Quadro 4.5 - Massa volúmica e teor de água

Viga Nº	Massa volúmica [kg/m ³]	Teor de água w [%]
R1	451,8*	14,6*
R2	427,2	14,3
R3	434,3	14,7
R4	425,9*	14,4*
R5	457,2*	14,8*
R6	495,6	15,1
R7	430,4	14,3
R8	460,0*	14,5*
R9	386,2*	14,2*
R10	425,7*	14,7*

Nota: * - Valor médio obtido de dois provetes retirados da mesma viga.

4.6. Correção das propriedades mecânicas

A norma EN 384 (CEN, 2004) considera a necessidade de realizar ajustes às propriedades mecânicas, devido ao fato de existir desfasamento entre o teor de água medido e o teor de água de referência normalizado de 12%. Segundo a mesma norma, devem ser aplicados fatores de correção aos módulos de elasticidade e à massa volúmica dos elementos em estudo.

Segundo a norma EN 384 (CEN, 2004), as correções a aplicar aos resultados obtidos para o módulo de elasticidade e massa volúmica, de acordo com o teor de água de referência 12%, é dado por:

$$E_{\text{corrigido}}[MPa] = E_{\text{ensaio}} \left(1 + 0,02(w_{\text{provetete}} - 12) \right) \quad (21)$$

$$\rho_{\text{corrigido}}[kg/m^3] = \rho_{\text{inicial}} \left(1 - 0,005(w_{\text{provetete}} - 12) \right) \quad (22)$$

5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS EXPERIMENTAIS

5.1. Introdução

Neste capítulo realiza-se a apresentação e análise dos resultados obtidos nos vários ensaios realizados. Tendo em conta os resultados obtidos pela campanha experimental e os obtidos pelos métodos numéricos, a análise realiza-se através de comparações e correlações entre alguns resultados experimentais e entre alguns resultados experimentais e resultados teóricos obtidos dos modelos numéricos.

Conseguir prever as propriedades mecânicas de elementos estruturais de MLC a partir de ensaios dinâmicos realizados às tábuas (lamelas) que os compõem, permite otimizar o uso da madeira à disposição, facilitando o processo de seleção das tábuas. Assim, a obtenção de boas relações entre módulos de elasticidade, pode possibilitar estimar a resistência de um elemento de MLC sem existir necessidade de lhe realizar ensaios destrutivos.

A adoção de técnicas não destrutivas para estimar a resistência de elementos de MLC, em detrimento da realização de ensaios estáticos, ganha assim um caráter importante, facilitando o uso estrutural de MLC.

5.2. Ensaios estáticos de flexão não-destrutivos

5.2.1. Resultados

Na Figura 5.1 pode-se observar um gráfico por pontos com os resultados de dois módulos de elasticidade dinâmicos e um módulo de elasticidade estático por viga, todos obtidos antes de aparelhar lateralmente. O gráfico permite apurar que na maioria das vigas o módulo de elasticidade estático global é superior aos dois módulos de elasticidade dinâmicos apresentados. A diferença entre os módulos de elasticidade dinâmicos médios das lamelas e os módulos de elasticidade dinâmicos e estáticos, indica-nos que a colagem da viga tem uma clara influência nas propriedades da viga, tendo a tendência de aumentar o módulo de elasticidade dinâmico.

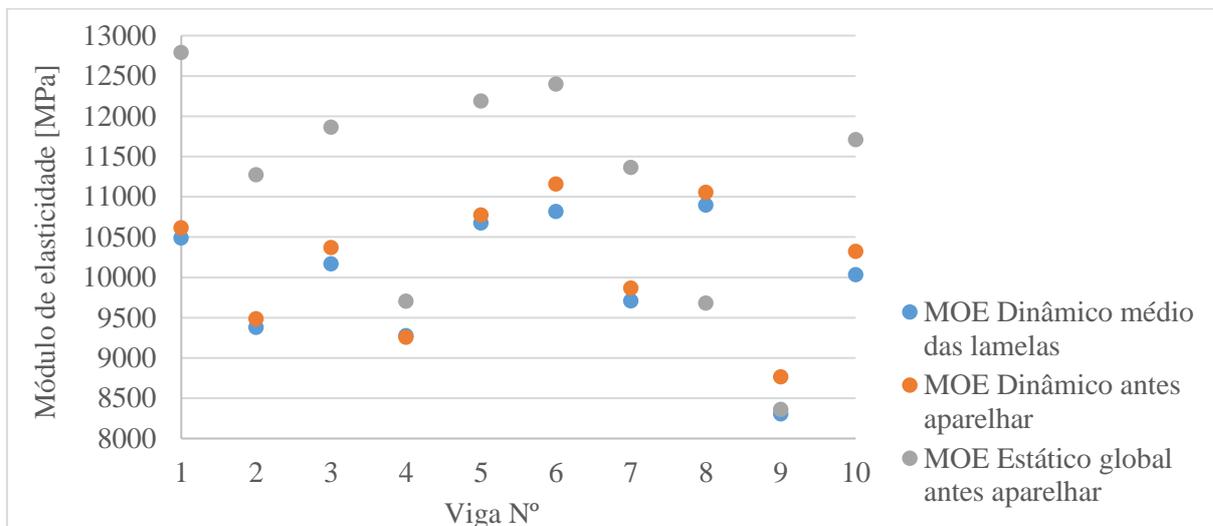


Figura 5.1 – Distribuição por pontos dos módulos de elasticidade dinâmico médio das lamelas e antes de aparelhar e estáticos globais antes de aparelhar

No Quadro 5.1 apresentam-se os valores obtidos para o módulo de elasticidade dinâmico e estático por viga nas várias fases de construção e ensaio. Nomeadamente o módulo de elasticidade dinâmico médio obtido pela média dos módulos de elasticidade dinâmicos de cada lamela, os módulos de elasticidade dinâmicos medidos com o MTG antes e após aparelhar lateralmente as vigas, e os módulos de elasticidade locais e globais obtidos dos ensaios não-destrutivos efetuados antes e após aparelhar lateralmente as vigas.

Quadro 5.1 - Propriedades obtidas experimentalmente, por viga, durante as várias fases de construção e ensaio

Viga Nº	ρ [kg/m ³]	Média lamelas $E_{m,MTG}$ [MPa]	Antes de aparelhar			Após aparelhar		
			$E_{m,MTG}$ [MPa]	$E_{m,local}$ [MPa]	$E_{m,global}$ [MPa]	$E_{m,MTG}$ [MPa]	$E_{m,local}$ [MPa]	$E_{m,global}$ [MPa]
R1	445,9	10489	10616	17735	12790	10473	18553	12771
R2	422,3	9380	9485	15778	11274	9536	15040	11410
R3	428,4	10167	10372	17384	11863	10173	15255	11920
R4	420,7	9277	9256	12878	9704	9214	11771	9993
R5	450,7	10674	10775	18281	12189	10709	17423	12625
R6	487,9	10820	11159	20057	12398	10968	20073	12624
R7	425,5	9707	9866	16832	11366	9845	15650	11543
R8	454,3	10898	11056	12090	9681	11075	11744	9894
R9	382,0	8305	8764	11664	8363	8699	10573	8845
R10	420,0	10032	10324	14630	11710	10235	15053	12195
Média	433,8	9975	10167	15733	11134	10093	15114	11382

Do Quadro 5.1, podemos averiguar a relação entre a massa volúmica e as propriedades mecânicas, e verificamos que a viga R9, cujo módulo de elasticidade médio das lamelas é o mais baixo de entre as 10 vigas realizadas, coincidiu com a massa volúmica mais baixa. A mesma viga, R9, obteve ainda os módulos de elasticidade estáticos mais baixos e veio a apresentar a resistência mais baixa de entre as 10 vigas. Não contabilizando a viga R8, viga fabricada com inversão de lamelas, as três vigas com módulos de elasticidade médio das lamelas maiores, R6, R5 e R1, apresentaram os maiores valores de massas volúmicas e módulos de elasticidade estáticos. Correlacionado as massas volúmicas com os módulos de elasticidade estáticos finais das 10 vigas, obtemos um coeficiente de correlação R de 0,61, o que por si só já revela a existência de relação entre estas duas propriedades, contudo se se retirarem os resultados da viga R8 da correlação, a mesma aumenta para um coeficiente de correlação R de 0,80. Comparando a viga R8 com vigas semelhantes quanto a valores de massa volúmica, as vigas R1 e R5, nomeadamente no módulo de elasticidade estático existe uma clara diferença de cerca de 2800 MPa, este fato está relacionado com o modo de fabrico da viga R8, que não seguiu as boas práticas normativas, de que as lamelas com módulos de elasticidade maiores devem estar no exterior da peça.

5.2.2. Módulos de elasticidade local e global antes e após aparelhar lateralmente

Na Figura 5.2, Figura 5.3 e Figura 5.4 apresentam-se os gráficos relativos a correlações e distribuições de valores obtidos para o módulo de elasticidade estático local e global respetivamente, determinados através dos ensaios estáticos não destrutivos realizados antes e após aparelhar lateralmente as vigas.

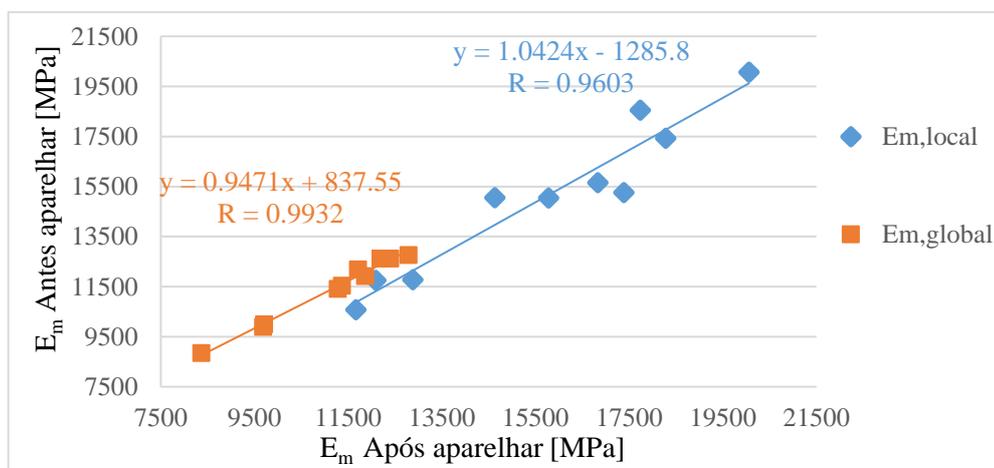


Figura 5.2 – Correlações entre módulos de elasticidades (locais e globais) antes e após aparelhar lateralmente

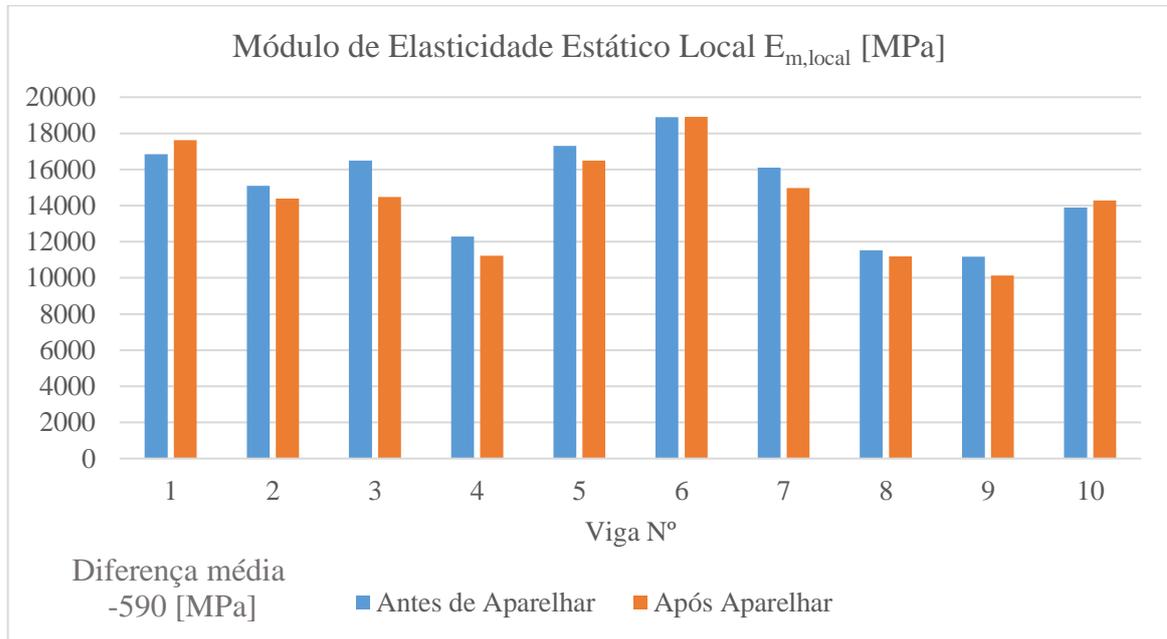


Figura 5.3 - Distribuição do módulo de elasticidade estático local ($E_{m,local}$)

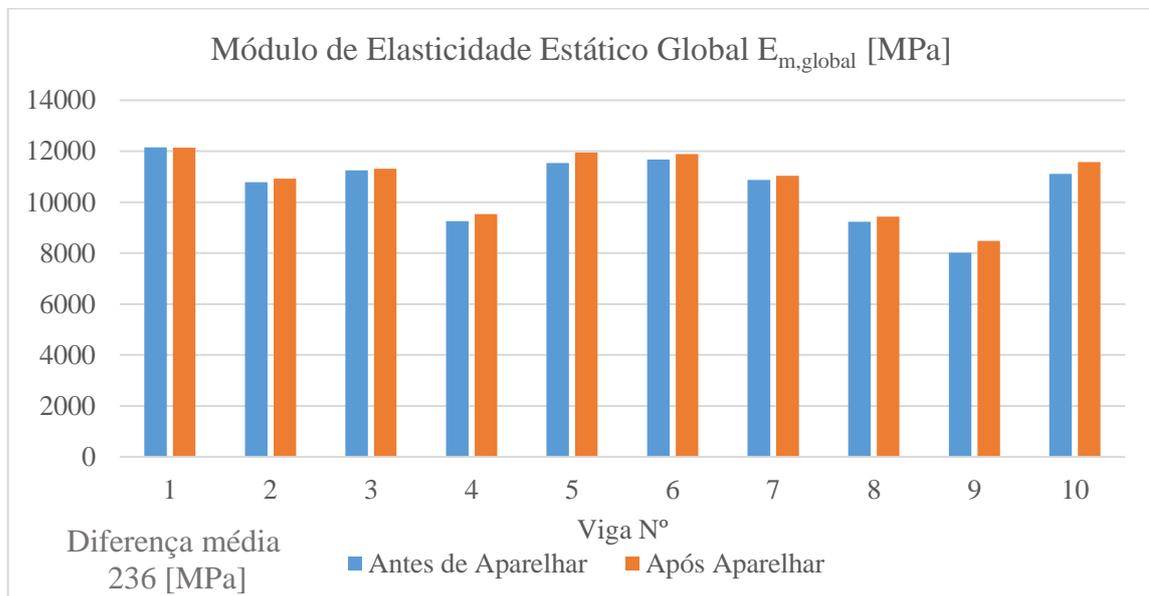


Figura 5.4 - Distribuição do módulo de elasticidade estático global ($E_{m,global}$)

Conforme podemos observar na Figura 5.2, relativa aos módulos de elasticidade locais e globais obtidos pelos ensaios não-destrutivos, as correlações entre os resultados de antes e após a aparelhagem lateral das vigas apresentam valores elevados de coeficiente de correlação R de 0,96 ($E_{m,local}$) e 0,99 ($E_{m,global}$).

Comparando os módulos de elasticidade estáticos corrigidos de ensaios antes e após aparelhagem lateral apresentados na Figura 5.3 e na Figura 5.4, em geral os módulos de elasticidade locais diminuíram 4% e os módulos de elasticidade globais aumentaram 2% após aparelhagem das vigas. Esta variação de resultados obtidos pode estar relacionada com a aparelhagem em si, visto a intenção da aparelhagem ser a regularização lateral das vigas de forma a melhorar e uniformizar a sua apresentação. Aparelhando as vigas lateralmente estamos a retirar largura às mesmas, contudo estamos a uniformizar a secção transversal das vigas ao longo do seu vão.

5.2.3. Comparação entre módulos de elasticidade global e local

Observando os resultados registados para os dois módulos de elasticidade, local e global, concluímos que o módulo de elasticidade local foi sempre 30 a 40% superior ao global em todas as vigas ensaiadas. Esta diferença de valores pode ser explicada pelo fato de a medição do módulo de elasticidade global ter em consideração o elemento em ensaio no seu todo, enquanto a medição do módulo de elasticidade local apenas tem em conta uma zona central do elemento. Desta forma, a quantidade de defeitos e empenos que possam existir no elemento são na totalidade contabilizados apenas para o cálculo do módulo de elasticidade global. O fato da possibilidade de existir flexão com corte em vez de flexão pura, também pode condicionar estes resultados, resultando em módulos de elasticidade globais menores.

5.2.4. Comparação entre módulos de elasticidade estáticos e dinâmicos

Realizaram-se correlações simples em que se comparam os módulos de elasticidade obtidos de forma estática e dinâmica. Na Figura 5.5 e na Figura 5.6 apresentam-se correlações, exibindo o coeficiente de correlação R, entre o módulo de elasticidade dinâmico médio das lamelas e o módulo de elasticidade estático antes de aparelhar lateralmente, e entre o módulo de elasticidade dinâmico médio das lamelas e o módulo de elasticidade estático após aparelhar lateralmente.

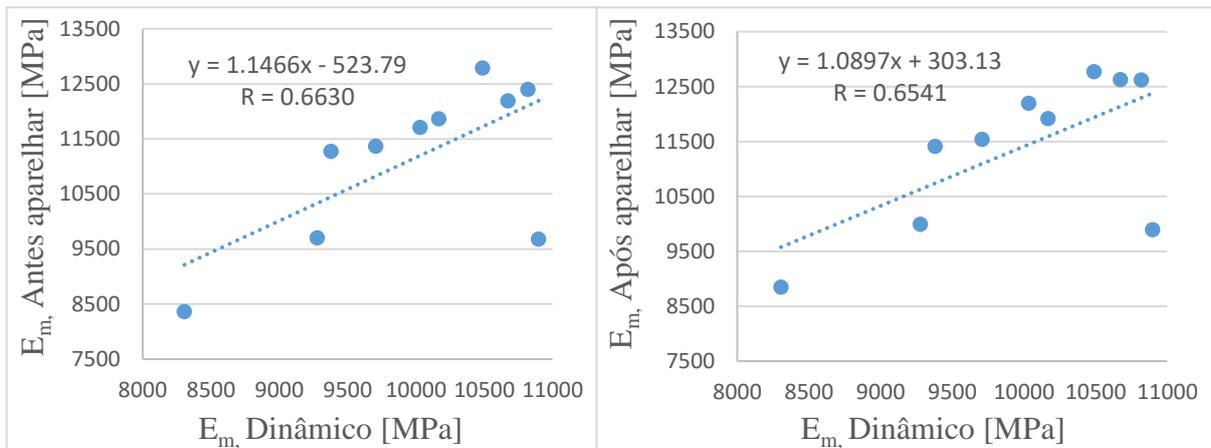


Figura 5.5 – Correlações entre E_m dinâmico e E_m estático antes de aparelhar e entre E_m dinâmico e E_m estático após aparelhar, considerando os resultados da viga R8

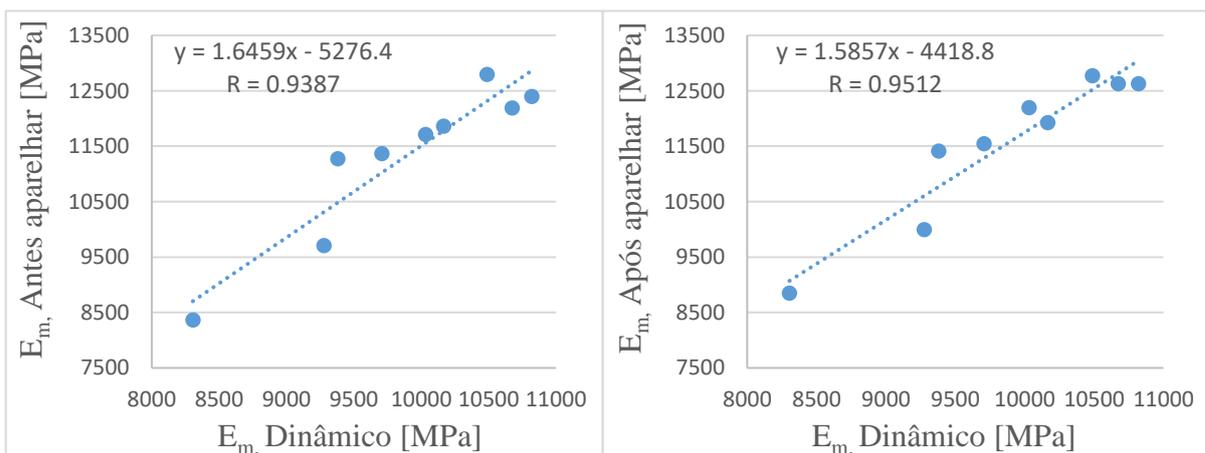


Figura 5.6 – Correlações entre E_m dinâmico e E_m estático antes de aparelhar e entre E_m dinâmico e E_m estático após aparelhar, não considerando os resultados da viga R8

Comparando os coeficientes de correlação apresentados na Figura 5.5 e na Figura 5.6, verificamos que os afetos à Figura 5.6, onde se despreza os resultados relativos à viga R8, são muito mais elevados. A viga R8 foi fabricada com lamelas interiores mais resistentes, o que configura uma disposição de lamelas contrária à indicada normativamente e contrária ao fato de em flexão as maiores tensões ocorrerem nas lamelas exteriores (logo necessitarem de mais resistência que as interiores). A intenção do fabrico da viga R8 com tal disposição, foi de aferir a sensibilidade dos modelos considerados e do equipamento de classificação não destrutivo perante a alteração da disposição de lamelas. Tendo em conta os resultados, podemos verificar que o equipamento de classificação não destrutivo não conseguiu identificar a incorreta

disposição das lamelas adotada e dar resultados coerentes. Ainda assim seria preferível ter uma amostra maior de vigas fabricadas desta forma para retirar mais conclusões. Analisando apenas a Figura 5.6, observamos que as correlações apresentadas possuem coeficientes R elevados, denotando a existência de uma boa relação entre os módulos de elasticidade dinâmicos e módulos de elasticidade estáticos, caso se cumpram os bons princípios de distribuição de módulos de elasticidade das lamelas na composição das vigas de MLC. A comparação entre estes resultados permitiu ainda observar uma diferença média de 15% entre os módulos de elasticidade estáticos e a média dos módulos de elasticidade dinâmicos individuais das lamelas, sendo os dinâmicos inferiores aos estáticos.

5.3. Ensaio estáticos de flexão destrutivos

5.3.1. Resultados

O Quadro 5.2 apresenta os valores obtidos para a carga máxima registada para cada viga nos ensaios estáticos de flexão destrutivos e os respetivos valores de tensão de rotura por flexão calculados pela equação (15).

Quadro 5.2 - Cargas e resistências máximas obtidas para as vigas

Viga Nº	Fmax [kN]	f _m [N/mm ²]
R1	37,39	62,61
R2	39,03	62,18
R3	38,47	62,79
R4	22,71	36,38
R5	44,86	73,14
R6	33,13	53,90
R7	37,63	60,11
R8	31,07	49,66
R9	23,33	37,88
R10	35,48	57,59
Média	34,31	55,62

A duração dos ensaios de flexão destrutivos foi em média de 355 segundos, verificando assim o requisito da norma EN 408 (CEN, 2012), relativamente ao intervalo de tempo em que a rotura deve ser alcançada. A amostra de 10 vigas ensaiadas apresenta uma média de 55,62 MPa para a resistência à flexão, sendo o valor mínimo e máximo obtido de 36,38 MPa, viga R4, e 73,14 MPa, viga R5, respetivamente. Analisando os valores alcançados para as resistências à flexão e os módulos de elasticidade do Quadro 5.1, verificamos que existe relação entre estas duas propriedades. As resistências à flexão mais baixas acontecem em vigas com módulos de

elasticidade mais baixos e as resistências à flexão mais altas acontecem em vigas com módulos de elasticidade mais altos.

Em geral a rotura das vigas teve um carácter frágil, sendo rápida a propagação das fendas, não sendo por isso facilmente perceptível localizar o início da rotura. No entanto, observando a configuração final de cada viga após a rotura, podemos indicar que na maioria das vigas o início da rotura ocorreu em zonas com presença de nós e/ou medula de dimensão considerável ou em grande número. Observando o Quadro 5.2, podemos verificar que os valores de tensão de rotura obtidos pelos ensaios variam ainda substancialmente, contudo tendo em conta a variação de módulos de elasticidade médios das vigas, a oscilação dos valores de tensão de rotura seria esperada. No Quadro 5.3 seguinte indica-se por viga, o início provável da rotura com base na observação da configuração final de rotura.

Quadro 5.3 – Início provável da rotura de cada viga ensaiada

Viga N°	Início provável da rotura
R1	Presença de nós de grande dimensão a 80cm e 145cm do topo na lamela inferior
R2	Presença de nó de grande dimensão a 50cm do topo na lamela inferior
R3	Presença de nó a 80cm do topo na lamela inferior
R4	Presença de diversos nós a meio vão nas duas lamelas inferiores
R5	Presença de nós a 200cm do topo nas duas lamelas inferiores
R6	Presença de nós de grande dimensão a 150cm e 160cm do topo na lamela inferior
R7	Presença de medula e nós a 160cm e 170cm do topo nas duas lamelas inferiores
R8	Presença de nós de grande dimensão a 120cm e 150cm do topo na lamela inferior
R9	Presença de medula e nós a 170cm do topo nas duas lamelas inferiores
R10	Presença de medula e nós de grande dimensão a 120/140/150/170cm do topo nas duas lamelas inferiores

Do apresentado no Quadro 5.3 constata-se que as roturas das vigas fabricadas ocorreram sempre associadas à presença de nós e/ou medula nas lamelas. Um dos princípios associados ao fabrico de MLC é a eliminação/redução de defeitos da madeira como, nós, bolsas de resina ou medula. A execução de elementos de MLC com base em lamelas isentas de defeitos, através da execução de *Finger Joints*, como descrito no subcapítulo 2.5.2, pode melhorar ainda mais os valores obtidos para as propriedades mecânicas da MLC.

5.3.2. Correlação entre resistências à flexão e módulos de elasticidade

Com a obtenção dos resultados dos ensaios de flexão destrutivos, realizaram-se correlações simples entre a resistência à flexão das vigas com os módulos de elasticidade obtidos pelos modelos numéricos e pelos ensaios estáticos não destrutivos. Na Figura 5.7 apresentam-se estas correlações.

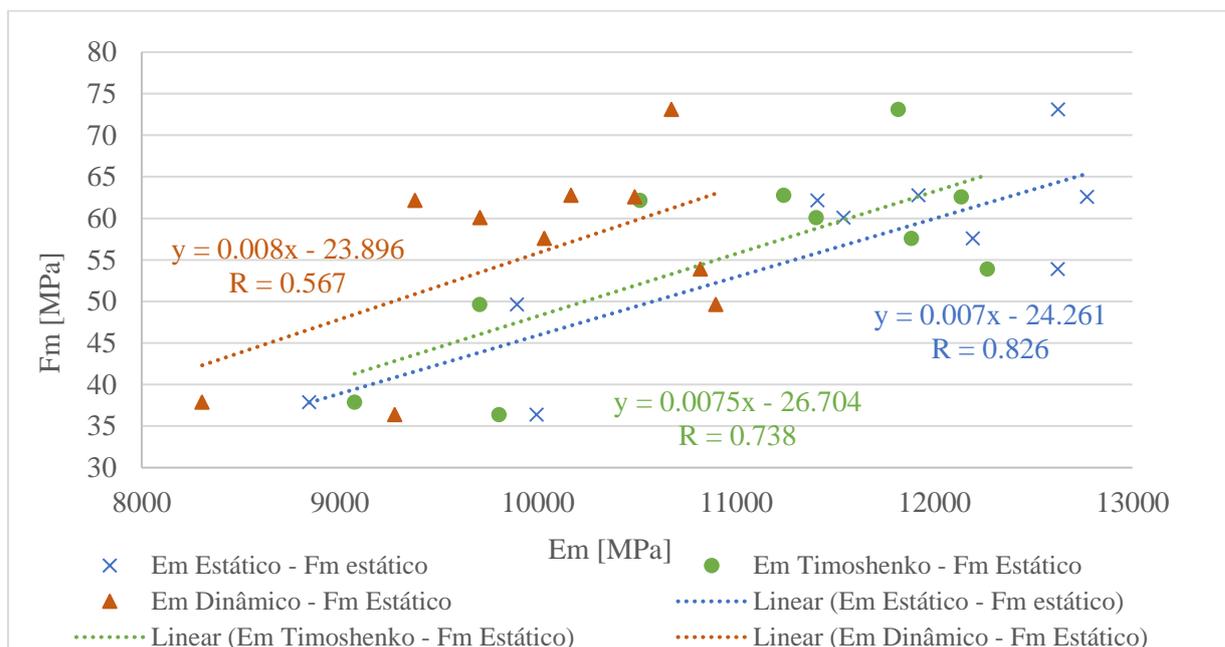


Figura 5.7 – Correlações entre resistência à flexão e módulos de elasticidade

A correlação obtida entre a resistência à flexão das vigas e os módulos de elasticidade estáticos revela-se relativamente mais elevada (coeficiente de correlação R aproximadamente 0,83), que a correlação obtida entre a resistência à flexão das vigas e os módulos de elasticidade previstos numericamente (coeficiente de correlação R aproximadamente 0,74). Apesar de ser inferior a correlação entre módulos de elasticidade previstos e resistência à flexão demonstra a relativa boa relação entre estas duas propriedades resistentes das vigas.

5.4. Avaliação da qualidade de colagem

O Quadro 5.4 diz respeito aos resultados obtidos nos ensaios de corte efetuados aos provetes, assim apresentam-se os valores médios obtidos por provete das tensões resistentes ao corte e a percentagem de rotura pela madeira.

Quadro 5.4 - Valores médios da tensão de corte pela linha de cola e rotura pela madeira.

Provete	Tensão de corte f_v [MPa] – Rotura pela linha de cola	Percentagem de rotura pela madeira [%]
	Média provete	Média provete
V1C1	10,0	97,5
V1C2	9,7	95,0
V2C1	9,7	100,0
V3C2	9,5	97,5
V4C1	8,5	98,8
V4C2	9,9*	100,0
V5C1	10,4	100,0
V5C2	10,9	100,0
V6C1	9,8	98,8
V6C2	10,1	100,0
V7C2	9,3	96,3
V8C1	10,6	100,0
V8C2	9,2	98,8
V9C1	8,6*	100,0
V9C2	8,4	100,0
V10C1	9,2	100,0
V10C2	8,7	98,8

Nota: * - Valores médios desprezando valores de lamelas afetadas por defeitos

O gráfico apresentado na Figura 5.8 mostra a dispersão de resultados obtidos nos ensaios de corte bem como uma linha representadora dos requisitos mínimos normativos.

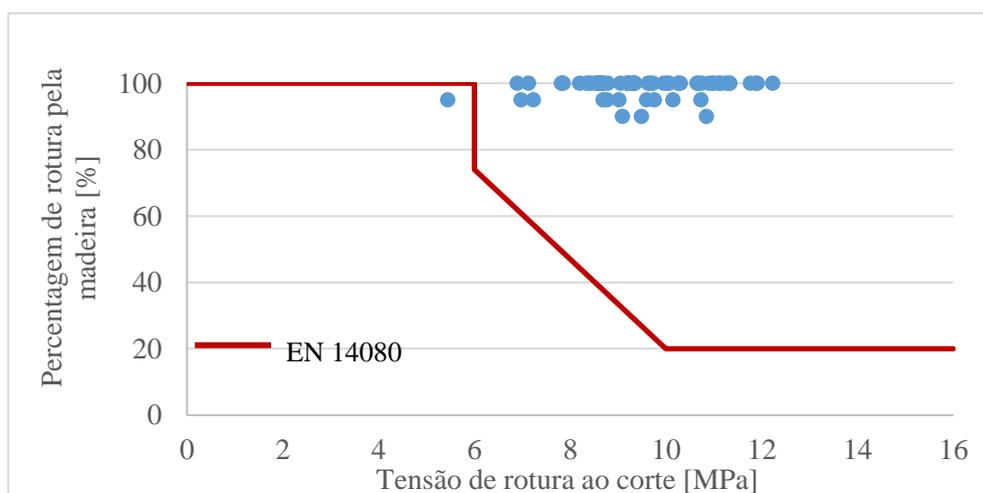


Figura 5.8 – Nuvem de resultados individuais obtidos para tensões de corte e percentagens de rotura pela madeira

A percentagem mínima de rotura pela madeira a respeitar segundo a norma EN 14080 (CEN, 2013), depende do resultado obtido para a resistência ao corte. Assim, verificando os requisitos mínimos a cumprir quer em termos individuais por cada linha de cola, quer em termos de valores médios por provete, e os resultados obtidos, verificamos que apenas uma linha de cola (individual), não cumpre. Contudo, a linha de cola cujo valor de percentagem de rotura pela madeira não cumpriu os mínimos, linha de cola nº3 do provete V4C2, revela-se afetada pela presença de um nó numa das lamelas adjacentes à linha de cola pelo que não deve ser considerada na análise.

O Quadro 5.5 diz respeito aos resultados obtidos nos ensaios de delaminação efetuados aos provetes, assim apresentam-se os valores por cada ciclo da delaminação total de cada provete e da delaminação máxima registada numa das linhas de cola do provete.

Quadro 5.5 - Valores da delaminação total e máxima por provete e por ciclo

Provete	2º Ciclo		3º Ciclo	
	Delaminação Total [%]	Delaminação Máxima [%]	Delaminação Total [%]	Delaminação Máxima [%]
V1D1	1,5	6,1	1,7	6,6
V1D2	0,0	0,0	0,6	2,5
V2D1	1,1	4,5	1,0	4,1
V3D2	0,0	0,0	0,4	1,4
V4D1	2,5	10,2	3,0	12,2
V4D2	0,0	0,0	1,3	3,4
V5D1	2,2	7,2	2,8	9,4
V5D2	2,5	9,9	2,6	10,2
V6D1	0,0	0,0	0,0	0,0
V6D2	1,3	2,9	1,4	3,0
V7D2	0,0	0,0	0,0	0,0
V8D1	0,0	0,0	0,3	1,4
V8D2	0,0	0,0	0,0	0,0
V9D1	0,0	0,0	0,0	0,0
V9D2	0,5	1,8	0,8	3,4
V10D1	1,4	2,8	2,6	3,9
V10D2	2,8	11,3	4,3	12,1

Dos resultados obtidos nos ensaios de delaminação aos provetes, podemos verificar que o valor máximo de delaminação total que a norma EN 14080 (CEN, 2013) impõe, de 5% após o segundo ciclo e de 10% após o terceiro ciclo, não foi ultrapassado em nenhum provete para ambos os ciclos como constata o Quadro 5.5 deste documento. Os máximos registados de 2,8% após o segundo ciclo e de 4,3% após o terceiro ciclo, ficaram bem abaixo dos limites.

Pelos resultados alcançados após o 2º ciclo, podemos inferir que de fato a execução do ciclo adicional (3º ciclo) não seria necessária, contudo em contexto de investigação o mesmo foi realizado de forma a perceber o seu efeito. Quanto aos valores obtidos para a delaminação máxima, isto é, valor da linha de cola com maior delaminação por provete, o valor máximo de 30% imposto pela norma EN 14080 (CEN, 2013) não foi ultrapassado em nenhum provete.

Os resultados obtidos em ambos os ensaios, de corte e de delaminação, atestam a qualidade e integridade das linhas de cola.

5.5. Comparação entre resultados experimentais e modelos numéricos das propriedades resistentes

5.5.1. Módulos de elasticidade

Apresentam-se no Quadro 5.6, os valores obtidos nos ensaios experimentais e os valores obtidos pelos modelos numéricos considerados, para os módulos de elasticidade.

Quadro 5.6 – Comparação entre valores obtidos para os módulos de elasticidade

Viga Nº	Módulos de elasticidade [MPa]			
	Dinâmico Média Lamelas	Estático	Modelo Timoshenko	Modelo Anexo B EC5
R1	10489	12771	12136	12136
R2	9380	11410	10514	10514
R3	10167	11920	11241	11241
R4	9277	9993	9804	9804
R5	10674	12625	11819	11819
R6	10820	12624	12268	12268
R7	9707	11543	11404	11404
R8	10898	9894	9706	9706
R9	8305	8845	9074	9074
R10	10032	12195	11885	11885

Do quadro anterior podemos verificar que os valores obtidos pelos dois modelos numéricos são iguais. Tendo em conta que o parâmetro γ toma o valor de 1 para ligações por colagem entre lamelas, o valor da rigidez de flexão obtido para ambos os modelos é o mesmo, resultando em módulos elasticidade iguais.

Realizando uma comparação viga a viga, podemos verificar que com exceção da viga R9, os valores estáticos são sempre ligeiramente superiores aos dados pelos modelos numéricos, revelando assim uma tendência conservativa nos resultados obtidos numericamente. Este fato, poderá estar relacionado com o aparelhamento lateral das vigas. Nos cálculos dos modelos numéricos está implícita a utilização dos módulos de elasticidade dinâmicos obtidos para cada lamela individualmente, antes da montagem da viga e posterior aparelhamento lateral. No subcapítulo 5.2 podemos verificar que os módulos de elasticidade global estáticos, na generalidade aumentam com o aparelhamento lateral das vigas. Do Quadro 5.6 verifica-se ainda uma diferença média de 15% entre os módulos de elasticidade dinâmicos médios das lamelas e os módulos de elasticidade estáticos.

Na Figura 5.9 apresenta-se um gráfico de dispersão onde se demonstra a correlação existente entre os módulos de elasticidade obtidos pelos modelos numéricos e pelos ensaios estáticos.

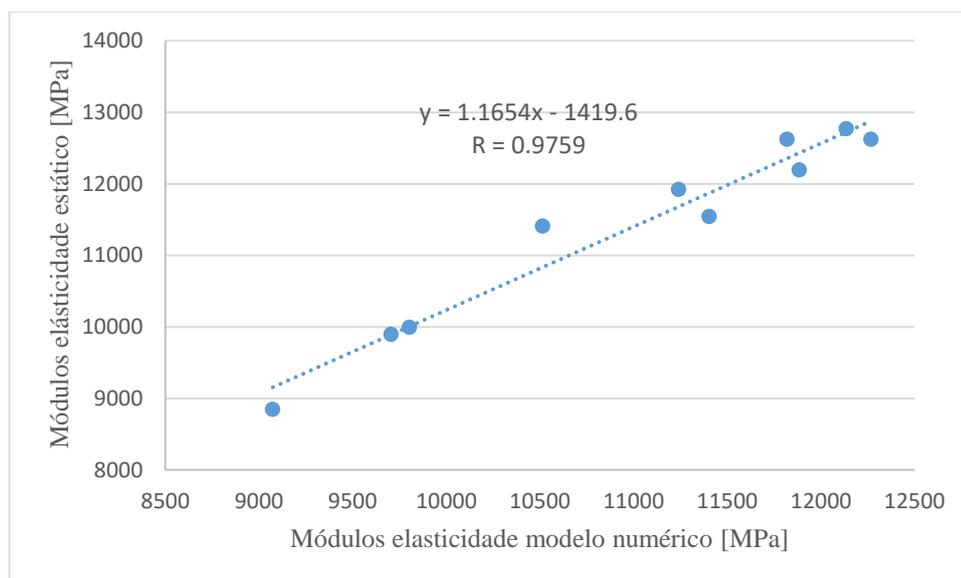


Figura 5.9 – Correlação entre valores de módulos de elasticidade obtidos pelos modelos numéricos e pelos ensaios estáticos

Analisando a Figura 5.9, verifica-se que a correlação existente entre os módulos de elasticidade é elevada, resultando num coeficiente de correlação R de 0,98. A correlação alcançada, que podemos considerar elevada, indica-nos que a utilização dos modelos numéricos segundo Timoshenko ou segundo o Anexo B do EC5, conseguiu prever com elevada assertividade os módulos de elasticidade estáticos das vigas ensaiadas neste trabalho, mesmo considerando a viga em que a distribuição de módulos de elasticidade dinâmicos foi invertida.

O resultado alcançado para o coeficiente de correlação R, da correlação apresentada na Figura 5.9, é superior aos resultados alcançados em correlações similares efetuadas em estudos realizadas por Lee *et al* (2005) e Kandler *et al* (2015), utilizando outros métodos para prever os módulos de elasticidade. Lee *et al* (2005) e Kandler *et al* (2015) obtiveram coeficientes de correlação R, respetivamente de 0,90 e 0,93.

5.6. Utilização de dois tipos de colas

Comparando resultados entre as vigas R2 e R3, fabricadas com o tipo de cola PRF e a viga R7, fabricada com o tipo de cola MUF, que têm massas volúmicas e módulos de elasticidade aproximados, podemos verificar a não existência de discrepância de valores entre elas. Quer relativamente aos resultados dos ensaios de corte e delaminação, quer aos resultados dos ensaios estáticos destrutivos e não destrutivos, existe coerência entre resultados para ambos os tipos de colas. Tendo em conta estes resultados, podemos afirmar que o uso de diferentes tipos de colas, neste caso PRF e MUF não influencia a previsão das propriedades mecânicas, módulo de elasticidade e tensão máxima à flexão, desde que seja aplicada a correta quantidade de cola e pressão de aperto no fabrico das vigas.

5.7. Comparação de resultados entre vigas constituídas apenas por choupo e viga mista choupo-pinho

Ao comparar as vigas constituídas apenas por choupo com a viga choupo-pinho, observamos que existe coerência nos resultados obtidos para ambos os tipos de vigas, quer relativamente aos ensaios de corte e delaminação, quer relativamente aos ensaios estáticos destrutivos e não destrutivos. Contudo na realização dos ensaios estáticos a estes dois tipos de vigas, foi possível identificar uma diferença no comportamento entre os dois tipos de vigas, no que diz respeito ao deslocamento vertical a meio vão e à carga de rotura. A Figura 5.10 apresenta um gráfico carga vs. deslocamento do embolo do atuador hidráulico, relativo a 3 vigas ensaiadas com módulos de elasticidade e massas volúmicas semelhantes. Comparando, a viga mista choupo-pinho (R6), a verde na Figura 5.10, apresentou deslocamento e carga última menores que as vigas R1 e R5, a azul e vermelho respetivamente, na Figura 5.10, vigas constituídas apenas por choupo.

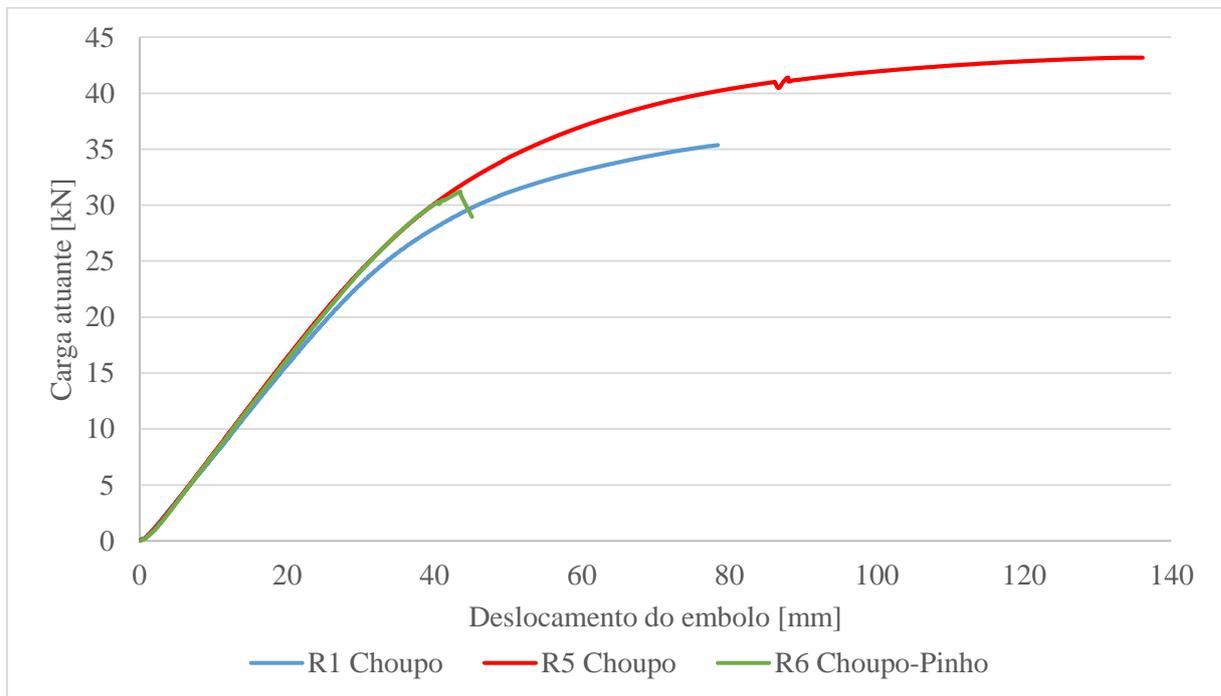


Figura 5.10 – Gráfico Carga vs. Deslocamento para as vigas R1, R5 e R6

É perceptível no gráfico da Figura 5.10 a diferença de comportamentos entre vigas, nomeadamente a diferença do patamar de cedência da viga R6, em relação às outras vigas, o permite concluir que existe diferença entre as duas espécies, choupo e pinho quanto à ductilidade, sendo o choupo mais dúctil que o pinho.

6. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

6.1. Conclusão

É de extrema importância que um construtor tenha garantias da qualidade do material que aplica em obra e se o mesmo cumpre ou não o requisitado em projeto. O produto MLC não é exceção, dessa forma a previsão das propriedades mecânicas é fundamental no fabrico de elementos de MLC. Assim, a utilização de métodos não destrutivos para prever as propriedades mecânicas da MLC assume um caráter relevante, facilitando o dimensionamento de elementos estruturais de MLC, permitindo assim uma melhor otimização da matéria-prima à disposição dos fabricantes de MLC.

Este trabalho teve como objetivo analisar o uso de dois modelos numéricos, um segundo Timoshenko e outro segundo o método apresentado pelo Anexo B do EC5, quanto à sua capacidade de previsão das principais propriedades mecânicas da MLC, nomeadamente o módulo de elasticidade. De forma a poder efetuar a comparação entre resultados obtidos pelos modelos numéricos e resultados obtidos experimentalmente, fabricaram-se 10 vigas com disposições diferentes de módulos de elasticidade ao longo da sua seção transversal. Além da própria comparação de resultados, outras variáveis foram consideradas no fabrico das vigas, como o uso de dois tipos de colas e a realização de vigas mistas. Tendo em conta os resultados obtidos por este trabalho exploratório, é possível retirar algumas conclusões.

Os módulos de elasticidade dinâmicos das vigas, obtido pela média dos módulos de elasticidade dinâmicos individuais das lamelas que compõem cada viga, são em média cerca de 15% inferiores aos módulos de elasticidade alcançados pelos ensaios estáticos às vigas.

Em vigas cuja disposição dos módulos de elasticidade na sua seção transversal é “invertida”, colocando lamelas com módulo de elasticidade maior no interior da seção e com módulo de elasticidade menor no exterior da seção, os resultados dados pelo equipamento de classificação não destrutiva não identificam a disposição adotada, revelando a incapacidade do equipamento em dar resultados coerentes no caso de se adotar uma disposição anormal. Quanto aos modelos numéricos utilizados, comparando os resultados obtidos para esta viga com as restantes vigas, os mesmos aparentam ser coerentes, demonstrando que a modelação não é afetada pela disposição adotada.

A utilização de colas estruturais diferentes no fabrico de MLC, desde que devidamente aplicada uma adequada pressão de aperto, não aparenta ter influência nos resultados obtidos para as tensões máximas resistentes à flexão, visto a viga R7, cuja colagem foi efetuada com uma cola estrutural diferente das outras, não apresentar valores desfasados, sendo assim possível modelar da mesma forma vigas fabricadas com colas diferentes.

Os resultados obtidos para a viga R6, viga mista Pinho-Choupo, apresenta valores coerentes quando comparados com os restantes resultados obtidos para vigas constituídas apenas por choupo, indicando que a modelação de vigas mistas pode ser efetuada da mesma forma que a modelação de vigas constituídas por uma só espécie. Tendo em conta que os modelos numéricos necessitam dos módulos de elasticidade dinâmicos das lamelas, para obter resultados, apenas se deve ter em atenção a necessidade de considerar os parâmetros relativos a cada espécie, na classificação não destrutiva.

Relativamente à previsão do módulo de elasticidade, ambos os modelos numéricos apresentam a mesma previsão. Tal deve-se ao fato de os dois métodos terem em parte o mesmo fundamento teórico, resultando que ao considerar o parâmetro γ igual a 1 no método segundo o Anexo B do EC5, as equações de ambos os modelos se tornem semelhantes. Os resultados obtidos pelos modelos numéricos relativamente a módulos de elasticidade são em média cerca de 3% inferiores aos registados pelos ensaios estáticos, o que pode estar relacionado com o fato de a classificação não destrutiva, cujos valores de módulo de elasticidade são introduzidos nos modelos, ter sido realizada a lamelas que só apenas após a montagem foram aparelhadas lateralmente. Ainda assim a correlação obtida entre valores previstos e obtidos estaticamente é elevada, comprovando a assertividade dos métodos considerados.

Dos resultados dos ensaios de flexão destrutivos, foi possível realizar correlações simples com alguns módulos de elasticidade obtidos quer por ensaios não destrutivos quer por ensaios destrutivos. Dessas correlações, e comparando principalmente com os resultados estáticos, podemos verificar a clara relação que existe entre duas propriedades da MLC, o módulo de elasticidade e a resistência à flexão. A correlação entre módulos de elasticidade obtidos pelo modelo segundo Timoshenko e a resistência à flexão, relativamente alta, de R igual a 0,74, vaticina a possibilidade de conseguir relacionar as duas propriedades de forma a se alcançar a resistência à flexão de uma viga de MLC sem ter a necessidade de a inutilizar pela via de ensaio destrutivo.

6.2. Trabalhos Futuros

O estudo realizado deve ser consolidado através de um trabalho que ensaie um maior número de vigas, com utilização de diferentes espécies de forma a tornar mais seguros e fiáveis os resultados alcançados. Além de uma amostra maior, outros pontos/variáveis sugerem-se ser analisados como evolução/continuação deste trabalho: i) estudo de um modelo que relacione os módulos de elasticidade obtidos segundo Timoshenko com a resistência à flexão com o intuito de conseguir prever a resistência à flexão; ii) utilização de *finger-joints* de forma a possuir elementos de madeira limpos, sem defeitos naturais, para analisar o seu efeito; iii) fazer variar o parâmetro γ do modelo numérico do Anexo B do eurocódigo, de forma a tentar alcançar melhores resultados com este método; iv) estudar métodos de análise e reparação de vigas de MLC em estado de rotura, com o intuito de conseguir prever as suas capacidades resistentes.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almeida, S. M. T. (2013). “Pontes Pedonais em Madeira Lamelada Colada – Caracterização, Dimensionamento, Patologia e Conservação”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, Portugal.

Cachim, P. B. (2014). “Construção em Madeira – A madeira como material de construção”. Publindústria, Edições Técnicas, Porto

Castro G. e Paganini F. (2003). “Mixed glued laminated timber of poplar and Eucalyptus grandis clones”. Holz als Roh-und Werkstoff 61, 291-298, Springer-Verlag

CEN (2004). “EN 384 – Structural Timber: Determination of characteristic values of mechanical properties and density”. European Committee for Standardization, Brussels.

CEN (2012). “EN 408 – Timber Structures – Structural timber and glued laminated timber – Determination of some physical and mechanical properties”. European Committee for Standardization, Brussels.

CEN (2004). “EN 1995-1-1 – Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings”. European Committee for Standardization, Brussels.

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

CEN (2002). “EN 13183-2 – Moisture content of a piece of sawn timber – Part 2: Estimation by electrical resistance method”. European Committee for Standardization, Brussels.

CEN (2013). “FprEN 14080 – Timber structures – Glued laminated timber and glued solid timber – Requirements”. European Committee for Standardization, Brussels.

CEN (2011). “EN 14081-1 – Timber structures – Strength graded structural timber with rectangular cross section – Part 1: General requirements”. European Committee for Standardization, Brussels.

Chrisp, T. M., Cairns, J. e Gulland, C. (2003). “The development of roundwood timber pole structures for use on rural community technology projects”. *Construction and Building Materials*, vol.17, 269-279.

Cruz, H. (2007). “Estruturas de madeira lamelada colada em Portugal. Instrumentos para a garantia de qualidade”. *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas*, Série II, 1.

Dias, A. M. A. (2016). “Influência da fase de tratamento na qualidade de colagem de madeira de Pinheiro Bravo”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal.

Fink, G., Frangi, A. And Kohler, J. (2015). “Probabilistic approach for modelling the load-bearing capacity of glued laminated timber”. *Engineering Structures* 100, 751 - 762

Gaspar, F. J. M. (2006). “Estruturas de madeira lamelada-colada – Viabilidade da utilização da madeira de Pinheiro de Pinho bravo tratada com produto preservador”. Dissertação de mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.

Gaspar, F. J. M. (2010). “Avaliação da integridade de estruturas de madeira lamelada colada em serviço”. Tese de Doutoramento, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal.

Gere, J.M. e Timoshenko, S.P. (1997). “Mechanics of Materials”. 4ª Edição, PWS Publishing Co., Boston, USA.

Júnior, C. C. e Dias, A. A. (1997). “Utilização da madeira em construções rurais”. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol.1, 71-77, Campina Grande, Brasil.

Kandler, G., Füssl, J., Serrano, E. e Eberhardsteiner, J. (2015). “Effective stiffness prediction of GLT beams based on stiffness distributios of individual lamellas”. *Journal of Wood Science and Technology* 49, 1101-1121, Springer-Verlag.

Lampreia, N. (2010). “Utilização de promotores de adesão no fabrico de estruturas de madeira lamelada colada de Pinho Bravo”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico de Lisboa, Lisboa, Portugal.

Lee, J. J., Park, J. S., Kim, K. M. e Oh, J. K. (2005). “Prediction of bending properties for structural glulam using optimized distributions of knot characteristics and laminar MOE”. *Journal of Wood Scince* 51, 640-647, Springer-Verlag.

Negrão, J. H. (2011). “Estruturas de madeira em Portugal – Presente e passado recente”. CIMAD 11 – 1º Congresso Ibero-LatinoAmericano da Madeira na Construção, Coimbra, Portugal.

Pontífice de Sousa, P. M. (1987). “Estruturas de Madeira Lamelada Colada. Viabilidade da sua utilização em Portugal”. Relatório 41/87 – NCCT, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

Szücs, C. A., Terezo, R. F., Valle, A. e Moraes, P. D. (2015). “Estruturas de Madeira”. Versão 3, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.

Williamson, T. G. e Yeh, B. (2007). “Standard practice for the derivation of design properties of structural glued laminated timber in the United states”. International Council for Research and Innovation in Building and Construction – Workin Commission W18 – Timber Structures, Meeting Forty, Slovenia