



UNIVERSIDADE D
COIMBRA



Carlos Eduardo de Jesus Martins

AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DE
ELEMENTOS DE MADEIRA LAMELADA
COLADA

Tese no âmbito do doutoramento em Engenharia Civil, especialidade de Estruturas, orientada pelo Professor Doutor Alfredo Manuel Pereira Geraldes Dias e pela Doutora Helena Maria Pires Cruz e apresentada ao Departamento de Engenharia Cívica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Outubro de 2018

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DE ELEMENTOS DE MADEIRA LAMELADA COLADA

Carlos Eduardo de Jesus Martins

Tese no âmbito do doutoramento em Engenharia Civil, especialidade de Estruturas orientada pelo Professor Doutor Alfredo Manuel Pereira Geraldês Dias e Doutora Helena Maria Pires Cruz e apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Outubro de 2018



UNIVERSIDADE D
COIMBRA



*“A melhor época para plantar uma árvore foi há 20 anos atrás;
o segundo melhor tempo é agora”*

Provérbio Chinês

*“Nas grandes batalhas da vida, o primeiro passo para a vitória é o desejo de
vencer!”*

Mahatma Gandhi

*“Assim como os pássaros, precisamos aprender a superar os desafios que nos são
apresentados, para alçarmos voos mais altos”*

Dirk Wolter

AGRADECIMENTOS

Após 4 anos de dedicação a este trabalho, gostaria de agradecer às pessoas e entidades que de algum modo contribuíram para a concretização desta tese, em particular:

Às instituições:

- Fundação para a Ciência e Tecnologia pelo financiamento concedido através da bolsa de investigação com a referência: PD/BD/52656/2014;
- SerQ – Centro de Inovação e Competências da Floresta, pelas condições disponibilizadas para realizar todo o trabalho experimental;
- Universidade de Coimbra, em particular ao Departamento de Engenharia Civil, instituição que me acolheu para desenvolver a investigação;
- ISISE - *Institute for Sustainability and Innovation in Structural Engineering*, unidade de investigação na qual me integro e à qual agradeço o apoio concedido, nomeadamente através de licença do *software* Abaqus CAE e do extensómetro mecânico para realização dos ensaios de tração;

Aos orientadores:

- Professor Doutor Alfredo Dias pela orientação e pela disponibilidade em garantir sempre as condições necessárias à realização de todo o trabalho;
- Doutora Helena Cruz pela orientação e disponibilidade em esclarecer qualquer dúvida, transmitindo a vasta experiência que possui no tema;

Aos professores e colegas:

- Doutor Jorge de Brito (diretor do Programa Doutoral Eco-CoRe) e Doutor João Ramôa Correia enquanto pela incessante disponibilidade para aceder aos meus pedidos de aquisição de material para realizar as atividades relacionadas com o trabalho desenvolvido.
- Doutor João Negrão e Doutor Florindo Gaspar pela análise detalhada que realizaram ao Projeto de Tese, partilhando informação relevante e que dentro do possível foi tida em conta;
- Doutora Sandra Monteiro pela amizade e ajuda na realização dos ensaios experimentais de caracterização mecânica de madeira limpa à tração e compressão;
- Engenheira Nádia Lampreia pela partilha de informação e esclarecimento de dúvidas relacionadas com o trabalho por ela realizado;
- Engenheiro António Silva pela partilha de informação relativa aos ensaios de delaminação;

-
- Doutor Hélder Craveiro pela ajuda no desenvolvimento do modelo numérico e no esclarecimento de dúvidas que surgiram na utilização do *software* Abaqus CAE;
 - Engenheiro Pedro Santos pela partilha de ideias durante a realização dos trabalhos experimentais e à Engenheira Cátia Antunes pela ajuda no tratamento dos dados da monitorização dos provetes envelhecidos;
 - Doutor Telmo Morgado pela partilha de experiência na área da produção de madeira lamelada colada;
 - Engenheiro André Dias e Engenheiro Romeu Santos enquanto orientandos, pela troca de ideias;

Às organizações e entidades:

- Laboratório Nacional de Engenharia Civil pelo empréstimo do dispositivo que me possibilitou a realização dos ensaios de corte.
- Pedrosa e Irmãos Lda, na pessoa do Eng^o Nelson Pedrosa, pelo fornecimento da matéria-prima utilizada no presente trabalho sem a qual o trabalho não teria sido possível;
- Colquímica, na qualidade do Sr. Camilo Baptista, pelo fornecimento de cola MUF
- Dynea SA, particularly to Mr. Steinar Skogholt by providing the PRF, EPI and MUF adhesives and by the technical assistance;
- Henkel, particularly to Mr. António Lourenço and Dr. Christian Lehringer by providing the PUR adhesives and the primer and by the technical assistance;
- Azorina, na pessoa da Senhora Maria da Conceição Rodrigues e Grupo Marques, na pessoa do Eng^o Roberto Amaral, pela colaboração com o fornecimento de madeira de Criptoméria;

Aos amigos:

- Aos amigos de infância que me acompanharam não só nos últimos anos, mas ao longo de uma vida e com que pude contar sempre que necessário;
- Aos amigos de faculdade com quem partilhei momentos que ficam eternizados;
- Ao Sr. David Rodrigues, à Dulce Marques, ao Nuno Almeida e ao Ricardo Oliveira, à Maria José, Ilídio Santos e Edmundo Pais pela amizade e disponibilidade em ajudar sempre que necessário;
- Aos colegas do SerQ, pela partilha de momentos de convívio e apoio na execução do trabalho experimental;

À família:

Não menos importante foi o apoio incondicional prestado pela família, à qual gostaria de manifestar um profundo agradecimento aos meus pais Manuel e Helena a quem devo o que sou hoje. Ao meu irmão Luís agradeço pelo exemplo que sempre foste e pelos conselhos que foram essenciais e reveladores da experiência adquirida. A ti Xana um obrigado pela amizade.

E como a vida não se faz apenas de trabalho, durante este período a família cresceu por afinidade. Deixo assim também uma palavra de agradecimento aos meus sogros Sr. Agostinho e Dona Cristina pelo apoio que me deram, bem como à Andreia, ao Bruno, e ao pequeno, mas crescido, Tomás pela amizade e partilha de momentos.

Tal como comecei, este caminho não foi percorrido sozinho. Assim, não seria possível atingir o fim a que me propus se não tivesse tido a companhia e amizade de uma grande Mulher.

A ti Susana Carvalho dedico todo este trabalho, pois também participaste ativamente, e sem o teu apoio teria sido muito mais difícil a concretização deste objetivo. Obrigado pela força que me deste quando os resultados não eram os que eu pensava obter e pelo apoio incondicional nos momentos menos positivos deste percurso.

A todos um obrigado por terem feito parte desta longa caminhada.

Tese enquadrada no Projeto de Investigação POCI-01-0247-FEDER-017867 – OptimizedWood, financiado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), através do Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (POCI).

Cofinanciado por:



UNIÃO EUROPEIA
Fundo Europeu
de Desenvolvimento Regional

RESUMO

O objetivo principal da investigação apresentada neste documento é a avaliação de elementos de madeira lamelada colada, com particular enfoque no desempenho mecânico à flexão de vigas. Tal compreende a análise de viabilidade do uso de espécies disponíveis na floresta nacional para o fabrico de elementos estruturais de madeira lamelada colada.

As propriedades mecânicas de madeira lamelada colada encontram-se estabelecidas na EN 14080, com base em classes de resistência. O fabrico de vigas de MLC com Pinho bravo é viável, conforme reconhecido na listagem de espécies consideradas como adequadas para fabrico de MLC, incluída na EN 14080. Contudo, não existe um conhecimento aprofundado do desempenho mecânico de vigas de madeira lamelada colada em especial com as espécies Choupo e Eucalipto.

Esta investigação centrou-se numa extensa campanha experimental culminando com o desenvolvimento de um modelo numérico simplificado capaz de descrever o comportamento mecânico das vigas à flexão, nomeadamente as deformações ocorridas fora do comportamento linear elástico.

A campanha experimental foi dividida em três fases. Na primeira fase foi avaliado o desempenho da colagem de face de duas espécies: Pinheiro bravo (sem e com tratamento preservador) e Choupo. Foram considerados 4 tipos de cola com mais do que uma referência, procedendo-se à otimização do procedimento de colagem e à análise do seu desempenho através da realização de ensaios de delaminação e de resistência ao corte.

Numa segunda fase foi avaliado o desempenho das linhas de cola após envelhecimento natural. Foram expostos 42 elementos de Pinho bravo (sem e com tratamento preservador) na cobertura do SerQ. As condições ambientais de exposição foram monitorizadas, nomeadamente: temperatura, humidade relativa, precipitação, radiação solar e velocidade do vento. Após 4, 6, 9 e 18 meses de envelhecimento procedeu-se à análise da superfície dos elementos através da medição do comprimento, abertura e profundidade das delaminações ocorridas nas linhas de cola. De cada elemento foram extraídos provetes para verificar a resistência à delaminação e a resistência ao corte das linhas de cola após envelhecimento natural.

Na terceira fase foram produzidas 42 vigas de MLC subdivididas em 6 tipologias, considerando vigas de uma só espécie (21 de Choupo, 7 de Pinho e 4 de Eucalipto) e

combinação de espécies (7 de Pinho com Choupo e 3 de Eucalipto com Choupo). A matéria-prima foi alvo de caracterização não destrutiva (método da vibração longitudinal) de modo a produzir vigas com uma distribuição otimizada das propriedades. Foi igualmente considerado o uso de métodos analíticos para a previsão das propriedades mecânicas, nomeadamente o módulo de elasticidade. Seguiu-se para cada viga a caracterização não destrutiva e a realização de ensaios destrutivos para determinação do módulo de elasticidade e da resistência à flexão. Por fim, foi verificada a qualidade de colagem de cada viga. Do conjunto de dados obtidos foi conduzida a análise estatística dos resultados e estabelecidas correlações entre a caracterização não destrutiva e as propriedades mecânicas determinadas.

O desenvolvimento de um modelo numérico simplificado pretendeu desenvolver uma ferramenta capaz de estimar as propriedades elásticas das vigas (módulo de elasticidade à flexão), bem como descrever o comportamento mecânico (curva força vs deslocamento) com ajuste adequado ao observado nos ensaios experimentais. O comportamento da madeira a considerar no modelo numérico foi obtido em ensaios de caracterização do comportamento de madeira limpa à tração e à compressão.

Com o trabalho desenvolvido, espera-se que o sector do fabrico de MLC com espécies autóctones fique dotado de novos conhecimentos para dinamizar a sua implementação na construção nacional em detrimento da importação do produto final.

Palavras-chave: Madeira lamelada colada; Colagem de face; Espécies autóctones; Envelhecimento natural; Caracterização não destrutiva; Modelos analíticos; Ensaios experimentais; Modelação numérica.

ABSTRACT

The main goal of the research conducted in this thesis is the assessment of glued laminated timber (glulam) elements, particularly the mechanical behaviour of beams subjected to bending. This includes the analysis of the use of available species in the national forest for glulam production.

The mechanical properties of glulam are well established in EN 14080, based on strength classes. The use of Maritime pine for glulam production is feasible, as stated in the list of species suitable for glulam production, included in EN 14080. However, there is a lack of knowledge about the mechanical behaviour of glulam produced with Poplar or Blue Gum species.

This research focused on an extended experimental campaign which ended with the development of a simplified numerical model capable of describing the mechanical behaviour of glulam beams subjected to bending stresses, namely the non-linear displacements occurred after the typical linear elastic behaviour.

The experimental campaign was divided into three phases. In the first phase the gluing performance of face bonding was assessed for two species: Maritime pine (without and with preservative treatment) and Poplar. More than one reference of each one of four types of adhesives were considered. The gluing process was optimized and evaluated through delamination and shear strength tests.

In the second phase the performance of the glue lines after natural ageing was evaluated. In total, 42 elements of Maritime pine (without and with preservative treatment) were exposed to weathering on a flat roof of SerQ. The weather conditions were monitored, namely: temperature, relative humidity, precipitation, solar radiation and wind speed. After 4, 6, 9 and 18 months of ageing, the length, width and depth of delaminations occurred on the surfaces were measured. From each element, several test specimens were cut to check the delamination resistance and the shear strength of the glue lines after the time of exposure.

In the third phase, 42 glulam beams were produced in laboratory conditions, divided into 6 different types, including beams of a single species (21 of Poplar, 7 of Maritime pine and 4 of Blue Gum) and species combination (7 of Maritime pine and Poplar and 3 of Blue gum and Poplar). The raw material was non-destructively assessed through longitudinal

vibration in order to produce beams with an optimized distribution of lamellas properties. Analytical models were also considered for the prediction of the beams mechanical properties, namely modulus of elasticity. Non-destructive and destructive tests were performed to determine the modulus of elasticity and bending strength of each beam. Finally, the bonding performance of each beam was verified. A statistical analysis was conducted to establish correlations between the non-destructive estimation (longitudinal vibration and analytical methods) and the mechanical properties determined experimentally.

A simplified numerical model was developed as a tool to predict the elastic properties of the beams (modulus of elasticity), as well as to describe the mechanical behaviour (load vs displacement curve) with adequate adjustment to that observed in the experimental tests. The mechanical properties of wood species considered in the numerical model were obtained through compression and tension tests performed on clear wood specimens.

With the developed work, it is expected that the business sector of glulam production use the knowledge provided to implement strategies for glulam production from native species, intended for the construction market, thus decreasing the importation of the final product.

KEYWORDS: Glued laminated timber; Surface bonding; Native species; Natural ageing; Non-destructive characterization; Analytical models; Experimental tests; Numerical modelling.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	v
RESUMO	ix
ABSTRACT	xi
ÍNDICE	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS	xvii
ÍNDICE DE QUADROS	xxv
SIMBOLOGIA	xxxiii
ABREVIATURAS	xxxvii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Considerações introdutórias	1
1.2 Âmbito e objetivos	3
1.3 Estrutura da Tese	4
2 GENERALIDADES DA MADEIRA LAMELADA COLADA	7
2.1 Introdução	7
2.2 Vantagens e desvantagens da madeira lamelada-colada (MLC)	7
2.3 Acervo normativo	8
2.4 Processo de fabrico e controlo de qualidade	10
2.4.1 Processos de fabrico	10
2.4.2 Verificação da qualidade	14
2.5 Fatores que influenciam o fabrico de madeira lamelada-colada	20
2.5.1 Espécie	20
2.5.2 Colas	23
2.5.3 Pressão de aperto, quantidade de cola, condições de cura e tempo fechado	28
2.5.4 Posicionamento dos <i>finger joints</i> (FJ)	30
3 CARACTERIZAÇÃO DO DESEMPENHO DA COLAGEM DE FACE	33
3.1 Enquadramento	33
3.2 Pinheiro bravo sem tratamento (MP)	35
3.2.1 Estado da arte	35
3.2.2 Caracterização física da matéria-prima	36
3.2.3 Colas	37
3.2.4 Parâmetros de colagem e preparação das vigas	38

3.2.5	Delaminação – resultados e discussão	41
3.2.6	Resistência ao corte – resultados e discussão	54
3.2.7	Conclusões	58
3.3	Pinheiro bravo com tratamento (TMP)	61
3.3.1	Estado da arte	62
3.3.2	Caracterização física da matéria-prima	64
3.3.3	Tratamento preservador considerado	65
3.3.4	Colas	66
3.3.5	Parâmetros de colagem e preparação das vigas	66
3.3.6	Delaminação – resultados e discussão	66
3.3.7	Resistência ao corte – resultados e discussão	73
3.3.8	Influência do tratamento preservador	75
3.4	Choupo	76
3.4.1	Estado da arte	76
3.4.2	Caracterização física da madeira	78
3.4.3	Colas	78
3.4.4	Parâmetros de colagem e preparação das vigas	79
3.4.5	Delaminação – resultados e discussão	81
3.4.6	Resistência ao corte – resultados e discussão	89
3.4.7	Conclusões	91
4	INTEGRIDADE DAS LINHAS DE COLA APÓS ENVELHECIMENTO NATURAL	93
4.1	Enquadramento	93
4.2	Fabrico dos elementos	94
4.3	Condições de exposição	96
4.3.1	Localização e descrição dos elementos	96
4.3.2	Dados meteorológicos	99
4.4	Monitorização do teor de água	102
4.5	Avaliação da integridade das linhas de cola	103
4.5.1	Avaliação da superfície dos elementos	104
4.5.2	Ensaio de delaminação	109
4.5.3	Ensaio de resistência ao corte	111
4.6	Conclusões	113

5	CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE MADEIRA LAMELADA COLADA....	115
5.1	Introdução.....	115
5.2	Estado da Arte	116
5.2.1	Uso de métodos não destrutivos na predição de propriedades mecânicas.	116
5.2.2	Métodos analíticos para predição de propriedades mecânicas de vigas de madeira lamelada colada.....	119
5.3	Caracterização da matéria-prima.....	123
5.3.1	Pinheiro bravo sem tratamento	123
5.3.2	Choupo.....	124
5.3.3	Eucalipto	125
5.4	Fabrico das vigas de madeira lamelada colada	126
5.4.1	Definição da amostra e secção transversal dos elementos.....	126
5.4.2	Processo de assemblagem das vigas	127
5.5	Determinação das propriedades mecânicas.....	131
5.5.1	Caracterização não destrutiva experimental das vigas de madeira lamelada colada	131
5.5.2	Métodos analíticos de previsão das propriedades mecânicas	132
5.5.3	Ensaio estático de flexão.....	133
5.5.4	Determinação da massa volúmica e do teor de água	138
5.5.5	Análise estatística das propriedades mecânicas	138
5.5.6	Análise do comportamento mecânico das vigas	141
5.5.7	Análise de regressão linear simples	144
5.6	Avaliação da qualidade de colagem	146
5.6.1	Ensaio de delaminação	147
5.6.2	Ensaio de resistência ao corte.....	149
5.7	Conclusões	150
6	MODELAÇÃO NUMÉRICA DE VIGAS DE MADEIRA LAMELADA COLADA	153
6.1	Introdução.....	153
6.2	Estado da arte	153
6.3	Definição do modelo	156
6.3.1	Caracterização do modelo.....	156
6.3.2	Caracterização mecânica à tração – Tensão vs extensão	160
6.3.3	Caracterização mecânica à compressão – Tensão vs extensão	164

6.4	Resultados	168
6.4.1	Análise do comportamento mecânico em fase elástica (módulo de elasticidade)	168
6.4.2	Análise do comportamento em fase plástica (resistência à flexão)	170
6.4.3	Análise da plasticidade das vigas	174
6.4.4	Critério de truncagem do modelo numérico	179
6.5	Conclusões	183
7	CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	185
7.1	Conclusões	185
7.1.1	Colagem de face	185
7.1.2	Integridade das linhas de cola após envelhecimento	188
7.1.3	Caracterização mecânica de elementos de madeira lamelada colada.....	189
7.1.4	Modelação numérica através de elementos finitos	192
7.2	Desenvolvimentos futuros	193
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	195
	ANEXO A – Resultados dos ensaios de delaminação em elementos de Pinho bravo sem tratamento	205
	ANEXO B – Resultados dos ensaios de delaminação em elementos de Pinho bravo com tratamento preservador	219
	ANEXO C – Resultados dos ensaios de delaminação em elementos de Choupo	225
	ANEXO D – Resultados de ensaios de delaminação em elementos submetidos a envelhecimento natural.....	235
	ANEXO E – Resultados dos ensaios experimentais e correlação entre propriedades das vigas de madeira lamelada colada	247
	ANEXO F – Curvas força vs deslocamento: experimental vs modelo numérico	257

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Estruturas com MLC: a) Velódromo Nacional de Sangalhos, b) Complexo Escolar, Horta (Cortesia J. Negrão)	1
Figura 1.2 – Estruturas com MLC: a) Ponte pedonal, Sertã, b) Ponte rodoviária em Quiaios, Figueira da Foz (Cortesia J. Rodrigues)	2
Figura 1.3 – Distribuição percentual das espécies/grupos de espécies existentes na floresta nacional em 2010 (adaptado de ICNF, 2013)	2
Figura 2.1 – Esquema ilustrativo do processo de fabrico de MLC (adaptado de Trä, 2015)	10
Figura 2.2 – a) Perfil tipo de uma ligação de topo e b) pressão de aperto a aplicar no processo de fabrico para temperatura de 20 °C (EN 14080 (2013))	12
Figura 2.3 – Orientação das lamelas na secção transversal de uma viga de MLC: a) geral, b) para utilização na classe de serviço 3 (EN 14080 (2005))	14
Figura 2.4 – Esquema de ensaio para determinação da resistência à flexão de ligações de topo	15
Figura 2.5 – Configuração e dimensões dos provetes para determinação da resistência ao corte, EN 14080 (2013)	19
Figura 3.1 – Distribuição de massas volúmicas das lamelas pelos elementos a colar (kg/m ³)	39
Figura 3.2 – Controlo da aplicação de cola na superfície das lamelas por pesagem – Cola EPI-1	40
Figura 3.3 – Processo de montagem – aplicação de pressão	41
Figura 3.4 – Delaminação total registada após o 3º ciclo – colas do tipo PRF	43
Figura 3.5 – Delaminação média (2º e 3º ciclos) para os diferentes cenários considerados – colas do tipo MUF	45
Figura 3.6 – Delaminação média (2º e 3º ciclos) para os diferentes cenários considerados – colas do tipo EPI	47
Figura 3.7 – Disposição dos anéis de crescimento em provetes antes do ensaio de delaminação: a) elemento nº 15, b) elemento nº 42	49
Figura 3.8 – Delaminação ocorrida em provetes após o 3º ciclo do ensaio de delaminação: a) elemento nº 15, b) elemento nº 42	50
Figura 3.9 – Delaminação média (2º e 3º ciclos) para os diferentes cenários considerados – cola PUR-1+PR	51

Figura 3.10 – Disposição dos anéis de crescimento no provete D7 (elemento nº 48) após o 3º ciclo do ensaio de delaminação: a) Face 1 b) Face 2	51
Figura 3.11 – Interface de linha de cola após ensaio de resistência ao corte para análise da WFP (cola branca – aplicação de mistura para evidenciar lenhina)	54
Figura 3.12 – Interface de linha de cola após ensaio de resistência ao corte para análise da WFP (cola PRF)	55
Figura 3.13 – Resultados da resistência ao corte e percentagem de rotura pela madeira para todas as colas (valores individuais) – Pinho bravo sem tratamento	58
Figura 3.14 – Delaminação total (valores médios) após o 2º ciclo em função do tempo fechado	59
Figura 3.15 – Comparação entre métodos de determinação de teor de água (higrómetro de agulhas vs EN 13183 - 1)	65
Figura 3.16 – Delaminação total registada após o 3º ciclo para as diferentes colas consideradas – amostra TMP	68
Figura 3.17 – Delaminação coincidente com anéis de crescimento dispostos horizontalmente: a) elemento nº13 – D3; b) elemento nº 14-D2	69
Figura 3.18 – Evolução da delaminação total (valores médios) após o 2º ciclo em função do tempo fechado – amostra TMP	70
Figura 3.19 – Provete TMP03 – D1: a) antes de ensaio de delaminação; b) após 3º ciclo com delaminação localizada junto a anéis de crescimento dispostos horizontalmente	70
Figura 3.20 – Delaminação registada no elemento B após o 3º ciclo: a) provete D1 – face 1; b) provete D2 – face 2	72
Figura 3.21 – Delaminação registada no elemento T_19 após o 3º ciclo: a) provete D2 – face 1; b) provete D3 – face 1	73
Figura 3.22 – Resultados da resistência ao corte e percentagem de rotura pela madeira para todas as colas (valores individuais) – TMP	75
Figura 3.23 – Distribuição de massas volúmicas das lamelas pelos elementos de Choupo (kg/m^3)	80
Figura 3.24 – Aplicação de cola manual através de espátula denteada – Cola EPI-1	80
Figura 3.25 – Delaminação total registada após o 3º ciclo para os diferentes cenários considerados – colas PRF	83
Figura 3.26 – Delaminação total registada após o 3º ciclo para os diferentes cenários considerados – colas do tipo MUF - Choupo	85
Figura 3.27 – Delaminação total registada após o 3º ciclo para os diferentes cenários considerados – colas do tipo EPI e PUR - Choupo	87

Figura 3.28 – Influência do tempo fechado na delaminação total após o 3º ciclo – cola do tipo PUR - Choupo	89
Figura 3.29 – Resultados da resistência ao corte e percentagem de rotura pela madeira para todas as colas (valores individuais) - Choupo	91
Figura 4.1 – Distribuição de massas volúmicas das lamelas dos elementos sujeitos a envelhecimento natural (kg/m^3)	95
Figura 4.2 – Elementos de madeira lamelada colada em envelhecimento natural	97
Figura 4.3 – Valores médios mensais de temperatura (SerQ e estação meteorológica de Moitas) e humidade relativa (SerQ e estação meteorológica de Vale Donas)	100
Figura 4.4 – Velocidade média mensal do vento, precipitação total mensal e radiação solar total mensal (estação meteorológica de Moitas)	100
Figura 4.5 – Evolução do teor de água ao longo de 12 meses de envelhecimento natural – MP_{env}	102
Figura 4.6 – Evolução do teor de água ao longo de 12 meses de envelhecimento natural – TMP_{env}	103
Figura 4.7 – Aparecimento de manchas acinzentadas na face sul dos elementos MP_{env} após 6 meses de envelhecimento	104
Figura 4.8 – Diferença de coloração em elementos MP_{env} após 12 meses de envelhecimento: a) elemento protegido com imunizador; b) elemento sem proteção	104
Figura 4.9 – Diferença de coloração em elementos TMP_{env} após 12 meses de envelhecimento: a) elemento protegido com solução aquosa; b) elemento sem proteção	105
Figura 4.10 – Comprimento de delaminação registada nas faces sul e norte (percentagem do comprimento total) para os 3 tipos de cola – elementos MP_{env}	106
Figura 4.11 – Comprimento de delaminação registada nas faces sul e norte (percentagem do comprimento total) para os 3 tipos de cola – elementos TMP_{env}	107
Figura 4.12 – Secção transversal dos provetes D1 recolhidos dos elementos TMP_{env} em exposição natural e retirados após 18 meses de envelhecimento: a) nº 28 – cola PRF-1, b) nº 30 – cola PUR-1 + PR e c) nº 32 – cola PRF-3	108
Figura 5.1 – Utilização do <i>Timber Grader</i> MTG na caracterização mecânica não destrutiva	123
Figura 5.2 – Distribuição cumulativa para o módulo de elasticidade dinâmico (tábuas e lamelas) do Pinho bravo, Choupo e Eucalipto	126
Figura 5.3 – Configurações de vigas adotadas no presente trabalho	127

Figura 5.4 – Distribuição de módulo de elasticidade dinâmico para as vigas de Choupo (BP) – cola PRF-1 e PRF-3	128
Figura 5.5 – Distribuição de módulo de elasticidade dinâmico para as vigas de Choupo (BP) – cola PUR-1+PR e MUF-2	128
Figura 5.6 – Distribuição de módulo de elasticidade dinâmico para as vigas de Pinho bravo (MP) e Pinho bravo com Choupo (HMPBP) – cola PUR-1+PR	129
Figura 5.7 – Distribuição de módulo de elasticidade dinâmico para as vigas de Eucalipto (BG) e Eucalipto com Choupo (HBGBP) – cola PUR-1+PR	129
Figura 5.8 – Viga de Choupo sob o processo de pressão – cola PRF-1	131
Figura 5.9 – <i>Layout</i> de ensaios de módulo de elasticidade e resistência à flexão	134
Figura 5.10 – Módulo de elasticidade médio à flexão e eficiência estrutural	137
Figura 5.11 – Resistência à flexão média e eficiência estrutural	137
Figura 5.12 – a) Defeito visível na lamela inferior da viga BP22, b) Nó oblíquo na lamela inferior da viga de MP4	142
Figura 5.13 – Curvas força vs deslocamento obtidas dos ensaios de flexão das vigas MP143	
Figura 5.14 – Curvas força vs deslocamento obtidas dos ensaios de flexão das vigas BP – comportamento elástico linear	143
Figura 5.15 – Curvas força vs deslocamento obtidas dos ensaios de flexão das vigas BP – comportamento não linear até à rotura	143
Figura 5.16 – Curvas força vs deslocamento obtidas dos ensaios de flexão das vigas HMPBP	144
Figura 5.17 – Curvas força vs deslocamento obtidas dos ensaios de flexão das vigas BG e HBGBP	144
Figura 5.18 – Rotura da viga BP13 não condicionada pela qualidade de colagem	148
Figura 5.19 – Rotura da viga BG2 – propagação pontual da rotura ao longo da linha de cola	2 149
Figura 5.20 – Resultados da resistência ao corte e percentagem de rotura pela madeira	150
Figura 6.1 – Viga modelada em software Abaqus (à esquerda) e pormenor da malha (à direita)	157
Figura 6.2 – Dimensões nominais (mm) dos provetes para ensaios de tração paralela às fibras	161
Figura 6.3 – Proвете de madeira limpa instrumentado para ensaio de tração paralela às fibras	162
Figura 6.4 – Tipologias de rotura observadas nos ensaios de tração	163
Figura 6.5 – Proвете de madeira limpa instrumentado para ensaio de compressão paralela às fibras	165

Figura 6.6 – Tipologias de rotura observadas nos ensaios de compressão	166
Figura 6.7 – Curva tensão vs extensão à compressão registada no provete MP7	167
Figura 6.8 – Curva tensão vs extensão obtida dos ensaios experimentais de compressão e tração para caracterização do comportamento mecânico das espécies	168
Figura 6.9 – Correlação entre valores de módulo de elasticidade (experimental e numérico)	170
Figura 6.10 – Instrumentação de viga com extensómetros dispostos na lamela de compressão e de tração	174
Figura 6.11 – Curvas força vs extensão obtidas dos ensaios experimentais e modelo numérico (tração e compressão): a) MP7; b) BP20	175
Figura 6.12 – Curvas força vs extensão obtidas dos ensaios experimentais e modelo numérico (tração e compressão): a) BP21; b) BP22	175
Figura 6.13 – Curvas força vs extensão obtidas dos ensaios experimentais e modelo numérico (tração e compressão): a) HMPBP6; b) HMPBP7	175
Figura 6.14 – Curvas força vs extensão obtidas dos ensaios experimentais e modelo numérico (tração e compressão): a) HBGBP2; b) HBGBP3	175
Figura 6.15 – Curvas força vs deslocamento obtidas dos ensaios experimentais e do modelo numérico: a) BP4; b) BP10; c) BP21; d) BP5	177
Figura 6.16 – Curvas força vs deslocamento obtidas dos ensaios experimentais e do modelo numérico: a) MP4; b) MP7	178
Figura 6.17 – Curvas força vs deslocamento obtidas dos ensaios experimentais e do modelo numérico: a) HMPBP3; b) HMPBP6	178
Figura 6.18 – Curvas força vs deslocamento obtidas dos ensaios experimentais e do modelo numérico: a) BG3; b) HBGBP1; c) HBGBP3	179
Figura E.1 – Correlações simples com o módulo de elasticidade estático ($E_{12\%}$) - 21 vigas BP: a) $E_{dyn_v_92}$; b) E_{dyn_TSM}	248
Figura E.2 – Correlações simples com o módulo de elasticidade estático ($E_{12\%}$) - 21 vigas BP: a) E_{dyn_TIMO} ; b) $\rho_{12\%}$	249
Figura E.3 – Correlações simples com a resistência à flexão (f_{m_adj}) - 21 vigas BP: a) $E_{dyn_v_92}$; b) E_{dyn_TSM} ; c) E_{dyn_TIMO} ; d) $\rho_{12\%}$; e) $E_{12\%}$	249
Figura E.4 – Correlações simples - 20 vigas BP: a) $E_{dyn_v_92}$ vs $E_{12\%}$; b) $E_{dyn_v_92}$ vs f_{m_adj}	250
Figura E.5 – Correlações simples com o módulo de elasticidade estático ($E_{12\%}$) - vigas MP: a) $E_{dyn_v_92}$; b) E_{dyn_TSM} ; c) E_{dyn_TIMO} ; d) $\rho_{12\%}$	250
Figura E.6 – Correlações simples com a resistência à flexão (f_{m_adj}) - vigas MP: a) $E_{dyn_v_92}$; b) E_{dyn_TSM}	250

Figura E.7 – Correlações simples com a resistência à flexão (f_{m_adj}) - vigas MP: a) E_{dyn_TIMO} ; b) $\rho_{12\%}$; c) $E_{12\%}$	251
Figura E.8 – Correlações simples com o módulo de elasticidade estático ($E_{12\%}$) - vigas HMPBP: a) $E_{dyn_v_92}$; b) E_{dyn_TSM} ; c) E_{dyn_TIMO} ; d) $\rho_{12\%}$	251
Figura E.9 – Correlações simples com a resistência à flexão (f_{m_adj}) - vigas HMPBP: a) $E_{dyn_v_92}$; b) E_{dyn_TSM} ; c) E_{dyn_TIMO} ; d) $\rho_{12\%}$; e) $E_{12\%}$	252
Figura E.10 – Correlações simples com o módulo de elasticidade estático ($E_{12\%}$) - vigas BG: a) $E_{dyn_v_92}$; b) E_{dyn_TSM}	252
Figura E.11 – Correlações simples com o módulo de elasticidade estático ($E_{12\%}$) - vigas BG: a) E_{dyn_TIMO} ; b) $\rho_{12\%}$	253
Figura E.12 – Correlações simples com a resistência à flexão (f_{m_adj}) - vigas BG: a) $E_{dyn_v_92}$; b) E_{dyn_TSM} ; c) E_{dyn_TIMO} ; d) $\rho_{12\%}$; e) $E_{12\%}$	253
Figura E.13 – Correlações simples com o módulo de elasticidade estático ($E_{12\%}$) - vigas HBGBP: a) $E_{dyn_v_92}$; b) E_{dyn_TSM} ; c) E_{dyn_TIMO} ; d) $\rho_{12\%}$	254
Figura E.14 – Correlações simples com a resistência à flexão (f_{m_adj}) - vigas HBGBP: a) $E_{dyn_v_92}$; b) E_{dyn_TSM} ; c) E_{dyn_TIMO} ; d) $\rho_{12\%}$	254
Figura E.15 – Correlações simples com a resistência à flexão (f_{m_adj}) - vigas HBGBP: a) $E_{12\%}$	255
Figura F.1 – Curvas força vs deslocamento obtidas dos ensaios experimentais e do modelo numérico: a) BP1; b) BP2; c) BP3; d) BP4; e) BP5; f) BP7; g) BP8; h) BP9	257
Figura F.2 – Curvas força vs deslocamento obtidas dos ensaios experimentais e do modelo numérico: a) BP10; b) BP11; c) BP12; d) BP13; e) BP14; f) BP15; g) BP16; h) BP17	258
Figura F.3 – Curvas força vs deslocamento obtidas dos ensaios experimentais e do modelo numérico: a) BP18; b) BP19; c) BP20; d) BP21; e) BP22	259
Figura F.4 – Curvas força vs deslocamento obtidas dos ensaios experimentais e do modelo numérico: a) MP1; b) MP2	259
Figura F.5 – Curvas força vs deslocamento obtidas dos ensaios experimentais e do modelo numérico: a) MP3; b) MP4; c) MP5; d) MP6; e) MP7	260
Figura F.6 – Curvas força vs deslocamento obtidas dos ensaios experimentais e do modelo numérico: a) HMPBP1; b) HMPBP2	260
Figura F.7 – Curvas força vs deslocamento obtidas dos ensaios experimentais e do modelo numérico: a) HMPBP3; b) HMPBP4; c) HMPBP5; d) HMPBP6; e) HMPBP7	261
Figura F.8 – Curvas força vs deslocamento obtidas dos ensaios experimentais e do modelo numérico: a) BG1; b) BG2;	261

-
- Figura F.9 – Curvas força vs deslocamento obtidas dos ensaios experimentais e do modelo numérico: a) BG3; b) BG4 262
- Figura F.10 – Curvas força vs deslocamento obtidas dos ensaios experimentais e do modelo numérico: a) HBGBP1; b) HBGBP2; c) HBGBP3 262

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Valores máximos de percentagem de delaminação total (adaptado da EN 14080 (2013))	17
Quadro 2.2 – Procedimento de execução dos ensaios de resistência à delaminação	18
Quadro 2.3 – Percentagem de rotura pela madeira em relação à resistência ao corte	20
Quadro 2.4 – Massa volúmica e coeficientes de retração de Choupo e Eucalipto (Castro e Paganini, 2003)	23
Quadro 3.1 – Resumo das colas e alguns dos parâmetros adotados	38
Quadro 3.2 – Resumo da delaminação total média e máxima obtida de provetes colados com colas do tipo PRF	42
Quadro 3.3 – Resumo da delaminação total (média e máxima) obtida em provetes colados com colas do tipo MUF	44
Quadro 3.4 – Resumo da delaminação total média e máxima obtida de provetes colados com colas do tipo EPI	47
Quadro 3.5 – Resumo da delaminação total média e máxima obtida de provetes colados com colas do tipo PUR-1	49
Quadro 3.6 – Resumo da delaminação total média e máxima obtida de provetes colados com colas do tipo PUR-2 e PUR-3	52
Quadro 3.7 – Resumo da delaminação total média e máxima obtida de provetes colados com colas do tipo PUR-1+PR - diferentes períodos decorridos após aplicação de primário	53
Quadro 3.8 – Resumo da resistência ao corte e WFP das linhas de cola e resistência ao corte pela madeira – colas PRF e MUF – Pinho bravo sem tratamento	56
Quadro 3.9 – Resumo da resistência ao corte e WFP das linhas de cola e resistência ao corte pela madeira – colas EPI e PUR – Pinho bravo sem tratamento preservador	57
Quadro 3.10 – Resumo dos resultados de delaminação obtidos para os melhores desempenhos das várias colas consideradas no presente estudo – Pinho bravo sem tratamento	60
Quadro 3.11 – Composição química do produto preservador TANALITH E 8001 e respetivas quantidades	66
Quadro 3.12 – Resumo da delaminação total (média e máximo) obtida de provetes colados com colas do tipo PRF, MUF e PUR – Amostra TMP	67

Quadro 3.13 – Resumo da delaminação total (média e máxima) obtida dos provetes colados com a cola MUF-1 – Amostra TMP	71
Quadro 3.14 – Resumo da resistência ao corte e WFP das linhas de cola e resistência ao corte pela madeira – Pinho bravo com tratamento	74
Quadro 3.15 – Resumo da delaminação total média (3º ciclo), resistência ao corte (linha de cola e madeira) e WFP – TMP	75
Quadro 3.16 – Resumo da delaminação total média e máxima obtida de provetes colados com colas do tipo PRF - BP	82
Quadro 3.17 – Resumo da delaminação total média e máxima obtida de provetes colados com colas do tipo MUF	84
Quadro 3.18 – Resumo da delaminação total média e máxima obtida de provetes colados com colas do tipo EPI	86
Quadro 3.19 – Resumo da delaminação total média e máxima obtida de provetes colados com colas do tipo PUR	87
Quadro 3.20 – Resumo da resistência ao corte e WFP das linhas de cola e resistência ao corte da pela madeira – Choupo	90
Quadro 4.1 – Resumo dos elementos submetidos a envelhecimento natural e condições iniciais – MP_{env}	97
Quadro 4.2 – Resumo dos elementos submetidos a envelhecimento natural e condições iniciais – TMP_{env}	98
Quadro 4.3 – Número acumulado de horas para temperatura média inferior a 15°C ou superior a 20°C, 30°C ou 35°C e humidade relativa inferior a 30% ou superior a 65%, 85% ou 95%	101
Quadro 4.4 – Resumo da delaminação total média e máxima após envelhecimento natural – MP_{env}	109
Quadro 4.5 – Resumo da delaminação total média e máxima após envelhecimento natural – TMP_{env}	110
Quadro 4.6 – Resumo da resistência ao corte e WFP das linhas de cola e resistência ao corte da pela madeira – MP_{env}	112
Quadro 4.7 – Resumo da resistência ao corte e WFP das linhas de cola e resistência ao corte da pela madeira – TMP_{env}	112
Quadro 5.1 – Resumo dos parâmetros de colagem considerados para as diversas colas	130
Quadro 5.2 – Módulo de elasticidade dinâmico das vigas determinado por vibração longitudinal (MPa)	132
Quadro 5.3 – Módulo de elasticidade dinâmico das vigas determinado através de métodos analíticos (MPa)	133

Quadro 5.4 – Resumo dos ensaios estáticos de flexão das vigas BP, MP e HMPBP (antes e depois de aparelhamento lateral) (MPa)	135
Quadro 5.5 – Resumo dos ensaios estáticos de flexão das vigas BG e HBGBP (antes e depois de aparelhamento lateral) (MPa)	136
Quadro 5.6 – Propriedades mecânicas e físicas determinadas nas vigas de choupo (BP)	140
Quadro 5.7 – Propriedades mecânicas e físicas determinadas nas vigas de Pinho bravo (MP)	140
Quadro 5.8 – Propriedades mecânicas e físicas determinadas nas vigas de Pinho bravo e Choupo (HMPBP)	140
Quadro 5.9 – Propriedades mecânicas e físicas determinadas nas vigas de Eucalipto (BG)	141
Quadro 5.10 – Propriedades mecânicas e físicas determinadas nas vigas de Eucalipto e Choupo (HBGBP)	141
Quadro 5.11 – Coeficientes de correlação entre massa volúmica e propriedades mecânicas obtidas por ensaios de flexão estática e por métodos não destrutivos	145
Quadro 5.12 – Resumo dos resultados dos ensaios de delaminação e resistência ao corte das vigas ensaiadas à flexão	147
Quadro 6.1 – Relação entre módulo de elasticidade e entre módulo de distorção e módulo de elasticidade longitudinal	158
Quadro 6.2 – Coeficientes de Poisson disponíveis na literatura	159
Quadro 6.3 – Resumo das constantes elásticas (E , G , ν) consideradas como <i>input</i> ao modelo numérico de elementos finitos	159
Quadro 6.4 – Resultados dos ensaios de tração: módulo de elasticidade e resistência à tração	162
Quadro 6.5 – Valores considerados para definição do comportamento mecânico à tração no modelo de elementos finitos	164
Quadro 6.6 – Resultados dos ensaios de compressão: módulo de elasticidade e resistência à compressão	166
Quadro 6.7 – Valores considerados para definição do comportamento mecânico à compressão no modelo numérico de elementos finitos	167
Quadro 6.8 – Módulo de elasticidade determinado pela modelação numérica e experimentalmente	168
Quadro 6.9 – Coeficientes de correlação e equações de regressão entre módulo de elasticidade ($E_{m,g_{92}}$ e E_{MEF}) determinados experimentalmente e estimados pelo modelo	169

Quadro 6.10 – Comparação de valores de tensão (experimental e modelo numérico) para o mesmo patamar de deformação – vigas MP	171
Quadro 6.11 – Comparação de valores de tensão (experimental e modelo numérico) para o mesmo nível de deformação – vigas HMPBP	171
Quadro 6.12 – Comparação de valores de tensão (experimental e modelo numérico) para o mesmo nível de deformação – vigas BP	172
Quadro 6.13 – Comparação de valores de tensão (experimental e modelo numérico) para o mesmo nível de deformação – vigas BG	173
Quadro 6.14 – Comparação de valores de tensão (experimental e modelo numérico) para o mesmo nível de deformação – vigas HBGBP	173
Quadro 6.15 – Valores máximos de força e extensão (tração e compressão) obtidos dos ensaios experimentais e do modelo numérico	176
Quadro 6.16 – Valores de tensão de flexão baseados na truncagem do modelo numérico – vigas MP	180
Quadro 6.17 – Valores de tensão de flexão baseados na truncagem do modelo numérico – vigas HMPBP	180
Quadro 6.18 – Valores de tensão de flexão baseados na truncagem do modelo numérico – vigas BP	181
Quadro 6.19 – Valores de tensão de flexão baseados na truncagem do modelo numérico – vigas BG	182
Quadro 6.20 – Valores de tensão de flexão baseados na truncagem do modelo numérico – vigas HBGBP	182
Quadro A.1 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PRF-1	205
Quadro A.2 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PRF-1 (continuação)	206
Quadro A.3 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PRF-2	206
Quadro A.4 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PRF-2 (continuação)	207
Quadro A.5 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PRF-3	207
Quadro A.6 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PRF-3 (continuação)	208
Quadro A.7 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo MUF-1	209

Quadro A.8 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo MUF-1 (continuação)	210
Quadro A.9 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo MUF-2	211
Quadro A.10 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo EPI-1	212
Quadro A.11 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo EPI-2	213
Quadro A.12 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PUR-1	214
Quadro A.13 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PUR-1+PR	215
Quadro A.14 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PUR-1+PR (continuação)	216
Quadro A.15 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com colas do tipo PUR-2, PUR-2+PR	217
Quadro A.16 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com colas do tipo PUR-3 e PUR-3+PR	217
Quadro B.1 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PRF-1	219
Quadro B.2 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PRF-1 (continuação)	220
Quadro B.3 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PRF-2	221
Quadro B.4 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PRF-3	221
Quadro B.5 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo MUF-1 (100/20 e 100/35)	222
Quadro B.6 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PUR-1 e PUR-1+PR	223
Quadro C.1 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PRF-1	225
Quadro C.2 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PRF-1 (continuação)	226

Quadro C.3 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PRF-2	226
Quadro C.4 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PRF-2 (continuação)	227
Quadro C.5 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PRF-3	228
Quadro C.6 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PRF-3 (continuação)	229
Quadro C.7 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo MUF-1 (100/20)	230
Quadro C.8 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo MUF-2	230
Quadro C.9 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo MUF-2 (continuação)	231
Quadro C.10 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo EPI-2	232
Quadro C.11 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PUR-1	233
Quadro C.12 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PUR-1+PR	233
Quadro C.13 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PUR-1+PR (continuação)	234
Quadro D.1 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PRF-1 - MP _{env}	235
Quadro D.2 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PRF-1 - MP _{env} (continuação)	236
Quadro D.3 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PRF-1 - MP _{env} (continuação)	237
Quadro D.4 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PRF-3 - MP _{env}	237
Quadro D.5 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PRF-3 - MP _{env} (continuação)	238

Quadro D.6 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PRF-3 - MP _{env} (continuação)	239
Quadro D.7 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PUR-1+PR - MP _{env}	239
Quadro D.8 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PUR-1+PR - MP _{env} (continuação)	240
Quadro D.9 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PRF-1 - TMP _{env}	241
Quadro D.10 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PRF-1 - TMP _{env} (continuação)	242
Quadro D.11 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PRF-3 adhesive - TMP _{env}	243
Quadro D.12 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PRF-3 - TMP _{env} (continuação)	244
Quadro D.13 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PUR-1+PR - TMP _{env}	245
Quadro D.14 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PUR-1+PR - TMP _{env} (continuação)	246
Quadro E.1 – Sumário de resultados dos ensaios não destrutivos e de flexão estática das vigas de Choupo (BP)	247
Quadro E.2 – Sumário de resultados dos ensaios não destrutivos e de flexão estática das vigas de Choupo (MP)	247
Quadro E.3 – Sumário de resultados dos ensaios não destrutivos e de flexão estática das vigas de Choupo (BG)	248
Quadro E.4 – Sumário de resultados dos ensaios não destrutivos e de flexão estática das vigas de Choupo (HMPBP)	248
Quadro E.5 – Sumário de resultados dos ensaios não destrutivos e de flexão estática das vigas de Choupo (HBGBP)	248

SIMBOLOGIA

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

LETRAS LATINAS MAIÚSCULAS

A	Área da secção transversal
A_i	Área da secção transversal da lamela i
C	Velocidade de propagação da onda
E_1, E_2 e E_3	Média do módulo de elasticidade dinâmico das lamelas de cada zona de rigidez
$E_{12\%}$	Módulo de elasticidade corrigido para teor de água de referência de 12%
$E_{c,0}$	Módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras
$E_{dyn,410}$	Módulo de elasticidade dinâmico obtido para massa volúmica adotada de 410 kg/m ³ , por via da vibração longitudinal
$E_{dyn,l}$	Módulo de elasticidade dinâmico da lamela por via da vibração longitudinal
$E_{dyn,l,av}$	Módulo de elasticidade dinâmico médio das lamelas por via da vibração longitudinal
$E_{dyn,t}$	Módulo de elasticidade dinâmico da tábua por via da vibração longitudinal
$E_{dyn,TSM}$	Módulo de elasticidade dinâmico estimado por via do método da secção transformada
$E_{dyn,TIMO}$	Módulo de elasticidade dinâmico estimado por via do método de Timoshenko
$E_{dyn,us}$	Módulo de elasticidade dinâmico por via de ultrassons
$E_{dyn,v,92}$	Módulo de elasticidade dinâmico da viga com largura de 92 mm por via da vibração longitudinal
$E_{dyn,v,100}$	Módulo de elasticidade dinâmico da viga com largura de 100 mm por via da vibração longitudinal
$E_{dyn,vl}$	Módulo de elasticidade dinâmico por via da vibração longitudinal
E_i	Módulo de elasticidade da lamela i
E_j	Módulo de elasticidade da lamela j

E_{MEF}	Módulo de elasticidade estimado por via do modelo numérico de elementos finitos
$E_{m,g}$	Módulo de elasticidade global
$E_{m,g,92}$	Módulo de elasticidade global de viga com 92 mm de largura
$E_{m,l}$	Módulo de elasticidade local
$E_{t,0}$	Módulo de elasticidade à tração paralela às fibras
E_w	Módulo de elasticidade com teor de água do momento do ensaio
F	Carga máxima aplicada
$F_{c,max}$	Carga máxima aplicada no ensaio de compressão paralela às fibras
$F_{t,max}$	Carga máxima aplicada no ensaio de tração paralela às fibras
F_u	Carga máxima aplicada no ensaio de resistência ao corte
G	Módulo de distorção
$(F_2 - F_1)/(w_2 - w_1)$	Relação entre força aplicada e deformação da viga
I	Momento de inércia
I_{xi}	Momento de inércia da secção transversal da lamela i em relação ao eixo x
J_x	Momento de inércia ponderado em relação ao eixo x
L	Comprimento do elemento
$S_{x,i}$	Momento estático da secção transversal da lamela i segundo o eixo x
T_i	Fator de transformação da secção

LETRAS LATINAS MINÚSCULAS

a	Distância do ponto de aplicação de carga ao apoio
b	Largura da lamela ou elemento de madeira lamelada colada
b_t	Largura da ponta
d	Diâmetro do nó junto ao entalhe
d_1, d_2 e d_3	Profundidade de cada zona de rigidez
d_j	Distância entre a lamela j e o eixo da secção transversal
$f_{b,g,l,k}$	Valor característico da resistência à flexão da viga
$f_{c,0}$	Resistência à compressão paralela às fibras
f_m	Resistência à flexão de um elemento
$f_{m,adj}$	Resistência à flexão corrigida com base nos fatores k_h e k_{th}
$f_{m,j,d,c,k}$	Resistência característica à flexão da ligação de topo
f_r	Frequência de vibração correspondente ao 1º modo
$f_{t,0}$	Resistência à tração paralela às fibras

$f_{t,lam,k}$	Valor característico da resistência à tração da madeira
f_v	Resistência ao corte
h	Altura da lamela ou elemento de madeira lamelada colada
k	Coefficiente corretivo para provetes cuja espessura seja inferior a 50 mm
k_h	Fator de ajuste da resistência à flexão que tem em consideração a altura da viga
k_{th}	Fator de ajuste da resistência à flexão que tem em consideração a espessura das lamelas
l	Vão de ensaio de viga
l_1	Distância entre pontos de medição de deformação para ensaio de módulo de elasticidade local, (mm)
l_j	Comprimento do entalhe
$l_{glueline}$	Comprimento de uma linha de cola
$l_{max,delam}$	Comprimento máximo de delaminação
l_t	Comprimento da ponta d
$l_{tot,delam}$	Comprimento total de delaminação de um provete
$l_{tot,glueline}$	Comprimento total de linhas de cola de um provete
n	Eixo neutro da secção transversal
p	Passo
r	Raio da curvatura
s	Desvio padrão
t	Espessura da lamela ou elemento de madeira lamelada colada
t_{max}	Espessura máxima da lamela
y	Distância do eixo da lamela i ao eixo neutro da secção

LETRAS GREGAS

α	Ângulo do entalhe
ε	Extensão do material
ε_c	Extensão de compressão
$\varepsilon_{c,10\%}$	Extensão de compressão correspondente a 10% da resistência à compressão
$\varepsilon_{c,50\%}$	Extensão de compressão correspondente a 50% da resistência à compressão
ε_t	Extensão de tração
$\varepsilon_{t,10\%}$	Extensão de tração correspondente a 10% da resistência à tração
$\varepsilon_{t,50\%}$	Extensão de tração correspondente a 50% da resistência à tração
ρ	Massa volúmica

$\bar{\rho}$	Média da massa volúmica
ρ_{05}	Percentil de 5% da massa volúmica
$\rho_{12\%}$	Massa volúmica para teor de água de referência de 12%
ρ_w	Massa volúmica com teor de água do momento do ensaio
σ	Tensão resistente à flexão
$\sigma_{c,10\%}$	Tensão de compressão correspondente a 10% da resistência à compressão
$\sigma_{c,50\%}$	Tensão de compressão correspondente a 50% da resistência à compressão
$\sigma_{t,10\%}$	Tensão de tração correspondente a 10% da resistência à tração
$\sigma_{t,50\%}$	Tensão de tração correspondente a 50% da resistência à tração
$\%_{delaminação\ linha}$	Delaminação máxima de uma linha de cola
$\%_{delaminação\ total}$	Delaminação total de um provete

ABREVIATURAS

BG	Matéria-prima/ vigas de Eucalipto
BP	Matéria-prima/ vigas de Choupo
CCA	<i>Chromated Copper Arsenate</i>
CLT	<i>Cross Laminated Timber</i>
EPI	Cola do tipo <i>Emulsion Polymer Isocyanate</i>
FJ	<i>Finger joint</i>
HBGBP	Vigas mistas de Eucalipto (BG) e Choupo (BP)
HMPBP	Vigas mistas de Pinho bravo (MP) e Choupo (BP)
HMR	<i>Hydroxymethylated Resorcinol</i>
HR	Humidade relativa
IPMA	Instituto Português do Mar e da Atmosfera
LVL	<i>Laminated Veneer Lumber</i>
MF	Cola do tipo Melamina-Formaldeído
MLC	Madeira lamelada colada
MP	Matéria-prima/elementos/vigas de Pinho bravo sem tratamento preservador
MP _{env}	Elementos de Pinho bravo sem tratamento preservador submetidos a envelhecimento
MTG	Equipamento de ensaio não destrutivo (<i>Machine Timber Grader</i>)
MUF	Cola do tipo Melamina-Ureia-Formaldeído
n-HMR	versão novolak do <i>Hydroxymethylated Resorcinol</i>
OSB	<i>Orientated Strained Board</i>
PF	Cola do tipo Fenol-Formaldeído
PRF	Cola do tipo Fenol-Resorcionol-Formaldeído
PUR	Cola do tipo Poliuretano
RF	Cola do tipo Resorcionol-Formaldeído
T	Temperatura
TF	Tempo Fechado
TMP	Matéria-prima/elementos/vigas de Pinho bravo com tratamento preservador
TMP _{env}	Elementos de Pinho bravo com tratamento preservador submetidos a envelhecimento
UF	Cola do tipo Ureia-Formaldeído
WFP	<i>Wood Failure Percentage</i> (percentagem de rotura pela madeira)

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações introdutórias

A madeira lamelada-colada (MLC) é um produto derivado da madeira que resulta da colagem de lamelas entre si, apresentando melhores níveis de eficiência relativamente à madeira serrada, nomeadamente a utilização otimizada da matéria-prima. De acordo com APA (2008) a utilização de MLC tem mais de 100 anos e remonta aos inícios dos anos de 1890 na Europa, tendo o seu fabrico sido patenteado na Suíça em 1901. Nos Estados Unidos da América a sua primeira utilização remonta ao ano de 1934, na construção de um laboratório de investigação na *USDA Forest Products Laboratory* em Madison, edifício que em 2008 ainda se encontrava em serviço.

De acordo com Acker et al. (2016), a produção de MLC a nível mundial em 2014 foi de 5 milhões de m³, dos quais 2,7 milhões de m³ produzidos na Europa. Os autores referem também que a produção de MLC na Europa segue uma tendência de evolução para valores de 4 milhões de m³ anuais. A produção europeia de MLC teve como principais espécies no seu desenvolvimento o Espruce (*Picea abies*) e a Casquinha (*Pinus sylvestris*) que ainda hoje se mantêm como principais espécies usadas no seu fabrico.

Em Portugal a aplicação de MLC em estruturas pode ser considerada recente (Negrão, 2010 e Cruz, 2007), tendo-se registado um crescimento acentuado após a sua aplicação na construção do Pavilhão da Utopia para a EXPO'98 (atualmente Altice Arena). As estruturas de MLC em Portugal podem ser divididas por tipologia de uso, de entre as quais se destacam os equipamentos desportivos, edifícios de serviço público e pontes essencialmente pedonais. Atualmente assiste-se ao uso crescente na reabilitação de estruturas, substituindo a madeira maciça por MLC. A Figura 1.1 e a Figura 1.2 apresentam algumas tipologias de estruturas existentes em Portugal com aplicação de MLC.

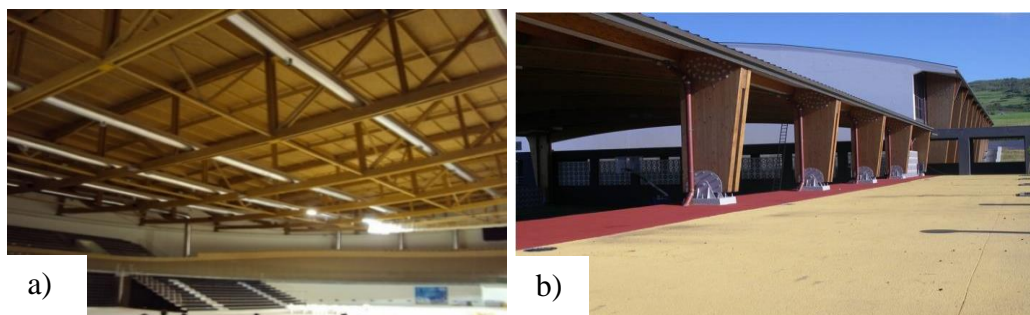


Figura 1.1 – Estruturas com MLC: a) Velódromo Nacional de Sangalhos, b) Complexo Escolar, Horta (Cortesia J. Negrão)



Figura 1.2 – Estruturas com MLC: a) Ponte pedonal, Sertã, b) Ponte rodoviária em Quiaios, Figueira da Foz (Cortesia J. Rodrigues)

Na investigação de âmbito nacional foram realizados estudos que comprovam a viabilidade económica e de desempenho mecânico para o fabrico de MLC com base em Pinho bravo (Pontífice de Sousa, 1990). Contudo, os elementos de MLC utilizados na construção nacional são maioritariamente importados enquanto produto final ou fabricados a partir de matéria-prima importada.

Da consulta do 6º Inventário Florestal Nacional, a área florestal existente no ano de 2010 era dominada por 3 espécies que representavam 72% da área total. Neste particular, o Eucalipto assumia a primeira posição com 26%, seguido do Sobreiro e do Pinheiro bravo, ambos com 23% cada, situando-se na quarta posição a Azinheira com 11% (Figura 1.3). Ao nível de disponibilidade de recursos, as espécies referidas apresentam potencial para utilização na produção de elementos derivados de madeira, como é o caso particular da MLC.

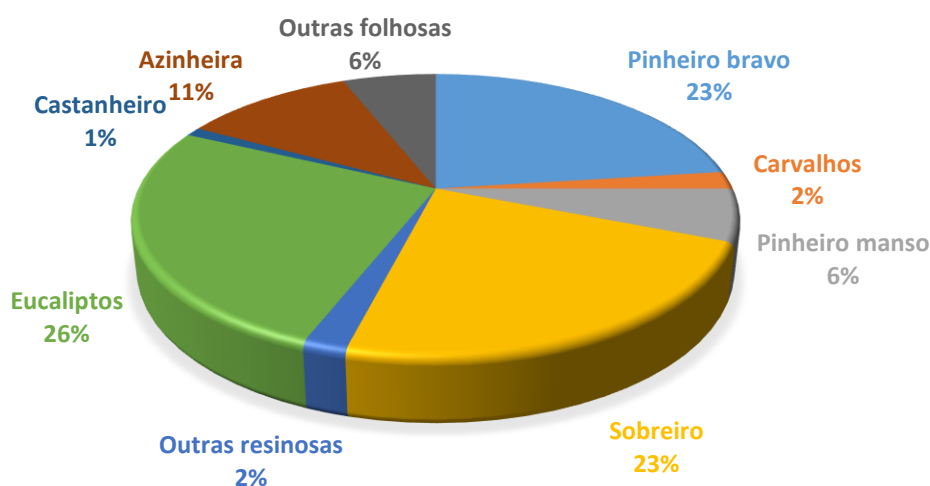


Figura 1.3 – Distribuição percentual das espécies/grupos de espécies existentes na floresta nacional em 2010 (adaptado de ICNF, 2013)

Contudo, o Sobreiro e a Azinheira encontram-se sob um regime de proteção que impede o seu abate (ICNF, 2013), pelo que foi automaticamente descartada a sua utilização no presente trabalho. Por outro lado, o Eucalipto e o Pinho bravo assumem principal destaque tendo em conta a disponibilidade de matéria-prima. O grupo de outras folhosas assume uma posição de interesse no panorama nacional, tendo registado um incremento de 15% no período de 1995 a 2010. Uma das espécies incluídas neste grupo é o Choupo, cuja disponibilidade de madeira serrada em serração tem vindo a aumentar.

A escolha das espécies a considerar no presente trabalho teve em conta não só a disponibilidade da matéria-prima em serração, como também estudos prévios que demonstrassem o seu potencial de aplicação em MLC. O Pinho bravo foi uma escolha natural, dando seguimento aos estudos realizados anteriormente como é o caso dos mais recentes conduzidos por Gaspar (2010) e Lampreia (2010). O Eucalipto e o Choupo foram considerados tendo em conta as excelentes propriedades mecânicas demonstradas nos estudos conduzidos por Martins (2015) e Hodousek et al. (2017), respetivamente. A viabilidade de utilização de Eucalipto produzido em Espanha, para produção de MLC foi estudada por Lopez-Suevos e Richter (2009) e Alvite et al. (2002), enquanto o Choupo foi referenciado em alguns estudos internacionais, nomeadamente na combinação com Eucalipto (*Eucalyptus grandis*) de modo a otimizar o desempenho mecânico das vigas, por Castro e Paganini (2003).

1.2 Âmbito e objetivos

O objetivo geral deste trabalho de investigação foi a análise do comportamento mecânico de elementos de MLC para aplicação na construção.

Para atingir o objetivo proposto, a investigação foi dividida em três fases, sendo duas destas centradas em campanhas experimentais. A primeira fase relacionou-se com a avaliação da viabilidade de colagem de face e a durabilidade após envelhecimento natural, seguindo-se na segunda fase, a caracterização experimental do comportamento mecânico de vigas. Por fim, na terceira fase, foi realizada a modelação numérica das vigas através de elementos finitos.

A avaliação da viabilidade de colagem de face, dando sequência a estudos anteriores, teve os seguintes objetivos:

- Avaliação do potencial das espécies existentes na floresta nacional para utilização em elementos estruturais de madeira lamelada colada;
- Avaliação da qualidade de colagem de face por via de ensaios de delaminação e ensaios de corte e otimização dos parâmetros de produção mais suscetíveis de influenciar o desempenho da colagem, nomeadamente a pressão de aperto e a quantidade de cola;

- Avaliação do desempenho das linhas de cola após longos períodos de exposição aos agentes atmosféricos (sol, chuva, vento), e posterior avaliação da delaminação e resistência ao corte por via dos ensaios realizados para avaliação da colagem de face.

A caracterização experimental do comportamento mecânico de vigas de madeira lamelada colada foi realizada após terem sido identificadas as condições de colagem adequadas para cada combinação de madeira e cola e teve como principais objetivos:

- Caracterização não destrutiva da matéria-prima (lamelas) através do método de vibração longitudinal;
- Predição das propriedades mecânicas das vigas à flexão, através de métodos analíticos baseados no conhecimento específico dos componentes das vigas, nomeadamente das lamelas;
- Caracterização mecânica experimental das vigas para determinação das principais propriedades mecânicas de flexão, nomeadamente o módulo de elasticidade e resistência à flexão;
- Estabelecimento de correlações entre propriedades determinadas por via de caracterização não destrutiva, métodos analíticos e propriedades mecânicas das vigas;

Por último, a tarefa relacionada com a modelação numérica de elementos finitos teve como objetivos:

- Modelar o comportamento (curva força vs deformação) das vigas ensaiadas experimentalmente;
- Caracterizar experimentalmente o comportamento mecânico das espécies, à tração e à compressão uniaxial, em provetes de madeira limpa recolhidos das vigas;
- Analisar o erro relacionado com a determinação das propriedades mecânicas por via do modelo numérico em comparação com as determinadas por via experimental;

1.3 Estrutura da Tese

A presente Tese compreende 7 capítulos com a seguinte distribuição:

Capítulo 1: Uma breve introdução à madeira lamelada colada é realizada, apresentando as principais aplicações no setor da construção civil seguida de uma breve nota sobre o estado atual do mercado nacional de MLC e potencialidades da floresta nacional. São também apresentados os objetivos e os processos adotados ao longo do presente trabalho.

Capítulo 2: Neste capítulo são apresentados os principais conceitos relacionados com o fabrico de MLC. Descreve-se as principais vantagens e desvantagens, as normas em vigor, os processos relacionados com a produção de MLC e os critérios de controlo de qualidade.

Por fim apresentam-se estudos anteriores realizados sobre MLC, cujo âmbito foi avaliar a influência de diversos fatores de fabrico na qualidade da colagem.

Capítulo 3: No capítulo 3 descrevem-se os trabalhos de uma vasta campanha experimental relativa à avaliação da viabilidade de colagem de face de Pinho bravo (sem e com tratamento preservador) e Choupo. Para tal foram usadas várias referências de 4 tipos de cola diferentes. A avaliação da qualidade da colagem foi realizada por via de ensaios de delaminação e resistência ao corte, aplicando os métodos de ensaio definidos na EN 14080 (2013). Para cada tipo de cola foram identificados os valores mais adequados para os parâmetros de colagem, nomeadamente: i) quantidade de cola (g/m^2) e ii) pressão de aperto (MPa). A análise dos resultados teve em consideração a influência dos parâmetros base (quantidade de cola e pressão de aperto) entre outros, tais como: i) massa volúmica, ii) teor de água, iii) disposição dos anéis de crescimento, e iv) tempo fechado.

Capítulo 4: No capítulo 4 apresenta-se a avaliação da integridade das linhas de cola de elementos de madeira lamelada colada de Pinho bravo (sem e com tratamento preservador) após envelhecimento natural. Descrevem-se as condições de envelhecimento, nomeadamente a localização e as variáveis associadas aos agentes atmosféricos atuantes (temperatura, humidade relativa, radiação solar, precipitação e velocidade do vento). Apresenta-se a avaliação da integridade das linhas de cola através da análise da superfície dos elementos após 4, 6, 9 e 18 meses de envelhecimento. Por fim, descrevem-se os resultados da avaliação da colagem por via de ensaios de delaminação e de resistência ao corte.

Capítulo 5: Neste capítulo, é descrito o processo de fabrico, em ambiente laboratorial, de um conjunto de 42 vigas, com 5 configurações distintas ao nível do arranjo de espécies utilizadas na sua constituição. Numa primeira fase, são apresentados alguns estudos anteriores realizados sobre o tema, para enquadrar o modo como o trabalho foi desenvolvido. Descreve-se a caracterização não destrutiva de amostras de madeira serrada de Pinho bravo, Choupo e Eucalipto. Com base na caracterização não destrutiva foi definida a distribuição das lamelas na constituição de cada viga. Descreve-se a aplicação de métodos analíticos para a predição das propriedades mecânicas das vigas, nomeadamente o módulo de elasticidade. Os parâmetros de colagem das vigas foram definidos com base nos melhores resultados obtidos da avaliação da qualidade de colagem conduzida no capítulo 3. O conjunto de 42 vigas foi caracterizado através de ensaios de flexão (módulo de elasticidade e resistência à flexão) com base no *layout* e procedimento de ensaio definido na EN 408 (2012). Apresenta-se a análise estatística dos resultados através de correlações lineares simples entre as diversas propriedades avaliadas experimentalmente. Por fim, apresenta-se os resultados da verificação da qualidade de colagem de cada viga através de ensaios de delaminação e resistência ao corte.

Capítulo 6: Neste capítulo é descrito o desenvolvimento e aplicação de um modelo numérico para simular o comportamento do conjunto das 42 vigas descritas no capítulo 5. O principal objetivo foi o de modelar o desempenho mecânico observado, em particular as deformações registadas em comportamento marcadamente não linear. Para tal, foram caracterizadas experimentalmente as três espécies no que diz respeito ao comportamento mecânico à tração e compressão em provetes de madeira limpa retirados das vigas. Verificou-se o bom ajustamento entre o modelo e os resultados experimentais, através das curvas força vs deformação respetivas. Por último apresenta-se a análise dos erros absolutos entre os resultados obtidos para o módulo de elasticidade e a resistência à flexão, e a definição de um critério de truncagem do modelo numérico.

Capítulo 7: No último capítulo do presente documento são elencadas as principais conclusões do trabalho desenvolvido e apresentadas algumas propostas de trabalhos a desenvolver no futuro.

2 GENERALIDADES DA MADEIRA LAMELADA COLADA

2.1 Introdução

Neste capítulo pretende-se realizar um enquadramento relativo à madeira lamelada colada. São descritas as vantagens e desvantagens do produto, as normas associadas ao seu processo de fabrico e controlo de qualidade e por fim são expostas as várias etapas do fabrico desde a recolha da matéria-prima até à expedição do produto final.

2.2 Vantagens e desvantagens da madeira lamelada-colada (MLC)

A MLC deriva da assemblagem de várias lamelas de madeira por via de colagem, apresentando por inerência todas as vantagens associadas à madeira quando comparada com outros materiais como sejam o caso do betão e do aço, materiais estes, com maior representação no sector da construção. De entre as várias vantagens da utilização de produtos derivados de madeira destacam-se: i) material obtido de fontes renováveis, ii) elevada relação resistência/peso, iii) boa trabalhabilidade e iv) bom balanço energético e de emissão de CO₂. Contudo apresenta como principais desvantagens: i) elevada variabilidade de propriedades, ii) reduzido módulo de elasticidade, e iii) reduzida durabilidade natural.

Contudo, os desenvolvimentos tecnológicos conduziram nas últimas décadas ao surgimento de diversos produtos derivados de madeira, para além da madeira circular e madeira serrada, de entre os quais se destacam: i) a MLC, ii) o CLT (*Cross Laminated Timber*), iii) o LVL (*Laminated Veneer Lumber*), iv) o OSB (*Oriented Strand Board*) e v) o contraplacado.

A MLC apresenta algumas vantagens em relação à madeira maciça, tais como:

- i. Secções transversais e vãos de grande dimensão: o fabrico de MLC consiste na sobreposição de lamelas de espessura reduzida (até 45 mm), através de colagem, permitindo a obtenção de secções que podem ir até 2 m de altura e 240 mm de largura (Lampreia, 2010). O comprimento dos elementos depende somente das limitações de fabrico e de transporte, sendo possível o fabrico de elementos até 40 m de comprimento. Estes vãos só são possíveis através da união longitudinal (ligação por entalhes múltiplos) de tábuas que, regra geral, não excedem os 4 m.

- ii. Aspetos estéticos e arquitetónicos: as vigas de MLC podem ser produzidas com formatos curvos e secções variáveis acrescentando qualidade do ponto de vista estético que é inatingível pela madeira maciça.
- iii. Menor variabilidade das propriedades: no processo de fabrico de MLC, defeitos como nós, descaios e empenos podem ser eliminados em grande parte pela união longitudinal, resultando em lamelas com maior homogeneidade. Através da utilização de métodos não destrutivos na caracterização mecânica das lamelas, é viável a distribuição de lamelas de forma homogénea e/ou combinada na constituição de um elemento de MLC. No caso da combinação de lamelas de diferentes classes, as lamelas de classe de resistência inferior são dispostas no interior dos elementos (zona da secção transversal onde os esforços são menores) e as de maior classe de resistência nas camadas externas (mais solicitadas).
- iv. Resistência ao fogo: a resistência ao fogo é uma característica associada à madeira em geral, uma vez que a mesma forma uma camada carbonizada que durante a ação de um incêndio retarda a propagação para o interior da secção transversal. Assim, para secções de MLC iguais ou superiores às existentes de madeira serrada, o desempenho da MLC será certamente melhor. De referir também que as colas estruturais utilizadas na sua fabricação não podem sofrer alteração abaixo da temperatura de carbonização da madeira, 300 °C (Cruz, 2007).

A MLC apresenta, no entanto, como principal desvantagem em relação à madeira maciça o maior consumo de energia na sua produção nas seguintes fases: i) aparelhamento das tábuas, ii) colagem de lamelas e aplicação da pressão de aperto, iii) criação de condições de cura adequadas e iv) aplainamento do produto final.

A durabilidade da madeira surge como uma desvantagem que se transfere para a MLC. Contudo, esta pode ser melhorada por via de aplicação de produtos preservadores. No entanto, a fase em que a aplicação do tratamento deve ocorrer não é consensual, uma vez que existem vantagens e desvantagens associadas à aplicação de pré-tratamento e no tratamento após colagem (Dias, 2016). Na madeira maciça o tratamento é aplicado ao produto com dimensões finais, não se gerando desperdícios intermédios que podem ser significativos no caso da aplicação prévia de tratamento nas lamelas, nomeadamente na execução de ligações.

2.3 Acervo normativo

A produção de MLC encontra-se bem difundida a nível internacional. Na Europa existe um conjunto de processos de fabrico bem definidos para a produção com as principais espécies

dadas como aptas para o fabrico de MLC. Para tal, contribuiu a criação de um conjunto de normas para a regulação do seu fabrico e para controlar a qualidade do produto final que será empregue em obra. A norma que regula os processos de fabrico foi revista recentemente, tendo sido aprovada em 2013 a última versão da EN 14080 (2013), que reúne a informação relativa à MLC e à madeira maciça colada que se encontrava dispersa por várias normas, nomeadamente: EN 387 (2001), EN 390 (1994), EN 1194 (1999), EN 14080 (2005), EN 385 (2001), EN 386 (2001), EN 391 (2001) e EN 392 (1995).

Para além da compilação da informação dispersa pelas referidas normas, a EN 14080 (2013) viu acrescentada informação relativa a:

- i. Madeira maciça colada e lamelado colado em bloco;
- ii. Requisitos para colas do tipo EPI (*Emulsion Polymer Isocyanate*);
- iii. Definição de classes de resistência para tábuas a utilizar no fabrico de MLC;
- iv. Regras para determinação das propriedades mecânicas de MLC cortada ao longo do comprimento;
- v. Disposições para a resistência ao fogo;
- vi. Desvios máximos para produtos lamelados colados curvos;
- vii. Novos valores para diversas propriedades mecânicas.

A EN 14080 (2013) encontra-se dividida em 7 capítulos e 10 anexos, dos quais somente 1 é informativo sendo os restantes normativos. Os primeiros 4 capítulos dizem respeito ao âmbito da norma, referências normativas, termos e definições e aos símbolos. O Capítulo 5 está dividido em 11 subcapítulos que abordam aspetos relacionados com as classes de resistência, metodologia de obtenção de MLC combinada, resistência mecânica de madeira maciça colada, resistência e durabilidade da colagem, reação ao fogo e desvios admissíveis. O capítulo 6 refere-se à avaliação de conformidade e o capítulo 7 à marcação e etiquetagem.

Dos vários anexos que compõem a norma serão relevantes para o trabalho a desenvolver os seguintes: Anexo C (ensaios de delaminação das linhas de cola), Anexo D (ensaios de corte das linhas de cola), Anexo E (ensaios em ligações de topo), Anexo F (ensaios em vigas estruturais), Anexo G (medições de teor de água), Anexo H (equipamento necessário) e Anexo I (requisitos mínimos de produção).

Relativamente à determinação das propriedades mecânicas de elementos estruturais (p. ex. módulo de elasticidade e resistência à flexão) devem ser seguidos os pressupostos da EN 408 (2012).

2.4 Processo de fabrico e controlo de qualidade

2.4.1 Processos de fabrico

O processo de fabrico de MLC consiste em várias etapas (Figura 2.1) que se iniciam na obtenção da matéria-prima e que se enumeram de seguida:

1. Obtenção da matéria-prima (em forma de toros);
2. Serragem dos toros em pranchas (em serração);
3. Secagem das pranchas (ao ar livre ou em estufa);
4. Classificação mecânica/visual das pranchas;
5. Fabrico de lamelas através da execução de ligações de topo (ligações denteadas ou ligações por entalhes múltiplos);
6. Aparelhamento das faces das lamelas;
7. Aplicação de colas nas superfícies das lamelas;
8. Aplicação de pressão de aperto nas lamelas sobrepostas;
9. Aparelhamento das vigas;
10. Embalagem e expedição

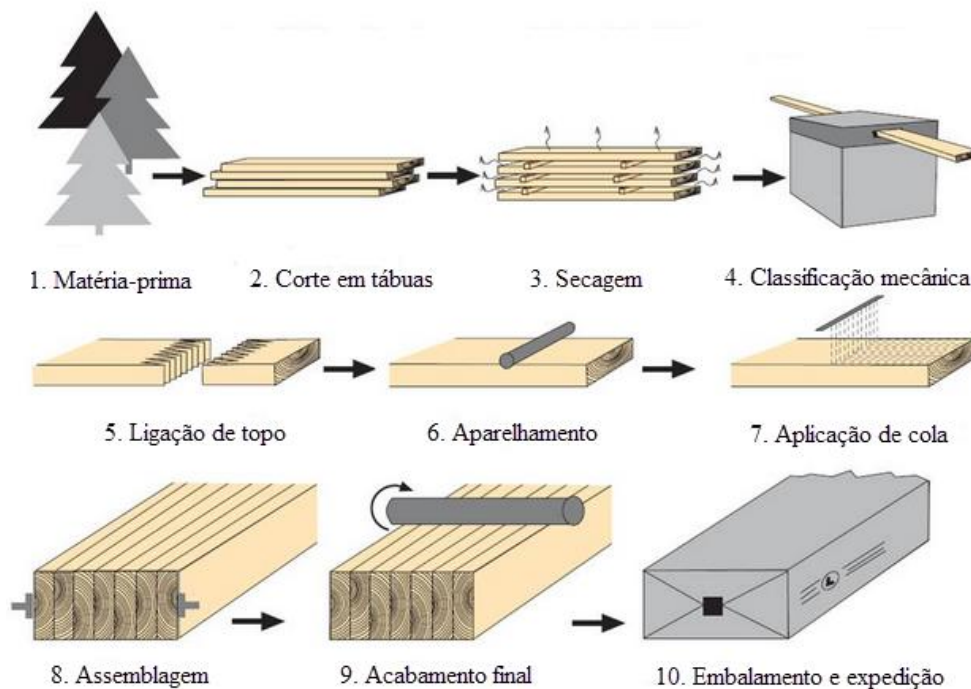


Figura 2.1 – Esquema ilustrativo do processo de fabrico de MLC (adaptado de Trä, 2015)

Cada um dos processos de fabrico de MLC deve obedecer a requisitos que estão estabelecidos na EN 14080 (2013) e que se descrevem de seguida.

2.4.1.1 *Matéria-prima*

Relativamente à matéria-prima, o subcapítulo 5.5.2 da EN 14080 (2013) refere que os elementos lamelados colados devem utilizar apenas uma espécie, de um total de 17 espécies reconhecidas como adequadas para o fabrico de MLC.

2.4.1.2 *Classificação mecânica/visual*

Seguidamente à obtenção da matéria-prima sob a forma de toro, segue-se a serragem e secagem das tábuas. Após estes processos, as tábuas devem ser classificadas de acordo com as classes de resistência estabelecidas na Tabela 1 da EN 14080 (2013). O procedimento de classificação deverá seguir os pressupostos da EN 14081-1 (2005). Esta norma permite realizar a classificação tanto por inspeção visual como por classificação mecânica. A classificação mecânica deverá ser feita com recurso a métodos não destrutivos que tipicamente permitem a predição de propriedades mecânicas como é o caso do módulo de elasticidade, que permitirá fazer correspondência com as classes de resistência através dos parâmetros definidos na EN 14081-4 (2009).

2.4.1.3 *Ligações de topo*

As ligações de topo comumente designadas de *finger joints* são utilizadas para permitir a execução de lamelas com grandes comprimentos e também para unir tábuas após a eliminação de defeitos como por exemplo, nós e descaio.

O processo consiste na realização do entalhe (Figura 2.2 a)) em ambos os topos das tábuas adjacentes e conseqüente união através da aplicação de pressão durante pelo menos 1s. O tempo decorrido entre a realização do entalhe e a colagem não deve exceder 6h. De acordo com o Anexo I da EN 14080 (2013), a pressão de aperto recomendada para temperaturas de aproximadamente 20 °C pode ser obtida do gráfico mostrado na Figura 2.2 b).

Note-se ainda que o teor de água das tábuas adjacentes não deve diferir em mais do que 5 % e que as tábuas no momento de prensagem devem possuir teor de água entre 6 e 15 % para o caso de madeira não tratada e entre 11 e 18 % para madeira tratada.

Na supressão de defeitos devem ser consideradas as dimensões dos nós e a distância dos mesmos ao entalhe. Nós com diâmetro até 6 mm podem ser desprezados, sendo que não devem existir nós ou desvio das fibras pronunciado na ligação. Note-se também que a distância da ligação ao nó mais próximo deve ser no mínimo de $3d$ (d é o diâmetro do nó, medido perpendicularmente ao fio se se encontrar na face, ou medido na direção paralela ao fio se for de canto).

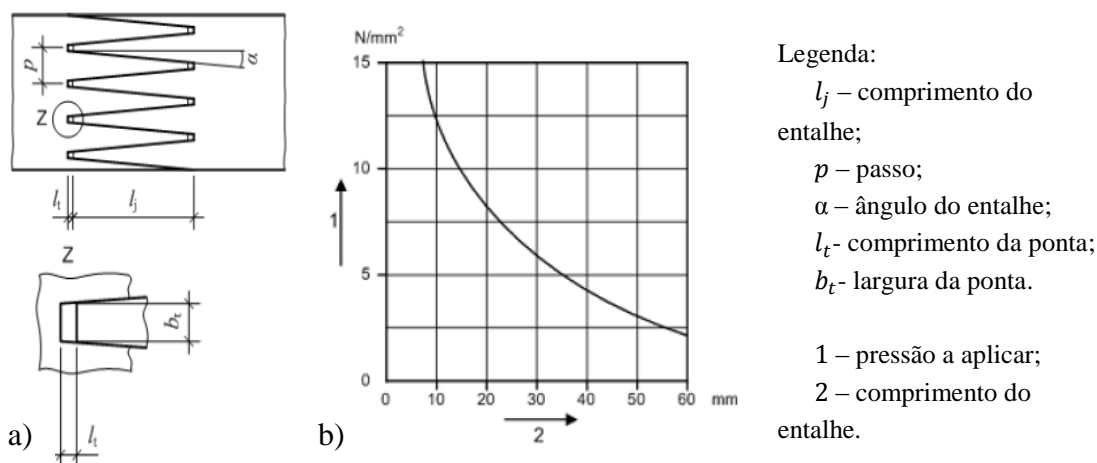


Figura 2.2 – a) Perfil tipo de uma ligação de topo e b) pressão de aperto a aplicar no processo de fabrico para temperatura de 20 °C (EN 14080 (2013))

2.4.1.4 Aparelhamento e aplicação da cola

O processo de aparelhamento das tábuas é essencial para garantir um acabamento superficial adequado das lamelas, permitindo que a adesão entre lamelas seja eficaz. Jiang et al. (2014) referem que as propriedades químicas da madeira, p. ex. a quantidade de extrativos e o valor de pH desempenham um papel importante na adesão. Neste estudo, os autores verificaram o aumento do valor de pH 24h após o aparelhamento dos provetes, bem como após 7 dias. Os autores referem também que as diferenças entre os valores mais elevados e mais reduzidos de pH é assumida como afetando a reação de cura dos sistemas de colagem.

No estudo conduzido por Bourreau et al. (2013), foi tida em conta a influência do tempo decorrido após o aparelhamento das tábuas na percentagem de delaminação registada. Foram considerados dois cenários: i) colagem no período de tempo inferior a 8h após aparelhamento e ii) colagem após um período de tempo superior a 24h decorridas após o aparelhamento. Foi clara a influência do tempo decorrido após o aparelhamento até à realização da colagem, tendo sido obtidos os melhores resultados para períodos de tempo inferiores a 8h. Com um período de tempo reduzido é evitada a contaminação da superfície das lamelas pelos químicos da madeira como analisou Jiang et al. (2014), tal como a oxidação da superfície em contacto com o ar é diminuta.

As reações de cura que ocorrem durante o processo de colagem não dependem somente das características da madeira mas também da cola utilizada. Atualmente existem diferentes tipos de cola para a produção de MLC, distribuídos pelas seguintes “famílias”: i) fenólicos e aminoplásticos (p. ex. MF, MUF, PRF, UF), ii) poliuretano de 1 componente (PUR) e iii) emulsão de isocianato polimérico (EPI). As colas utilizadas devem assegurar resistência e

durabilidade tanto nas ligações de topo como nas ligações de face nas condições de exposição e durante o período de vida previsto para a estrutura.

Para MLC a utilizar na classe de serviço 1 podem ser utilizadas colas do tipo I ou II. Para MLC a utilizar nas classes de serviço 2 e 3 devem ser consideradas colas do tipo I. Em ambas as situações, as colas devem cumprir os requisitos estabelecidos na EN 301 (2006).

A aplicação da cola em ambiente industrial é, regra geral, feita por extrusão. Este processo envolve um tubo com vários furos que vai libertando cola numa série de “fios” contínuos ao longo do comprimento da lamela.

2.4.1.5 *Assemblagem e cura da MLC*

O processo de assemblagem das lamelas consiste na aplicação de pressão na direção perpendicular às fibras da madeira. Este processo requer o controlo de alguns parâmetros definidos no Anexo I da EN 14080 (2013), tais como: i) orientação das lamelas, ii) teor de água, iii) pressão de aperto, e iv) temperatura de cura.

As lamelas, após aparelhamento para a produção de MLC, devem ter uma espessura mínima de 6 mm e espessura máxima de 45 mm (para classe de serviço 1 ou 2) ou 35 mm (para classe de serviço 3). Para elementos curvos, a espessura máxima das lamelas, t_{max} , é determinada pelo raio de curvatura da viga, r , e pela resistência característica à flexão declarada da ligação de topo, $f_{m,j,dc,k}$. O seu cálculo deve obedecer à Equação 2.1, transcrita do Anexo I da EN 14080 (2013).

$$t_{max} \leq \frac{r}{250} \left(1 + \frac{f_{m,j,dc,k}}{150} \right) \quad (2.1)$$

A orientação das lamelas deve ser tida em conta, sendo que, regra geral, a medula deve estar orientada para o mesmo lado e para a face superior da peça (Figura 2.3 a)). Exceção é feita para MLC a aplicar na classe de serviço 3, em que as lamelas exteriores devem ter a medula orientada sempre para o exterior (Figura 2.3 b)).

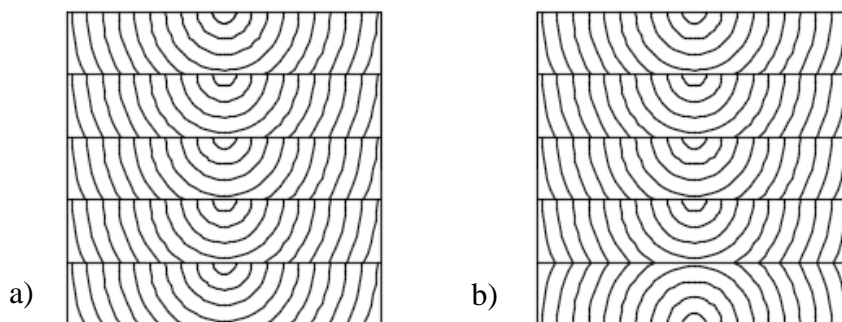


Figura 2.3 – Orientação das lamelas na secção transversal de uma viga de MLC: a) geral, b) para utilização na classe de serviço 3 (EN 14080 (2005))

A disposição recomendada e ilustrada na Figura 2.3 faz parte das disposições construtivas que permitem aumentar a durabilidade dos elementos. Pelo facto de as fendas de retração surgirem, regra geral, na face mais distante da medula, com a disposição indicada, a possibilidade de penetração de água na madeira é assim menor.

As lamelas devem cumprir os mesmos requisitos de teor de água que foram indicados para as tábuas na execução das ligações de topo (ver 2.4.1.3). Durante o período de montagem e de cura a madeira não deverá encontrar-se com temperatura inferior a 18°C.

A pressão de aperto deve ser aplicada consoante a secção transversal das lamelas, a espécie, a cola e o modo de aplicação. Regra geral, os produtores da cola fornecem intervalos de pressão de aperto adequada, dependendo apenas da espécie (resinosa ou folhosa). A EN 14080 (2013) recomenda valores para pressão de aperto de 0,6 a 0,8 MPa para lamelas com espessura até 35 mm e 1,0 MPa para lamelas com espessura variando entre 35 e 45 mm sem ranhuras (0,8 MPa com ranhuras).

2.4.2 Verificação da qualidade

A verificação da qualidade da produção de MLC deve ser realizada através de ensaios normalizados de forma a verificar a conformidade do produto. Deste modo, os ensaios incidem sobre as ligações coladas, quer no caso das ligações de topo, quer nas ligações de face.

O controlo de produção, é obrigatório para produtos cuja certificação foi obtida e se pretende validar continuamente ao longo do tempo. Estes ensaios permitem também verificar se os padrões considerados para o desenvolvimento de uma nova solução/produto cumprem os limites impostos pela EN 14080 (2013). Exemplo de cenários onde a realização de ensaios é conveniente é o estudo de viabilidade de colagem de espécies que não estejam consideradas na referida norma. O estudo da influência de parâmetros como a

espessura da lamela ou uma cola diferente da normalmente utilizada numa linha de produção requerem o comprovar da qualidade da colagem.

2.4.2.1 Resistência à flexão de ligações de topo

O ensaio de ligações de topo em lamelas permite determinar as propriedades mecânicas da ligação. As Tabelas 2 e 3 da EN 14080 (2013) apresentam os valores mínimos de resistência à flexão característica das ligações de topo permitidos para cada classe de resistência.

O Anexo E da EN 14080 (2013) apresenta os pressupostos a adotar para controlo de qualidade das ligações de topo. O controlo da qualidade pode ser realizado através de ensaios de flexão ou de tração seguindo a EN 408 (2012), embora o ensaio de flexão seja o mais usual.

Para o ensaio de flexão é referido que no controlo de produção a carga última deve ser atingida dentro de 60 ± 15 s e o vão de ensaio deve ser $15t$, em que t é a espessura da lamela como ilustra a Figura 2.4. A resistência à flexão é obtida pela Equação 2.2.

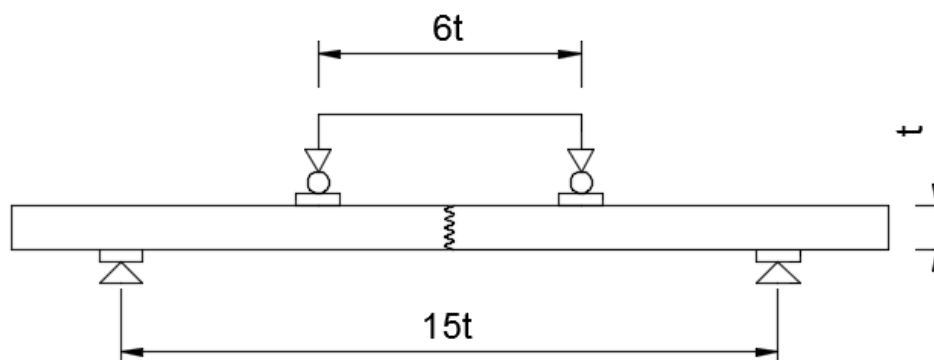


Figura 2.4 – Esquema de ensaio para determinação da resistência à flexão de ligações de topo

$$f_m = \frac{3Fa}{bt^2} \quad (2.2)$$

Onde f_m é a resistência à flexão, F é a força máxima registada, a é a distância entre o ponto de aplicação da carga e o apoio mais próximo, b e t são a largura e espessura, respetivamente, da peça a ensaiar.

2.4.2.2 Ligações de face

A resistência da ligação colada deve ser verificada através de ensaios de delaminação ou por ensaios de corte. Segundo Schmidt e Knorz (2010) o ensaio de resistência ao corte permite avaliar a resistência da linha de cola a curto prazo, enquanto o ensaio de resistência à delaminação permite aferir a durabilidade da linha de colagem a longo prazo.

Ensaio de resistência à delaminação

O princípio do ensaio de resistência à delaminação é introduzir um gradiente de teor de água nos provetes criando tensões internas entre as linhas de colagem, permitindo avaliar a integridade da colagem realizada.

O ensaio é realizado em provetes retirados das vigas de MLC enquanto produto acabado e deve contemplar toda a secção transversal do elemento. Os provetes devem ter 75 ± 5 mm na direção paralela ao fio. Caso a largura da viga exceda 300 mm, a secção transversal deve ser dividida em 2 ou mais provetes de 130 mm de largura mínima. Perante vigas com altura superior a 600 mm, a secção transversal pode ser cortada em 2 ou mais provetes com altura mínima de 300 mm.

Este ensaio deve seguir um dos 3 métodos presentes no Anexo C da EN 14080 (2013). Para MLC cuja finalidade é aplicação na classe de serviço 3, deve ser considerado o método A ou B, também recomendado com a finalidade de controlo de produção. O ensaio consiste na imersão dos provetes em água com aplicação de ciclos de pressão e vácuo e subsequente secagem. No final do processo de secagem é determinada a percentagem de delaminação total (Equação 2.3) e a percentagem de delaminação máxima de uma linha de cola individual (Equação 2.4).

$$\%_{delaminação\ total} = 100 \frac{l_{tot,delam}}{l_{tot,glue\ line}} \quad (2.3)$$

$$\%_{delaminação\ linha} = 100 \frac{l_{max,delam}}{2l_{glue\ line}} \quad (2.4)$$

Onde, $l_{tot,delam}$ é o comprimento total de delaminação, $l_{tot,glue\ line}$ é o comprimento total de linhas de cola em ambos os topos do provete, $l_{max,delam}$ é o comprimento máximo de delaminação, $l_{glue\ line}$ é o comprimento de uma linha de cola.

É de referir que a percentagem de delaminação máxima de uma linha de cola ($\%_{delaminação\ linha}$) deve ser inferior ou igual a 30% (inferior aos 40% anteriormente

definidos na EN 391 (2001)). Para os valores de percentagem de delaminação total, devem ser verificados os limites do Quadro 2.1.

Quadro 2.1 – Valores máximos de percentagem de delaminação total (adaptado da EN 14080 (2013))

Método	Percentagem de delaminação total máxima após o ciclo n°:		
	1	2	3
A	-	5	10
B	4	8	-
C	10	-	-

Os métodos A, B e C diferem entre si na duração e número de ciclos, e também na fase de aplicação de pressão e vácuo. Na fase de secagem dos provetes as diferenças estão relacionadas com os parâmetros de temperatura, humidade relativa e condições de paragem (tempo decorrido / massa do provete), como se pode verificar do Quadro 2.2. Os passos descritos no Quadro 2.2 referem-se a um só ciclo. No método A deve-se considerar a realização de 2 ciclos e nos restantes métodos apenas 1 ciclo. Caso os valores de delaminação total se apresentem acima dos limites máximos apresentados no Quadro 2.1, pode ser conduzido 1 ciclo adicional no caso dos métodos A e B para verificação de integridade da colagem, ou seja, se após o 3º ciclo os valores forem inferiores a 10 % considera-se que a colagem satisfaz os requisitos pelo Método A.

A medição da delaminação ocorrida durante o ensaio de resistência à delaminação deve ocorrer até 1h após o término da secagem. É recomendável a utilização de uma lupa e de um apalpa-folgas (0,08 a 0,10 mm), para avaliar se a separação nos provetes ocorreu ou não.

Para o comprimento de delaminação devem ser contabilizadas as seguintes situações:

- i) efetiva separação da linha de colagem,
- ii) falha da linha de cola entre a cola e o substrato de madeira,
- iii) falha na madeira, que ocorra entre a primeira ou segunda camada de células para além da camada de cola, se a falha não se verificar influenciada pelos anéis de crescimento ou pelas fibras.

Não devem ser tidas em conta aberturas com comprimento inferior a 2,5 mm e a uma distância superior a 5 mm da abertura mais próxima. Também as aberturas localizadas junto de nós e/ou bolsas de resina e ainda aquelas em que a causa tenha sido a proximidade de nós inclusos não devem ser contabilizadas.

Quadro 2.2 – Procedimento de execução dos ensaios de resistência à delaminação

Método A	Método B	Método C
<p>0- Medir o comprimento total das linhas de cola;</p> <p>1- Submergir os provetes em água à temperatura de 10 °C a 20 °C;</p> <p>2- Aplicar vácuo de 70 a 85 kPa durante 5min;</p> <p>3- Retirar o vácuo e aplicar pressão de 500 a 600 kPa durante 1h;</p> <p>4- Repetir os passos 2 e 3 totalizando um período de 130min;</p> <p>5- Colocar os provetes numa conduta de secagem com as seguintes condições: Tempo – 21 a 22h Temperatura – 60 a 70 °C Humidade relativa – ≤ 15 % Velocidade do ar – 2 a 3m/s.</p>	<p>0- Medir o comprimento total das linhas de cola;</p> <p>1- Pesar o provete e registar o múltiplo de 5g mais próximo;</p> <p>2- Submergir os provetes em água à temperatura de 10 °C a 20 °C;</p> <p>3- Aplicar vácuo de 70 a 85 kPa durante 30min;</p> <p>4- Retirar o vácuo e aplicar pressão de 500 a 600 kPa durante 2h;</p> <p>5- Colocar os provetes numa conduta de secagem com as seguintes condições: Tempo – 10 a 15h Temperatura – 65 a 75 °C Humidade relativa – 8 a 10 % Velocidade do ar – 2 a 3m/s.</p> <p>6- Medição da delaminação quando a massa do provete atingir 100 a 110 % da massa inicial. Registar o tempo de secagem decorrido.</p>	<p>0- Medir o comprimento total das linhas de cola;</p> <p>1- Submergir os provetes em água à temperatura de 10 °C a 20 °C;</p> <p>2- Aplicar vácuo de 70 a 85 kPa durante 30min;</p> <p>3- Retirar o vácuo e aplicar pressão de 500 a 600 kPa durante 2h;</p> <p>4- Repetir os passos 2 e 3 totalizando um período de 5h;</p> <p>5- Colocar os provetes numa conduta de secagem com as seguintes condições: Tempo – 90h Temperatura – 25 a 30 °C Humidade relativa – 25 a 30 % Velocidade do ar – 2 a 3m/s.</p>

Ensaio de resistência ao corte pelas linhas de colagem

O ensaio de resistência ao corte pelas linhas de colagem consiste na aplicação de tensões de corte na linha de colagem até atingir a rotura. A aplicação de carga deve ser constante em controlo de deslocamento, de modo a atingir a rotura não antes de 20s como estipula o Anexo D da EN 14080 (2013).

Os provetes de ensaio devem ser retirados da viga de MLC com secção transversal total, sendo necessário proceder ao ensaio de pelo menos 3 planos de colagem de diferentes zonas da secção transversal (1 superior, 1 média e 1 inferior). Perante uma secção transversal com menos de 10 planos de colagem deve ser ensaiada a totalidade dos planos de colagem. É também referido que os provetes devem ser retirados de uma zona da viga de MLC onde a pressão de aperto tenha sido a suficiente. Os provetes podem também ser obtidos de carotes retirados paralelamente à face do elemento de MLC. Contudo, segundo Gaspar (2010) esta via apresenta duas desvantagens importantes: i) necessidade de maquinaria para se obter duas faces paralelas para permitir a aplicação da carga e ii) apenas uma junta colada é obtida e ensaiada em cada provete. Por este motivo, Gaspar (2010) conduziu um estudo

para avaliar a resistência ao corte em carotes obtidas perpendicularmente às juntas coladas, sendo possível com uma só carote avaliar as diversas linhas de cola, causando menor impacto na capacidade resistente do elemento a inspecionar. Os resultados obtidos, segundo o autor foram satisfatoriamente explicados por via de função logarítmica, tendo obtido coeficientes de correlação elevados (0,79).

A configuração e dimensões dos provetes usuais devem ser as indicadas na Figura 2.5. O número de provetes a ensaiar varia consoante a largura da secção transversal. Para larguras até 100 mm deve ser ensaiada uma barra, para larguras de 100 a 160 mm devem ser ensaiadas 2 barras e para larguras superiores a 160 mm devem ser ensaiadas 3 barras.

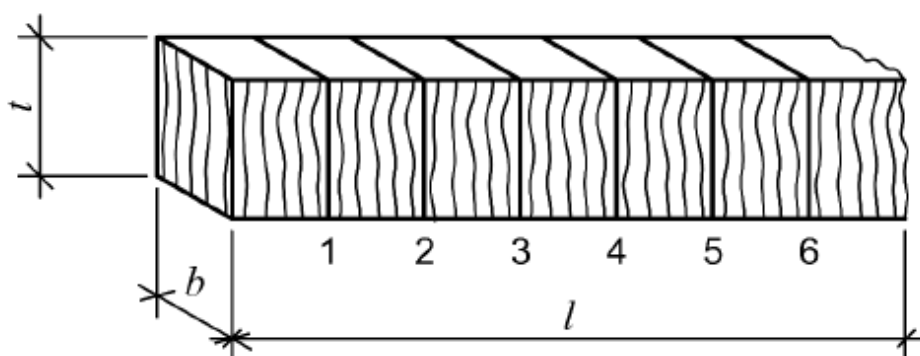


Figura 2.5 – Configuração e dimensões dos provetes para determinação da resistência ao corte, EN 14080 (2013)

Após a colheita dos provetes estes devem ser condicionados em ambiente controlado ($T = 20 \pm 2$ °C e $HR = 65 \pm 5$ %) de modo a que o teor de água se situe entre 8 e 13 %. As dimensões dos provetes devem ser medidas, arredondando aos 0,5 mm mais próximos, para determinar a área de corte, A . O provete deve ser colocado no dispositivo de ensaio de modo a que a carga seja exercida na direção das fibras e a distância entre o plano de colagem e o plano de corte não exceda 1 mm. Após o ensaio, deve ser registada a percentagem de rotura pela madeira, arredondada ao múltiplo de 5 % mais próximo. A resistência ao corte, f_v , é dada pela Equação 2.5. Os valores de percentagem de rotura pela madeira devem cumprir os valores indicados no Quadro 2.3 em função da resistência ao corte.

$$f_v = k \frac{F_u}{A} \quad (2.5)$$

Onde, F_u corresponde à carga máxima (N), A corresponde à área submetida ao corte e k é um fator corretivo para peças cuja espessura na direção ao fio seja inferior a 50 mm.

Quadro 2.3 – Percentagem de rotura pela madeira em relação à resistência ao corte

Propriedade	Valores médios			Valores individuais		
Resistência ao corte, f_v (MPa)	6	8	$f_v \geq 11$	$4 < f_v < 6$	6	$f_v \geq 10$
% mínima de rotura pela madeira	90	72	45	100	74	20

2.5 Fatores que influenciam o fabrico de madeira lamelada-colada

Neste subcapítulo pretende-se abordar a influência da variação de alguns parâmetros na qualidade da colagem. Inicialmente será feita uma descrição geral das várias vertentes de cada parâmetro, seguindo-se a fundamentação com estudos conduzidos pela comunidade científica nacional e internacional.

2.5.1 Espécie

A viabilidade da produção de MLC com uma determinada espécie deve ser estudada através de ensaios de resistência ao corte e resistência à delaminação. Na EN 14080 (2013) é apresentado um conjunto de espécies consideradas como aptas à produção de MLC. Essa lista contempla as seguintes espécies resinosas: Espruce e Abeto europeus (*Picea abies*, *Abies alba*), Casquinha (*Pinus sylvestris*), Pseudotsuga (*Pseudotsuga mensiesii*), “Western Hemlock” (*Tsuga heterophylla*), “Corsican pine” e “Austrian black pine” (*Pinus nigra*), Lariço-europeu (*Larix decidua*), “Siberian larch” (*Larix sibirica*), “Dahurian larch” (*Larix gmelinii*), Pinheiro bravo (*Pinus pinaster*), Pinheiro radiata (*Pinus radiata*), Espruce americano (*Picea sitchensis*), “Southern Yellow pine” (*Pinus palustris*), Tuia-gigante (*Thuja plicata*), e “Yellow Cedar” (*Chamaecyparis nootkatensis*). É também considerada na listagem a espécie Choupo (*Populus x euroamericana* cv “Robusta”, “Dorskamp”, “I214” e “I4551”) dada a semelhança de propriedades mecânicas da espécie relativamente à generalidade das espécies resinosas.

Da lista de espécies reconhecidas pela norma como aptas para fabrico de MLC, o Pinheiro bravo é a única disponível na floresta nacional. Note-se ainda que somente uma das espécies é folhosa, Choupo, que existe em Portugal, contudo os clones de Choupo referidos na lista não correspondem aos existentes na floresta portuguesa. O Choupo existente em Portugal é dividido em Choupo híbrido (*Populus x canadensis* Moench), Choupo negro (*Populus nigra* L.) e Choupo branco (*Populus alba* L.).

De acordo com Pontífice de Sousa, (1990 apud Gaspar et al., 2005), as principais espécies resinosas utilizadas nos Estados Unidos da América para produção de MLC são a Pseudotsuga e “Southern pine” (conjunto de quatro espécies: “Loblolly pine” (*Pinus taeda*), “Longleaf pine” (*Pinus palustris*), “Shortleaf pine” (*Pinus echinata*) e “Slash pine” (*Pinus elliottii*)).

Vários estudos têm contemplado a verificação de viabilidade de colagem de espécies resinosas e folhosas, incluindo folhosas tropicais. Exemplos reconhecidos como tendo influência na colagem são a massa volúmica e os coeficientes de retração. Também os extrativos da madeira e o valor de pH são referidos por alguns estudos como fatores que desempenham um papel importante na qualidade de colagem, contudo não são apresentados resultados conclusivos (Jiang et al., 2014). Almeida et al. (2014) conduziram um estudo nas espécies *Lyptus* (nome comercial no Brasil, do híbrido produzido de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*) e Paricá (*Schizolobium amazonicum* Herb) considerando as mesmas condições de colagem em ambas as situações, tendo verificado valores mais elevados de resistência ao corte para a espécie *Lyptus*. Contudo, nos ensaios de resistência à delaminação a espécie *Lyptus* apresentou delaminação exagerada, ultrapassando mesmo o limite máximo admissível para espécies resinosas pela regulamentação europeia. Por outro lado, a espécie Paricá não apresentou qualquer delaminação apesar de ter conduzido a menor resistência ao corte.

Jiang et al. (2014b) verificaram diferenças de comportamento de quatro espécies (Espruce, Larício, Faia e Freixo), assembladas nas mesmas condições, com 4 tipos de cola (PRF, EPI, MUF e PUR). O desempenho da cola PRF foi adequado em todas as espécies cumprindo o limite máximo de 5% para ensaio de delaminação. Por outro lado, a delaminação registada nas colagens com as restantes colas (EPI, MUF e PUR) foi inferior a 5% apenas no Espruce. Os autores registaram inclusive delaminação geralmente mais elevada nas espécies folhosas (Freixo e Faia) que possuem maior massa volúmica (638 kg/m³ e 728 kg/m³, respetivamente) em comparação com as resinosas (Espruce e Larício), que possuem massas volúmicas inferiores (414 kg/m³ e 576 kg/m³, respetivamente). Na avaliação da resistência ao corte não foram registadas diferenças significativas quando consideradas diferentes colas para a mesma espécie.

Uma das principais razões para as diferenças existentes nos resultados está relacionada com a massa volúmica. Na bibliografia é reportado o aumento da resistência das linhas de cola até valores de massa volúmica até 700 a 800 kg/m³, decrescendo para valores superiores (Vick, 1999). Contudo, no estudo conduzido por Gaspar (2010) em madeira tratada de Pinho bravo essa tendência não foi verificada, principalmente para níveis de retenção de tratamento mais elevados. Tal pode estar relacionado com a reduzida gama de variação de massas volúmicas que se localizou entre 580 kg/m³ e 640 kg/m³.

Plaster et al. (2008) verificaram também a influência da massa volúmica através da realização de ensaios de resistência ao corte e avaliação da percentagem de rotura pela madeira. Para tal, os autores consideraram a colagem de madeira de Eucalipto (*Eucalyptus sp.*) distribuída por 3 classes distintas de acordo com a sua massa volúmica, ρ , (Classe 1: $700 \leq \rho < 800$ kg/m³; Classe 2: $800 \leq \rho < 900$ kg/m³ e Classe 3: $900 \leq \rho < 1000$ kg/m³) e a

combinação entre essas mesmas classes (1x1, 2x2, 3x3, 1x2, 1x3, 2x3). Como seria de esperar a resistência ao corte de madeira maciça aumentou com o aumento de massa volúmica. Dos resultados da resistência ao corte das linhas de colagem, os autores observaram que para massas volúmicas mais reduzidas os valores foram mais elevados, idênticos na massa volúmica intermédia e mais baixos para as massas volúmicas mais elevadas. Esta conclusão é sustentada também pelos estudos de Marra (1992) e Tsoumis (1991) em que manifestaram dificuldades na colagem de madeira de massa volúmica mais elevada. O facto de possuir massa volúmica mais elevada é sinónimo de menor permeabilidade, ou seja, menor penetração da cola. A dificuldade de colagem de massas volúmicas mais elevadas foi mais notória na percentagem de rotura pela madeira, que reduziu significativamente com o aumento da massa volúmica.

Como referido anteriormente não é só a massa volúmica que influencia a durabilidade da colagem, mas também os coeficientes de retração de cada espécie. Esta característica é essencial pois quanto maiores forem os coeficientes de retração maiores serão as tensões geradas perante variações de teor de água, que determinam variações dimensionais da madeira. Este fator tem especial importância também nos estudos mais recentes em que se procura o desenvolvimento de novos produtos, nomeadamente com maior eficiência estrutural, o que pode ser conseguido através da colagem de diferentes espécies. Exemplo disso foi o estudo conduzido por Castro e Paganini (2003), que realizou uma campanha experimental em pequenas vigas lameladas coladas com Choupo (*Populus x euramericana*, clone “neva”) e Eucalipto (*Eucalyptus grandis*, clones “7”, “329”, “330” e “358”) em 7 combinações diferentes. Os autores determinaram propriedades como, módulo de elasticidade, resistência à flexão, módulo de corte e também a qualidade da colagem através de ensaios de resistência à delaminação e ao corte. De entre as vigas de MLC produzidas com Choupo e Eucalipto, a combinação que incluiu o clone “330” conduziu aos melhores resultados, tal como se verificou nas vigas fabricadas somente com Eucalipto.

Segundo Castro e Paganini (2003) os resultados obtidos nos ensaios de resistência à delaminação (método A, 2 ciclos) foram bastante positivos, sem a existência de problemas de colagem na interação das espécies Choupo e Eucalipto. Segundo os autores a reduzida delaminação ocorrida pode ser devida à proximidade de valores de coeficientes de retração de ambas as espécies (Quadro 2.4).

Quadro 2.4 – Massa volúmica e coeficientes de retração de Choupo e Eucalipto (Castro e Paganini, 2003)

Propriedade	Choupo	Eucalipto			
	“Neva”	“358”	“7”	“329”	“330”
Massa volúmica (kg/m ³)	358	539	526	520	698
Coeficiente retração tangencial (%)	6,17	8,26	7,71	7,35	8,98
Coeficiente retração radial (%)	3,77	5,04	4,15	4,13	5,13

A utilização de combinação de espécies na produção de MLC foi anteriormente estudada por outros autores com outras espécies. Exemplo disso são os estudos mencionados por Castro e Paganini (1999): A combinação das espécies Cumaru (*Coumarouna odorata*), Angelique (*Dicorynia guianensis*), Andiroba (*Carapa procera*), Mogno (*Swietenia macrophylla*), Teca (*Tectona grandis*) e Tilia (*Tilia americana*) por Biblis (1966, 1967a e 1967b). A combinação das espécies “*Lodgepole pine*” (*Pinus contorta*) no interior de vigas fabricadas com *Pseudotsuga* foi estudada por Moody (1974).

2.5.2 Colas

As colas são o produto que é aplicado entre as superfícies das lamelas para as unir permanentemente através de um processo de colagem (Ebnesajjad, 2008). As colas são portanto, o elo mais importante na produção de MLC, uma vez que são estas que garantem o funcionamento das várias lamelas como um só elemento.

As colas podem ser divididas em i) estruturais ou ii) não estruturais. No primeiro caso, as colas são utilizadas para aplicações em que os materiais colados são expostos a níveis de tensões até ao seu limite. Estas devem conservar a sua integridade e serem duráveis durante todo o período de serviço da estrutura. De acordo com a definição presente no manual “*Adhesive Technology handbook*” (Ebnesajjad, 2008), uma colagem estrutural encontra-se definida como tendo uma resistência ao corte superior a 7 MPa, além de significativa resistência ao envelhecimento. As colas não estruturais, por outro lado, são utilizadas para fixação de materiais leves num determinado local, para embalagem e mobiliário (Ebnesajjad, 2008).

A EN 301 (2006) estabelece dois tipos de cola consoante o uso ao qual estão associadas. As colas do Tipo I são destinadas ao uso em condições de humidade relativa superior a 85 % (a 20 °C) ou temperatura acima de 50 °C, consideradas condições mais exigentes. Por outro lado as colas do tipo II são destinadas ao uso em condições de humidade relativa inferior a 85 % (a 20 °C) e temperaturas iguais ou inferiores a 50 °C.

De seguida são descritas algumas das vantagens e desvantagens associadas à utilização de colas para união de materiais:

Vantagens:

- Distribuição uniforme das tensões e maior superfície para transmissão de tensões;
- Ligação eficiente de materiais finos ou espessos com diferentes formas;
- Ausência de corrosão, que seria gerada pela utilização de elementos metálicos;
- Resistência à fadiga e a cargas cíclicas;
- Ligações com contornos suaves;
- Boa relação resistência/peso;
- Rápida e/ou fácil de executar quando comparada com ligações mecânicas por elementos metálicos.

Desvantagens:

- A colagem não permite inspeção visual à área colada;
- Requer preparação cuidada das superfícies a colar;
- Necessidade de períodos de cura longos (em alguns casos);
- Requer equipamentos de fixação e/ou de compressão;
- O período de vida da ligação colada depende do ambiente em que estará exposta;
- Temperaturas de serviço elevadas estão limitadas a 177 °C nas colas estruturais convencionais. Colas especiais, normalmente mais dispendiosas, permitem utilização até 371 °C (Ebnesajjad, 2008).

Para obter uma boa colagem é conveniente garantir o cumprimento dos seguintes requisitos:

1. Realizar a escolha adequada da cola;
2. Dimensionar corretamente a ligação;
3. Garantir a limpeza das superfícies;
4. Garantir a capacidade adequada das superfícies para se unirem;
5. Adotar o procedimento adequado à colagem a realizar (solidificação e cura)

No que à escolha da cola diz respeito, existe uma vasta oferta para a colagem de elementos de madeira. As colas sintéticas podem ser divididas em 3 grupos, 1 - colas fenólicas e aminoplásticas (reação de condensação com o formaldeído): i) fenol-formaldeído (PF), ii) resorcinol-formaldeído (RF), iii) fenol-resorcinol-formaldeído (PRF), iv) melamina-formaldeído (MF), v) ureia-formaldeído (UF), e vi) melamina-ureia-formaldeído (MUF); 2 - colas de um só componente poliuretano (PUR), e 3 – colas de emulsão de isocianato polimérico (EPI). A escolha deve recair sobre a que se mostrar mais eficaz para a colagem do material em causa. Regra geral, consoante o material/espécie a colar, a empresa

fornecedora deverá providenciar a cola mais conveniente de acordo com o historial de bom desempenho.

A limpeza e preparação das superfícies devem ser asseguradas para que ocorra uma boa adesão. A limpeza pode ser realizada através de processos físicos, químicos ou a combinação de ambos. Exemplo disso é o aparelhamento prévio das tábuas que conduz a uma espessura constante das lamelas e à limpeza superficial (ativação da superfície) da madeira, onde entretanto tinham ocorrido contaminações e reações químicas através do contacto com o ar. A preparação das superfícies permite um maior contacto entre o material e a cola sobre os quais as forças de adesão devem atuar.

Um adequado procedimento de colagem não consiste apenas na aplicação da cola entre os materiais, mas também na consideração de condições de temperatura de cura, pressão de aperto e tempo de cura adequados.

As colas, na sua generalidade, assemelham-se às tintas, em que a sua composição pode conter ou não outros componentes para além da base reativa. Exemplos de componentes adicionais são: i) endurecedores, ii) catalisadores, iii) solventes, iv) diluentes, v) cargas e aditivos.

O principal componente de uma cola é a sua base/ligante cuja função é a de realizar a colagem mantendo os substratos unidos. Os endurecedores são os componentes que promovem a reação química com o ligante, iniciando-se a partir do instante da mistura o processo de solidificação da mistura. Por vezes são também adicionados catalisadores, cuja função é retardar ou acelerar a reação entre o endurecedor e o ligante. A quantidade de catalisador é muito reduzida quando comparada com as quantidades de ligante e endurecedor.

Menos usual é a utilização de solventes e diluentes nas colas. Contudo, os solventes são utilizados com o objetivo de reduzir a viscosidade da cola e melhorar a sua dispersão pela superfície a colar. Os diluentes permitem a redução do componente principal (ligante) reduzindo também a viscosidade da cola.

Estudos realizados com diferentes tipos de cola

Vários estudos têm sido conduzidos com diferentes tipos de cola. Alguns desses estudos procuraram avaliar propriedades que não dizem respeito a uma determinada cola mas que por consequência demonstram a viabilidade ou não do seu uso. Por outro lado, são conhecidos alguns trabalhos cujo objetivo consistiu no estudo da viabilidade de colagem

de determinada espécie, procurando obter informação acerca da cola que permite obter os melhores resultados.

Lampreia (2010) refere que as colas mais utilizadas na indústria dos lamelados são as colas à base de formaldeído, referindo inclusive que, dentro desse mesmo grupo, as mais usuais são as que contêm resorcina (RF e PRF), seguidas das MUF. As colas RF e PRF são geralmente reconhecidas para uso no exterior sem limitações. Este tem sido um dos motivos pelos quais têm sido adotadas pelos investigadores que se têm debruçado sobre a colagem de madeira de Pinho bravo. Contudo, é de referir que empresas nacionais se encontram a produzir MLC com Pinho bravo com colas do tipo PUR e MUF. De acordo com Custodio et al. (2009) a opção pela cola do tipo PRF é preferível em relação à cola RF, pois a quantidade de resorcinol é menor, o que se traduz no custo, sem influência significativa na durabilidade da mesma.

Mais recentemente, um estudo conduzido por Jiang et al. (2014) refere que as colas do tipo PRF têm uma utilização reduzida devido à sua cor escura. No mesmo estudo os autores mencionam que as colas mais recentes são do tipo MUF, EPI e PUR.

Almeida et al. (2014) conduziram um estudo com o objetivo de avaliar a qualidade da adesão com as espécies Paricá e Lyptus. Nesse sentido consideraram a utilização de duas colas distintas: RF (Cascophen RS-216-M com endurecedor FM-60-M) e MUF (AkzoNobel MUF 1242/2542). No geral, os autores verificaram que a cola MUF apresentou melhor desempenho na resistência ao corte em ambas as espécies. Contudo, na delaminação o desempenho da cola RF foi pior na espécie Lyptus (a espécie Paricá não registou delaminação), em que se registou 3,86 cm e por sua vez a cola MUF registou 2,30 cm.

Bourreau et al. (2013) realizaram uma campanha experimental para verificar a viabilidade de colagem de madeiras folhosas tropicais (*Qualea rosea*, *Dicorynia guianensis* e *Peltogyne venosa*) na Guiné Francesa. Neste estudo, os autores mencionam que para fins estruturais em ambientes tropicais, somente as colas MUF e PRF apresentam viabilidade para utilização de acordo com a EN 301 (2006). No entanto, Bourreau (2011) citado por Bourreau et al. (2013) verificou que as colas MUF são sensíveis ao ambiente envolvente, nomeadamente elevadas temperaturas e elevadas humidades. Esta constatação foi ao encontro do referido por Custodio et al. (2008).

Também a influência da cola na colagem de espécies europeias foi estudada por Jiang et al. (2014), tendo considerado as espécies: Freixo, Faia, Pseudotsuga, Lariço e Espruce; as colas consideradas foram do tipo MUF, PRF, PUR e EPI. Do conjunto geral de resultados

foi verificado que a resistência ao corte por tração mais baixa ocorreu nas colagens realizadas com cola PUR.

Knorz et al. (2014) verificaram a colagem de Freixo através de ensaios de resistência ao corte, seguindo a EN 392 (1995) e de delaminação, seguindo a EN 302-2 (2004) considerando cinco colas diferentes (PRF, MUF-1, MUF-2, PUR e EPI). Relativamente aos ensaios de resistência ao corte, os autores obtiveram elevadas percentagens de rotura pela madeira e resistências ao corte comparáveis com as resultantes de madeira maciça. Quanto à resistência à delaminação, os melhores resultados foram obtidos para a cola do tipo PRF, com os valores médios a variarem de 38.3% a 4.2%. A utilização de cola MUF-2 conduziu a percentagens de delaminação inferiores às registadas com MUF-1. As colas PUR e EPI registaram as percentagens de delaminação superiores a 70%. Como conclusão geral, verifica-se que os requisitos de delaminação máxima de 5% presentes na EN 301 (2006) após 3 ciclos não são cumpridos com nenhuma das colas.

Um estudo conduzido por Segundinho et al. (2013) pretendeu realizar a classificação mecânica de MLC produzida com a espécie Cedrinho (*Erisma uncinatum* Warm.). As propriedades estudadas foram o módulo de elasticidade e a resistência à flexão e também à compressão. Foram igualmente conduzidos ensaios não destrutivos e ensaios em provetes para avaliar a colagem entre lamelas (resistência à delaminação e resistência ao corte). Como variáveis do estudo foram consideradas duas colas (PUR e PRF) e dois níveis de pressão de aperto (0,8 MPa e 1,2 MPa). Os autores verificaram através dos ensaios de resistência à delaminação que a cola PUR teve melhor desempenho do que a cola PRF (valores médios de 3,97% para PUR e 10,94% para PRF).

A madeira de Faia foi das primeiras espécies folhosas europeias a ser testada para utilização em MLC. Com o objetivo de avaliar a colagem de Faia foi realizado um estudo por Schmidt et al. (2010) em que foi utilizada cola dos tipos MUF e PU. Do estudo conduzido, os autores verificaram o bom desempenho da colagem com cola do tipo MUF e o inadequado desempenho da colagem com PU tendo obtido percentagens de delaminação total bastante superiores a 10%.

Conclusões:

Dos vários estudos aqui descritos, verifica-se que não é possível identificar globalmente a melhor cola a utilizar para produção de MLC. Deve-se, portanto, realizar um estudo particular para cada espécie de madeira de modo a verificar qual o melhor tipo de cola através dos ensaios de resistência ao corte e à delaminação. Esse estudo particular deverá ser sempre antecedido de uma consulta dos vários fornecedores de colas existentes no mercado na procura de obter as melhores opções preliminares.

2.5.3 Pressão de aperto, quantidade de cola, condições de cura e tempo fechado

Para além da escolha adequada da cola devem ser tidos em conta outros aspetos relevantes para a obtenção de um bom desempenho da colagem, nomeadamente: i) pressão de aperto, ii) quantidade de cola, iii) tempo fechado e iv) condições de cura.

A **pressão de aperto** diz respeito ao processo de assemblagem das lamelas para formar o produto final pelo que uma inadequada pressão pode conduzir a colagens ineficientes. Gaspar (2006) concluiu que utilizando pressões de aperto elevadas (1,12 MPa) a percentagem de delaminação aumenta consideravelmente, provavelmente devido à absorção da cola pela madeira ou da sua expulsão. A consideração de pressões de aperto de 0,6 MPa e 0,9 MPa não gerou diferenças significativas. Estes resultados estão em linha com o disposto na Tabela I.4 do Anexo I da EN 14080 (2013), em que as pressões de aperto para lamelas de espessura inferior a 35 mm devem variar entre 0,6 e 0,8 MPa, apesar do estudo contemplar lamelas com 30 mm de espessura. Bourreau et al. (2013) verificaram também que apenas em uma das espécies (*P. venosa*) a pressão de aperto influenciou os resultados de delaminação, tendo obtido percentagens de delaminação inferiores a 10% para pressões de aperto de 0,4 MPa e superiores a 10% para 0,7 e 1,0 MPa.

O tempo decorrido na assemblagem das lamelas é outro parâmetro tido em conta por alguns autores. Este corresponde ao período decorrido entre a aplicação da cola e a aplicação da pressão de aperto, que pode ser dividido em tempo aberto (período de tempo entre a aplicação da cola e a união das lamelas) e **tempo fechado** (TF) (período de tempo entre a união das lamelas e a aplicação de pressão). Este último tem sido considerado como variável em alguns estudos para analisar a sua influência na durabilidade das colagens. Bourreau et al. (2013) verificaram que para os períodos de TF considerados (5, 10 e 20 min) a menor delaminação ocorre para 5 min e as maiores percentagens de delaminação ocorrem para 10 min. Os autores conduziram, no entanto, uma outra série de ensaios somente com uma espécie, em que aumentaram tanto a pressão de aperto para 1,0 MPa como o TF para 40 min revelando resultados eficientes na percentagem de delaminação (inferiores a 10%). Neste estudo foi considerada uma cola do tipo PRF.

Um estudo conduzido por Schmidt e Knorz (2010) concluiu que em provetes de Faia colados com cola do tipo MUF (MUF-1 e MUF-2) a menor delaminação ocorreu para TF elevados (> 45min). Os ensaios de resistência à delaminação foram conduzidos segundo a EN 302-2 (2004), com a aplicação de 3 ciclos. A gama de TF variou de 15 a 150 min sendo que para os períodos de TF de 15 e 30 min a delaminação registada foi superior a 5 %, limite máximo estabelecido na EN 301 (2006). No mesmo estudo os autores consideraram a colagem das espécies Pseudotsuga e Espruce Norueguês (*Picea abies L.*) com cola do tipo MUF-1. No caso da espécie Espruce Norueguês obtiveram bons resultados independentemente da pressão aplicada (entre 0,7 MPa e 1,0 MPa) e TF (entre 10 min e 90

min). Contudo, nas colagens de Pseudotsuga surpreendentemente não foram obtidos valores abaixo do limite máximo admissível pelas normas aplicáveis. O valor mais baixo conseguido foi de 7% para pressão de 1,0 MPa e TF de 90 min. Schmidt et al. (2010) é referido por Knorz et al. (2014) como tendo verificado que TF reduzidos com pressões de aperto elevadas conduzem a elevadas penetrações da cola na madeira e reduzidas espessuras da linha de cola o que resultou em fraca durabilidade da colagem. Knorz et al. (2014) verificaram isso mesmo no estudo que conduziram com madeira de Freixo, tendo obtido delaminação média excessiva para TF de 15 e 30 min com cola PRF. No entanto para TF de 100 min o valor obtido foi de 4,2%. O decréscimo da delaminação com o aumento de TF foi também evidente para a cola MUF-1, com valores a variar de 63,8% (TF de 30 min) a 39,2% (TF de 120 min).

Através da consulta da ficha técnica de diferentes tipos de cola constata-se também que o TF difere de cola para cola. A título de exemplo, a cola do tipo PUR, Purbond HB S609 apresenta um tempo de montagem máximo de 60 min. Por outro lado, a cola do tipo PRF, Prefere 4040 apresenta diferentes tempos de montagem máximos de acordo com o endurecedor utilizado, nomeadamente: 150 min, 70 min e 50 min para o endurecedor Prefere 5835, Prefere 5839, e Prefere 5840, respetivamente.

Relativamente à **temperatura de cura** durante e após a montagem das vigas, as conclusões obtidas por Gaspar (2010) são claras: quanto maior a temperatura de cura melhores são os resultados de resistência à delaminação. O estudo conduzido contemplou níveis de temperatura de cura de 20 °C a 45 °C, ocorrendo um decréscimo de delaminação com o aumento da temperatura. Os provetes foram realizados com madeira de Pinho bravo (tratada e não tratada) e colados com cola do tipo PRF e pressão de aperto de 0,6 MPa. Contudo, e apesar do efeito favorável da temperatura ser bastante evidente, a utilização de temperaturas na gama dos 45°C em ambiente industrial é insustentável, pelo que outras medidas teriam de ser tomadas.

Também a **quantidade de cola** utilizada na montagem das lamelas afeta a eficácia da colagem, como foi verificado por Bourreau et al. (2013) no estudo de colagem de Freixo. Os autores verificaram que a quantidade de cola medida na ligação das lamelas foi bastante inferior à quantidade aplicada, não fazendo referência se a causa tinha sido a expulsão da mesma durante a aplicação da pressão. Verificaram também que na globalidade dos resultados, para quantidades de cola medidas inferiores a 175 g/m² a delaminação excedeu o limite máximo de 10%, estabelecido pelo Método A após 3 ciclos do Anexo C da EN 14080 (2013).

Por outro lado, não é somente a quantidade de cola que afeta os resultados de delaminação, mas também a razão resina/endurecedor. Knorz et al. (2014) verificaram isso mesmo ao

utilizar cola do tipo MUF-2 com diferentes proporções resina/endurecedor (100/20 e 100/50), tendo obtido percentagens de delaminação na ordem de metade para a relação 100/50. Na resistência ao corte não foram observadas grandes diferenças, com exceção da percentagem de rotura pela madeira que decresceu de 99% (100/20) para 88% (100/50).

Além da influência da quantidade e proporção da sua composição na colagem de lamelas, também se verifica existir influência da quantidade de cola considerada no fabrico de ligações por entalhes múltiplos. Essa verificação foi realizada por Obucina et al. (2014) que consideraram cola PUR (Purbond HB S609) com diferentes quantidades (180, 200 e 220 g/m²) para realização de ligações por entalhes múltiplos com Espruce. Para cada quantidade de cola foram realizados 81 provetes, verificando-se que a quantidade que conduziu aos melhores resultados foi de 180 g/m². No entanto, os autores sugerem mais estudos para avaliar se menores quantidades de cola resultariam em melhores resultados de resistência à flexão de ligações por entalhes múltiplos.

Conclusões:

Dos parâmetros pressão de aperto, tempo fechado, temperatura de cura e quantidade de cola pode-se aferir que um reduzido tempo fechado conduz a maus resultados, principalmente quando associado a elevadas pressões de aperto. Em situações de TF reduzido a pressão de aperto é aplicada numa fase em que a viscosidade da cola é bastante reduzida, o que leva à ocorrência de maior penetração da cola na madeira e/ou uma maior expulsão da cola para fora da área pressionada.

A quantidade certa de cola é relevante para obter uma boa colagem, no entanto, deve ser estudada para cada caso particular pois esta depende também do TF e da pressão de aperto. Relativamente à temperatura adequada para realizar a colagem verifica-se que, quanto maior, melhores resultados serão obtidos. Contudo a utilização de temperaturas elevadas em ambiente industrial não é exequível pelo que medidas alternativas devem ser adotadas, como se perfila a utilização de primários. Note-se, no entanto, que o TF deve ser adequado à temperatura de cura pois para temperaturas de cura mais elevadas é expectável que o TF necessário seja mais reduzido (cura mais rápida).

2.5.4 Posicionamento dos *finger joints* (FJ)

As seções onde ocorram nós isolados ou agrupados ou a presença de ligações por entalhes múltiplos são referidas como as seções mais críticas nas vigas de MLC e por sinal a zona onde, regra geral, ocorrem as roturas se estiverem presentes em zonas de esforços elevados (Fink et al. (2014)).

Fink et al. (2014) referem alguns estudos, nomeadamente Colling (1990), que realizou uma compilação de estudos, conduzidos entre 1924 e 1988, em vigas de MLC para avaliar a influência da ligação por entalhes múltiplos no comportamento das vigas. Em 1767 vigas de MLC apenas 277 continham uma ligação FJ na lamela inferior na zona de momento máximo. A análise dos resultados mostrou que 79 % dessas 277 vigas romperam pela ligação FJ. Um estudo conduzido por Schickhofer (1996) em 115 vigas de MLC demonstrou que a quantidade de roturas relacionadas com a ligação FJ aumenta com o aumento da qualidade da madeira.

3 CARACTERIZAÇÃO DO DESEMPENHO DA COLAGEM DE FACE

3.1 Enquadramento

No presente capítulo pretende-se apresentar os resultados de uma vasta campanha experimental relacionada com a colagem de face de espécies com predominância na floresta nacional e com potencial para aplicação em MLC.

De entre as duas categorias de espécies existentes, as resinosas assumiram desde o início do fabrico de MLC um papel preponderante relativamente às folhosas, devido a sua maior abundância, preço, fácil trabalhabilidade e acabamento final dos produtos desenvolvidos.

Nas últimas décadas têm sido vários os estudos relacionados com a produção de MLC, sendo que os mais recentes se têm debruçado essencialmente sobre a otimização da produção, nomeadamente: i) a localização de FJ e eliminação de pontos fracos das lamelas por Oscarsson et al. (2014); ii) monitorização do desempenho de elementos de MLC através de métodos não destrutivos (Sanabria et al., 2010); iii) recurso a novas colas (Pitzner e Lind, 2005) e iv) desenvolvimento de modelos teóricos para determinação das propriedades mecânicas mais relevantes de vigas de MLC com base em ensaios de lamelas (Frese e Blass, 2009, Frese et al., 2010b e Frese et al., 2012).

Em Portugal, a investigação realizada focou-se essencialmente no Pinho bravo, tendo sido iniciada por Franco da Costa (1978) e desde então vários estudos foram realizados em madeira sem e com tratamento preservador. O Pinheiro bravo é uma das espécies listadas como aptas para produção de MLC pela EN 14080 (2013) e, de acordo com o 6º Inventário Florestal Nacional (ICNF, 2013) representava, no ano de 2010, 23% da área florestal nacional, assumindo-se como a espécie resinosa dominante na floresta portuguesa.

Contudo, não apenas em Portugal, como por toda a Europa verifica-se um crescente interesse por produtos colados de espécies folhosas. Schmidt e Knorz (2010) referem que as alterações climáticas estão a conduzir a alterações nas florestas da Europa central, e que em diversas regiões o Espruce é considerado como não adaptado às condições de crescimento. Referem igualmente que estão a ser tomadas medidas para estabelecer florestas mais resistentes com outras espécies, como por exemplo a Faia (*Fagus sylvatica* L.) e Pseudotsuga (*Pseudotsuga menziesii* Mirb.) que são mais tolerantes às alterações de condições de crescimento.

Na Europa são já vários os estudos conduzidos relativamente à viabilidade de colagem de diversas espécies folhosas, tais como: Faia (*Fagus sylvatica* L.) (Schmidt et al., 2010), Bétula (*Betula pubescens* Ehrh.) (Zhang et al., 2011), Freixo (*Fraxinus excelsior* L.) (Knorz et al., 2014), Eucalipto (*Eucalyptus globulus*) (Lopez-Suevos e Richter, 2009 e Alvite et al., 2002) e Choupo (*Populus x euramericana*) (Castro e Paganini, 2003).

Outras espécies resinosas, folhosas europeias e/ou tropicais têm sido consideradas no fabrico de MLC, como por exemplo: Criptoméria (*Cryptomeria japonica*) (Hayashi e Miyatake, 2015), Bambu (*Guadua Angustifolia Kunt*) (Correal et al., 2010), Acacia (*Acacia mangium* Wild) (França, 2012), Louro vermelho (*Sextonia rubra*) (Teles et al., 2010), entre outras.

Para o presente trabalho foram tidas em conta várias espécies tendo em atenção o potencial de aplicação para produção de MLC. O potencial de aplicação foi avaliado essencialmente com base na disponibilidade de matéria-prima em serração. Para tal, e após consulta do 6º Inventário Florestal Nacional (ICNF, 2013) foram escolhidas três espécies: i) Pinheiro bravo; ii) Eucalipto e iii) Choupo. O Pinho bravo foi uma escolha natural dando assim continuidade aos estudos realizados previamente, com o objetivo de avaliar a viabilidade de colagem com colas mais recentes.

O Eucalipto surge como espécie dominante na floresta nacional no ano de 2010 (26%) pelo que representa uma disponibilidade de matéria-prima ímpar no contexto Nacional. De referir também as excelentes propriedades mecânicas à flexão que revelam um enorme potencial para aplicação enquanto elemento estrutural (Martins, 2015 e Franke e Marto, 2014). Lopez-Suevos e Richter (2009) conduziram um estudo relativo à viabilidade de colagem de face de Eucalipto branco (*Eucalyptus globulus* Labill.) com crescimento em Espanha, tendo demonstrado resultados interessantes. No presente estudo, para a espécie de Eucalipto considerou-se uma abordagem preliminar do desempenho mecânico de vigas de MLC, motivo pelo qual não são apresentados quaisquer resultados de avaliação de qualidade de colagem de face no presente capítulo.

O Choupo apesar de não ter relevância na distribuição de espécies, insere-se no grupo “outras folhosas” do Inventário Florestal Nacional com 6%, e pode ser encontrado com relativa facilidade em serração. O seu rápido crescimento aliado à reduzida massa volúmica podem potenciar a sua aplicação no fabrico de MLC. Um estudo conduzido por Hodousek et al. (2017) mostrou que esta madeira apresenta propriedades mecânicas interessantes, nomeadamente o módulo de elasticidade à flexão, sendo ainda possível a sua previsão através de métodos não destrutivos.

Ao longo do presente capítulo são descritas as várias tarefas conduzidas para cada uma das espécies referidas, relativamente à viabilidade de colagem de face. Para cada uma das duas espécies (Pinheiro bravo e Choupo) é apresentado um estado de arte relativo aos estudos anteriormente conduzidos. Segue-se a caracterização física da amostra considerada no estudo. Para cada espécie foram consideradas diversas colas, sendo apresentadas as variáveis em estudo e todos os processos relacionados com o fabrico dos elementos, processo de cura e obtenção dos provetes de ensaio.

Por fim, são apresentados os resultados dos vários ensaios realizados (delaminação e resistência ao corte) seguindo a EN 14080 (2013). É também apresentada uma discussão dos resultados de forma detalhada, tendo em consideração as variáveis que poderão ter influenciado o desempenho da colagem de face.

3.2 Pinheiro bravo sem tratamento (MP)

3.2.1 Estado da arte

O Pinheiro bravo é a espécie resinosa dominante na floresta portuguesa, motivo pelo qual tem sido tradicionalmente usada no sector da construção enquanto elemento maciço. No entanto, a sua utilização na construção atual remete-se em grande parte a elementos de pequena dimensão e essencialmente para apoio à construção (p. ex. cofragens) ou em elementos cuja função estrutural não é o objetivo principal (p. ex. pavimentos, revestimentos, etc.).

A exemplo do que sucedeu com as restantes espécies resinosas europeias, o Pinheiro bravo afirmou-se como principal espécie presente na floresta nacional com aptidão para o fabrico de MLC tal como refere a listagem de espécies presentes na EN 14080 (2013). Contudo, o seu uso tem sido pouco significativo, tendo-se verificado o uso de MLC importada nas suas dimensões finais ou por outro lado a importação de matéria-prima para fabrico de MLC pela indústria nacional.

De acordo com Lampreia (2010), o primeiro estudo de viabilidade da utilização de Pinho bravo português na produção de MLC foi conduzido por Franco da Costa (1978). No referido estudo foi avaliada a resistência à tração transversal, a delaminação e a resistência ao corte da junta colada. As colagens foram realizadas com uma cola do tipo PRF, considerando uma amostra de madeira não selecionada e sem tratamento preservador.

Mais tarde, Cruz (1985) realizou um estudo cujo principal objetivo foi a avaliação da influência da massa volúmica na qualidade de colagem de Pinho bravo sem tratamento. Para essa mesma análise a autora produziu um total de 15 vigas em laboratório (0,12 m x

0,15 m x 0,75 m) com 6 lamelas cada com 2 cm de espessura. As colagens foram realizadas com uma cola do tipo RF, e com pressão de aperto de 0,6 MPa. Dos resultados obtidos foi observado um bom desempenho à delaminação, bem como na resistência ao corte pela linha de cola e pela madeira.

Tendo sido comprovado o bom desempenho das colas PRF e RF para a colagem de Pinho bravo sem tratamento, Pontífice de Sousa (1990) realizou um estudo para avaliar o desempenho mecânico de vigas de MLC. Para o efeito, o autor produziu em ambiente industrial 15 vigas com dimensões estruturais (3,75 m x 0,08 m x 0,18 m) coladas com cola do tipo PRF e pressão de aperto de 0,6 MPa. Cada viga foi fabricada com 6 lamelas de 3 cm de espessura. Após o ensaio de flexão estática foram retirados provetes para avaliação da qualidade de colagem através de ensaios de delaminação e de resistência ao corte. Foram também conduzidos ensaios em ligações de topo (*finger-joints*) idênticas às utilizadas nas vigas de MLC. Para além do bom desempenho mecânico demonstrado pelas vigas ensaiadas, o autor concluiu que a produção de MLC com Pinho bravo seria economicamente viável.

Apesar de comprovada a viabilidade de colagem do Pinho bravo sem tratamento preservador, o seu campo de aplicação restringe-se às Classes de Serviço 1 e 2, uma vez que a durabilidade natural do Pinho bravo não é adequada para Classe de Serviço 3 de acordo com a EN 350-2 (1994). De acordo com Gaspar (2010), o Pinho bravo apresenta facilidade de impregnação no borne, apresentando-se como uma alternativa às restantes resinosas europeias quando o tratamento preservador por impregnação é necessário.

A colagem de Pinho bravo tratado com produto preservador foi também alvo de estudo por Gaspar, (2005, 2010) e Lampreia (2010). Os referidos estudos serão adiante descritos em detalhe (ver 3.3.1). Da análise bibliográfica realizada conclui-se que nos diversos estudos realizados anteriormente com Pinho bravo para avaliação da viabilidade de colagem de face, apenas foram consideradas colas do tipo PRF e RF.

3.2.2 Caracterização física da matéria-prima

A avaliação da viabilidade de colagem de face foi realizada tendo por base uma amostra composta por 124 tábuas sem qualquer tratamento preservador. A amostra foi fornecida por uma empresa da região de Leiria, não sendo conhecido o local de onde foi realizado o abate das árvores, nem outras características relacionadas com o seu crescimento. Após receção, a amostra foi armazenada nas instalações do SerQ – Centro de Inovação e Competências da Floresta, em espaço climatizado (temperatura de $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ e humidade relativa de $65\pm 5\%$). A amostra foi mantida neste espaço durante todo o processo, exceto na fase de preparação da colagem e realização de cortes para obtenção de provetes.

Cada tábua foi alvo de medições, nomeadamente: i) espessura; ii) largura; iii) comprimento; iv) massa e v) teor de água. A espessura e a largura foram medidas em três secções (em ambos os topos e a meio vão), determinando-se os valores médios e consequentemente, foi determinada a massa volúmica de cada tábua. As dimensões médias das tábuas da amostra eram 39 mm x 114 mm x 2621 mm (espessura x largura x comprimento). A média e desvio padrão da massa volúmica média eram $636,9 \pm 57,2 \text{ kg/m}^3$, com um valor mínimo de $508,5 \text{ kg/m}^3$ e um valor máximo de $768,1 \text{ kg/m}^3$.

O teor de água foi medido com recurso a um higrómetro de agulhas em três secções, cumprindo com a prescrição do Anexo G da EN 14080 (2013). Foram realizadas medições a meio vão e a uma distância não inferior a 0,6 m de ambos os topos das tábuas. A profundidade de penetração, tal como indicado foi superior a 30% da espessura da tábua em análise. Verificou-se, no entanto, que algumas tábuas (21 no total) indicavam teor de água acima do limite superior (15%) estabelecido para madeira sem tratamento tendo-se registado um valor máximo de 18,1%.

Tendo em conta as contingências do trabalho e a quantidade de matéria-prima disponível, não foi possível descartar essas mesmas tábuas pelo que uma análise cuidada dos resultados terá em conta a possível influência do teor de água dessas mesmas tábuas na qualidade da colagem de face. Ainda assim, de cada tábua foi possível recolher uma amostra de madeira limpa para determinação do teor de água em estufa e assim determinar o teor de água da tábua aquando do fabrico.

3.2.3 Colas

Para o presente estudo foram consideradas várias colas disponíveis no mercado e aprovadas para uso estrutural, Tipo I, classificação obtida de acordo com a EN 301 (2006). Foram contactadas algumas empresas tendo sido possível obter colaboração através do fornecimento de 4 tipos de cola diferentes, nomeadamente: i) PRF (Phenol-Resorcinol-Formaldeído); ii) MUF (Melamina-Ureia-Formaldeído); iii) EPI (Emulsão de Isocianato Polimérico) e iv) PUR (um só componente Poliuretano).

De entre os vários tipos de cola foram seleccionadas diferentes referências, algumas por sugestão dos fornecedores, e outras foram adicionadas ao estudo no decorrer do trabalho. Assim, numa primeira fase do trabalho foram consideradas as colas PRF-1, PRF-2, PRF-3, MUF-1, EPI-1 e PUR-1. Numa segunda fase, e com base nos resultados obtidos no decorrer dos trabalhos, foram também estudadas as colas MUF-2, PUR-1+PR (primário) e EPI-2. Por fim foi também analisado o desempenho das colas PUR-2, PUR-2+PR, PUR-3 e PUR-3+PR.

No Quadro 3.1 encontram-se listadas as colas descritas, bem como as referências comerciais das mesmas e alguns dos parâmetros tidos em conta no processo de avaliação do desempenho de colagem de face. A razão resina/endurecedor teve como base a relação de massas dos dois componentes.

Quadro 3.1 – Resumo das colas e alguns dos parâmetros adotados

Cola	Resina	Endurecedor	Resina/ Endurecedor (ppm)	Tempo de prensagem adotado (min)
PRF-1	Prefere 4040	Prefere 5839	100/20	240
PRF-2		Prefere 5840	100/20	180
PRF-3		HRP 155	100/20	240
MUF-1	Komartex M	Komartex M	100/20	540
MUF-2	Prefere 4546	Prefere 5021	100/35	270
EPI-1	Prefere 6182	Prefere 6682	100/20	480
EPI-2	Prefere 6151	Prefere 6651	100/15	20
PUR-1	HB S 709	-	-	175
PUR_1 + PR		PR 3105	-	350
PUR-2	HB S 109	-	-	25
PUR-2 + PR		PR 3105	-	50
PUR-3	HB S 309	-	-	75
PUR-3 + PR		PR 3105	-	150

3.2.4 Parâmetros de colagem e preparação das vigas

3.2.4.1 Preparação e organização das lamelas

Para avaliação do desempenho da colagem de face foram produzidos elementos com 4 lamelas de 30 mm de espessura cada e 1000 mm de comprimento. A largura final dos elementos variou entre 100 e 110 mm. As dimensões consideradas tiveram como objetivo a possibilidade de comparação dos resultados do presente trabalho com os obtidos no estudo conduzido por Lampreia (2010).

Tendo em conta o objetivo de avaliar a viabilidade de colagem de Pinho bravo com diferentes colas disponíveis no mercado, analisou-se inicialmente a influência de dois parâmetros, nomeadamente: i) da quantidade de cola e ii) da pressão de aperto.

Relativamente à quantidade de cola foi adotado para cada cola o intervalo definido pela respetiva ficha técnica, considerando-se um valor próximo do valor médio e do valor máximo do intervalo definido. Quanto à pressão de aperto, optou-se por seguir os valores mínimo e máximo, definidos no Anexo I da EN 14080 (2013), ou seja, 0,6 MPa e 0,8 MPa. De entre as quatro combinações de quantidade de cola e pressão de aperto, uma coincidiu

com a adotada no estudo realizado por Lampreia, nomeadamente para a cola PRF-1 (450g/m² e 0,6 MPa).

De modo a minimizar a influência de outras variáveis, como por exemplo a massa volúmica, procurou-se fabricar elementos com massa volúmica média aproximada ao valor médio da amostra (aproximadamente 650 kg/m³). Com vista ao aproveitamento de toda a amostra e de modo a incluir nos vários elementos lamelas com massas volúmicas diversificadas, procurou-se seguir uma distribuição idêntica entre todos os elementos colados. Assim, na lamela superior foi utilizada a madeira com a massa volúmica mais baixa e na lamela inferior a massa volúmica mais elevada. Desta forma, a disposição das lamelas correspondeu à distribuição expectável em vigas a ensaiar à flexão. Nas lamelas interiores foram dispostas as massas volúmicas intermédias das restantes lamelas, procurando uma distribuição idêntica à ilustrada na Figura 3.1. Tendo em conta o potencial de aplicação do Pinho bravo em Classe de Serviço 3, foi adotada a orientação dos anéis de crescimento das lamelas de acordo com o indicado pela EN 14080 (2013) como ilustra a Figura 2.3. Deste modo, no caso do tratamento de preservação ser aplicado após a colagem, a orientação dos anéis já se encontra conforme os requisitos para Classe de Serviço 3.

Lamela 1	→	$\rho \leq 600$
Lamela 2	→	$600 < \rho \leq 650$
Lamela 3	→	$600 < \rho \leq 650$
Lamela 4	→	$\rho > 650$

Figura 3.1 – Distribuição de massas volúmicas das lamelas pelos elementos a colar (kg/m³)

Após a escolha das tábuas constituintes de cada elemento a fabricar, procedeu-se ao aparelhamento das tábuas de modo a obter a espessura final de 30 mm. De referir que, regra geral, foram fabricados 2 elementos simultaneamente (total de 8 lamelas). Após o aparelhamento, cada tábua foi medida novamente (largura, espessura e comprimento) e determinada a correspondente massa volúmica. Com os novos valores de massa volúmica, procedeu-se sempre que necessário, à reorganização da distribuição das lamelas de modo a manter a distribuição indicada anteriormente (Figura 3.1).

3.2.4.2 Aplicação da cola e montagem das lamelas

Seguiu-se o processo de montagem das lamelas através da aplicação da cola em apenas uma das faces de cada lamela, sobrepondo-se nova lamela e nova aplicação de cola. A quantidade de cola (g/m²) foi controlada por pesagem durante a sua aplicação (Figura 3.2) e posteriormente espalhada por meio de uma espátula denteada de modo a criar uma camada uniforme em toda a superfície. A cola foi obtida momentos antes de se dar início ao processo de montagem, através da mistura da resina com o endurecedor (com exceção

das colas PUR) com base na razão entre os componentes definidos pelas fichas técnicas (Quadro 3.1).

Apesar de não haver referência na regulamentação, o tempo decorrido desde o processo de aparelhamento até à aplicação da cola nunca excedeu as 6h (valor definido para assemblagem de uniões de topo/denteadas). Adicionalmente, foi também registado o período decorrido desde o início da aplicação da cola até ao início da aplicação da pressão de aperto. Deste modo, foi possível contabilizar o tempo aberto e o tempo fechado. O tempo aberto foi o mais reduzido possível. Por sua vez, o tempo fechado foi pelo menos o período de tempo mínimo sugerido pela ficha técnica de cada cola. Este foi contabilizado desde o momento da assemblagem da última lamela constituinte do elemento a colar até ao início da aplicação da pressão de aperto.



Figura 3.2 – Controlo da aplicação de cola na superfície das lamelas por pesagem – Cola EPI-1

A prensagem dos elementos decorreu num dispositivo constituído por seis atuadores hidráulicos espaçados de 500 mm entre eixos, permitindo realizar colagens de elementos até 3000 mm de comprimento e largura máxima de 200 mm (Figura 3.3). Cada atuador tem capacidade máxima de carga de 50 kN. Todo o processo de colagem decorreu em ambiente controlado (temperatura de $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ e humidade relativa de $65\pm 5\%$). O equipamento de aplicação de carga indica a força aplicada, ainda assim, foi decidido monitorizar a carga aplicada através de uma célula de carga (4,7 toneladas de capacidade máxima) intercalada num dos atuadores hidráulicos livres.



Figura 3.3 – Processo de assemblagem – aplicação de pressão

Decorrido o período de prensagem, os elementos foram armazenados durante pelo menos 7 dias para que ocorresse a cura completa das colas. Após a cura, cada elemento foi aparelhado lateralmente de modo a obter uma largura constante ao longo de todo o comprimento. Seguiu-se a obtenção dos provetes para avaliação da qualidade de colagem por via de ensaios de delaminação (Método A) e de resistência ao corte. Procurou-se que os provetes para os diferentes ensaios fossem obtidos de forma intercalada dando primazia à obtenção de provetes isentos de nós para ensaios de delaminação. De cada elemento com 1000 mm de comprimento foram obtidos 7 provetes para ensaios de delaminação com as dimensões aproximadas de $75 \times 105 \times 120 \text{ mm}^3$ (comprimento x largura x altura).

Relativamente aos ensaios de corte foram obtidas 7 secções transversais que foram cortadas ao meio resultando em 14 provetes por cada elemento colado. Cada provete tinha dimensões aproximadas de $50 \times 50 \times 120 \text{ mm}^3$ (largura x espessura x comprimento). Dos 14 provetes obtidos de cada elemento considerou-se um total de 10 para ensaios de resistência ao corte pela linha de cola (3 linhas de cola por provete) e 4 provetes para ensaios de resistência ao corte pela madeira (4 ensaios por provete). Os resultados são apresentados seguidamente, bem como a análise detalhada dos mesmos.

3.2.5 Delaminação – resultados e discussão

Por facilitar a análise dos resultados, estes serão apresentados por tipo de cola. A discussão dos resultados permitirá avaliar a influência dos diversos parâmetros passíveis de influenciar a qualidade de colagem (p. ex. massa volúmica, teor de água, tempo fechado e orientação dos anéis de crescimento), para além dos 2 parâmetros em análise: i) quantidade de cola e ii) pressão de aperto. O ensaio pelo Método A pressupõe a verificação da qualidade de colagem para a Classe de Serviço 3 tendo em conta o potencial referido do Pinho bravo para receber tratamento preservador por impregnação.

Os resultados relativos à cola do tipo PRF são apresentados no Quadro 3.2. Por sua vez, os resultados relativos às colas do tipo MUF, EPI e PUR são apresentados no Quadro 3.3, Quadro 3.4 e Quadro 3.5, respetivamente. Os valores de delaminação total por provete, bem como a delaminação máxima podem ser consultados no Anexo A do presente documento (Quadro A.1 a Quadro A.16). Podem também ser consultados, nos quadros referidos, os valores de massa volúmica e teor de água de cada lamela no momento da colagem.

3.2.5.1 Colas do tipo PRF

De seguida são apresentados os resultados de delaminação total média e valor máximo individual obtidos para as colas PRF-1, PRF-2 e PRF-3, separados por quantidade de cola e por pressão de aperto. São também apresentados no Quadro 3.2 os valores de TF registados, bem como a massa volúmica média dos provetes e o respetivo número de provetes ensaiados. Os resultados de delaminação obtidos de cada provete colado com cola do tipo PRF, bem como as massas volúmicas dos mesmos são listados no Anexo A (Quadro A.1 a Quadro A.6).

Quadro 3.2 – Resumo da delaminação total média e máxima obtida de provetes colados com colas do tipo PRF

Cola	Quantidade de cola (g/m ²)	Pressão de aperto (MPa)	TF (min)	Massa volúmica (kg/m ³)	Nº de provetes	Delaminação total média (valor máximo)	
						2º ciclo (%)	3º ciclo (%)
PRF-1	350	0,6	13	647	6	1,3 (2,3)	2,0 (3,5)
		0,8	5/13/15	642	21	0,9 (3,5)	1,1 (3,5)
	450	0,6	5	653	6	2,0 (3,8)	2,6 (5,3)
		0,8	4	631	7	1,5 (4,0)	2,2 (4,6)
PRF-2	350	0,6	10/14	647	14	0,7 (2,5)	1,0 (3,5)
		0,8	10	653	6	1,0 (2,3)	1,6 (3,3)
	450	0,6	5	650	6	1,5 (2,5)	2,1 (4,0)
		0,8	5	646	7	2,8 (4,9)	3,8 (7,0)
PRF-3	350	0,6	14	649	6	2,2 (4,2)	3,3 (5,9)
		0,8	15	655	7	2,0 (4,2)	2,3 (4,2)
	450	0,6	5	659	6	0,6 (1,8)	1,0 (1,8)
		0,8	6/15	644	14	0,5 (2,4)	0,6 (3,2)

Da análise dos resultados verifica-se em primeira instância o excelente desempenho à delaminação, bem como a semelhança de resultados entre as várias colas do tipo PRF para ambos os ciclos de ensaio. O excelente desempenho observado é comprovado pelo facto dos valores obtidos se situarem abaixo dos limites estabelecidos pela EN 14080 (2013) para o Método A, apresentando valores (médios e máximos) abaixo dos 5% após o segundo ciclo e abaixo de 10% após o terceiro ciclo.

Verifica-se também pela análise da Figura 3.4 que, de entre as três colas do tipo PRF a que apresentou melhor desempenho foi a cola PRF-3 para o cenário combinado de 450 g/m² e 0,8 MPa (quantidade de cola e pressão de aperto, respetivamente), apresentando valores médios de 0,5% após o 2º ciclo e 0,6% após o 3º ciclo. Relativamente à cola PRF-1 o melhor cenário obtido foi para a quantidade de cola 350 g/m² e pressão de aperto de 0,8 MPa. Por sua vez, a combinação 350 g/m² com 0,6 MPa foi a que promoveu melhor comportamento à delaminação no caso da cola PRF-2. Verifica-se, portanto, que colas do mesmo tipo (PRF) requerem combinações diferentes (quantidade de cola e pressão de aperto) para garantir o melhor desempenho à delaminação para o Pinho bravo sem tratamento.

De registar que as colas PRF-1 e PRF-2 diferem apenas no que diz respeito ao endurecedor, tendo na base a mesma resina. A principal diferença que se registou no processo de fabrico foi o tempo de prensagem, que é inferior em 1h no caso da cola PRF-2 relativamente às colas PRF-1 e também PRF-3. Comparando o desempenho das colas PRF-1 e PRF-2, a redução do tempo de prensagem pode ser considerada uma mais-valia em ambiente industrial. Por outro lado, a cola PRF-3 possui um tempo de armazenamento bastante superior às restantes colas, nomeadamente 18 meses para a resina e 36 meses para o endurecedor (fornecido em pó).

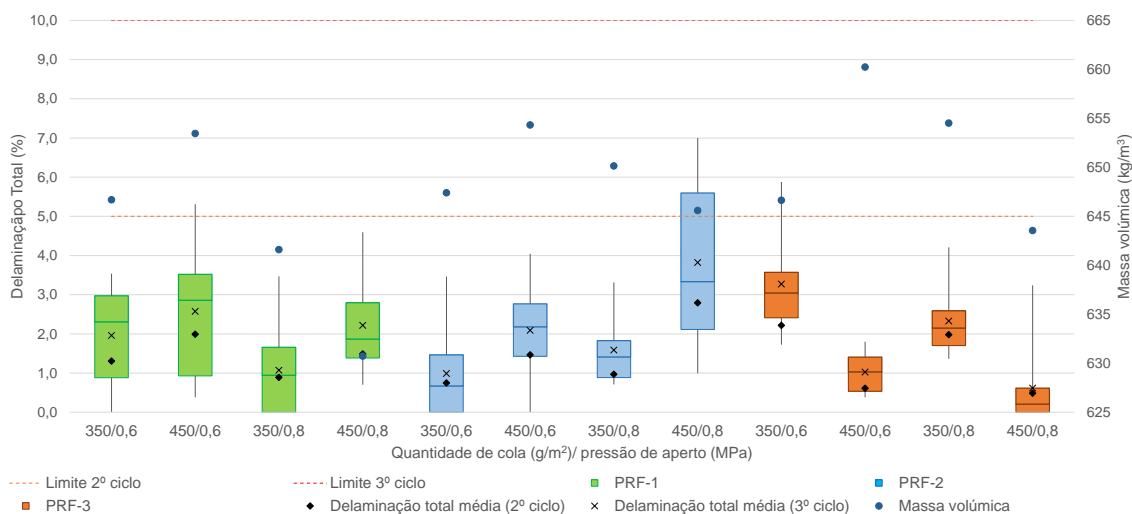


Figura 3.4 – Delaminação total registada após o 3º ciclo – colas do tipo PRF

A análise da Figura 3.4 demonstra que colas do mesmo tipo (PRF) são influenciadas de forma completamente diferente pelo aumento da pressão de aperto e/ou quantidade de cola, como referido anteriormente. Enquanto as colas PRF-1 e PRF-3 apresentaram tendência para diminuição da delaminação total média com o aumento da pressão de aperto (quantidade de cola fixa), a cola PRF-2 apresentou tendência oposta. Por outro lado, o aumento da quantidade de cola (pressão de aperto fixa) conduziu a um aumento

significativo na delaminação para as colas PRF-1 e PRF-2. Comportamento inverso foi observado no caso da cola PRF-3.

Em suma, verifica-se que as colas PRF-1 e PRF-2 apresentam melhor desempenho para menores quantidades de cola, ao invés da cola PRF-3 que apresenta melhor desempenho para maiores quantidades de cola em combinação com maior pressão de aperto.

3.2.5.2 Colas do tipo MUF

Tal como para as colas PRF são apresentados no Quadro 3.3 os resultados obtidos de ensaios em provetes colados com colas MUF. Apesar dos melhores resultados obtidos serem semelhantes para as duas colas (aproximadamente 1,0% após o 3º ciclo), a cola MUF-2 apresentou na generalidade resultados inferiores à cola MUF-1. Os resultados individuais de delaminação dos provetes encontram-se no Anexo A (Quadro A.7 a Quadro A.9).

Quadro 3.3 – Resumo da delaminação total (média e máxima) obtida em provetes colados com colas do tipo MUF

Cola	Quantidade de cola (g/m ²)	Pressão de aperto (MPa)	TF (min)	Massa volúmica (kg/m ³)	Nº de provetes	Delaminação total média (valor máximo)	
						2º ciclo (%)	3º ciclo (%)
MUF-1	400	0,6	10/11/19	654	21	0,8 (3,3)	1,0 (3,6)
		0,8	15	656	7	2,7 (7,3)	3,0 (9,1)
	500	0,6	5	652	7	2,6 (4,5)	2,9 (5,4)
		0,8	5	649	7	2,5 (5,5)	2,9 (5,5)
	400*	0,6	5/10	661	14	2,4 (7,8)	2,8 (8,8)
	MUF-2	350	0,6	13	636	7	0,9 (4,0)
0,8			12	647	7	1,4 (3,4)	1,9 (4,3)
450		0,6	5/7	656	14	1,3 (4,3)	1,7 (4,7)
		0,8	5	640	7	0,7 (1,3)	0,9 (2,3)

Nota: Valores sublinhados correspondem a situações em que se verificou apenas 1 provete com delaminação total excessiva. Valores a negrito correspondem a situações em que se observaram 2 ou mais provetes com delaminação total excessiva. * provetes obtidos da colagem realizada com a razão resina/ endurecedor de 100/35.

Da análise dos resultados obtidos dos elementos colados com MUF-1, e através da visualização da Figura 3.5, verificou-se um melhor desempenho com 400 g/m² e 0,6 MPa. Para valores de 0,8 MPa não se verificou influência significativa com a variação da quantidade de cola. No entanto, o aumento da quantidade de cola produziu efeito na delaminação apenas para níveis de pressão de aperto inferiores (0,6 MPa), tendo-se registado um aumento significativo da delaminação (superior a 3 vezes).

Relativamente à cola MUF-2, registaram-se tendências inversas aquando do aumento da pressão de aperto mantendo fixa a quantidade de cola. Ainda assim, os resultados foram muito próximos (variação de 1%) para se poder considerar uma influência clara do aumento de pressão de aperto e/ou de quantidade de cola. Apesar do melhor desempenho de delaminação obtido com a cola MUF-2, verificou-se alguma dificuldade na realização da mistura da resina com o endurecedor quando comparada com a cola MUF-1 devido à maior viscosidade da resina.

De referir também que de acordo com a ficha técnica da cola MUF-2, para uma quantidade de cola de 250 g/m^2 , o tempo recomendado de pressão de aperto é de 4h. Assim, verificando-se um desempenho semelhante ao registado para 8h de pressão de aperto (350 g/m^2 ou 450 g/m^2), seria uma mais-valia em relação à cola MUF-1.

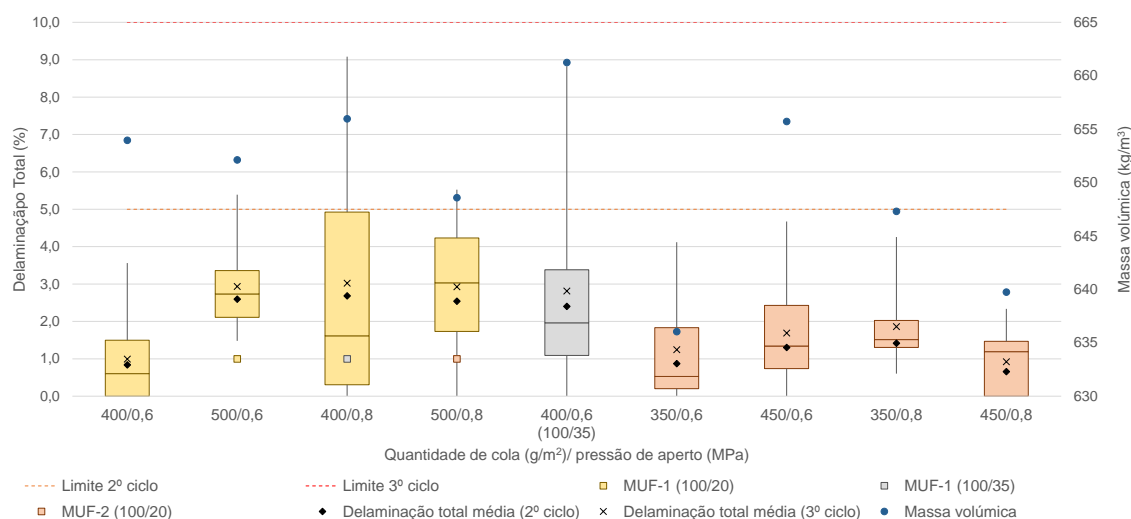


Figura 3.5 – Delaminação média (2º e 3º ciclos) para os diferentes cenários considerados – colas do tipo MUF

A ficha técnica de ambas as colas permite considerar diferentes valores de razão resina/endurecedor. Por uma questão de comparação de desempenho, nomeadamente com as colas do tipo PRF, considerou-se inicialmente a razão 100/20. Por outro lado, as fichas técnicas das colas indicam que para uma razão com maior quantidade de endurecedor (p. ex. 100/35), o tempo de prensagem necessário reduz substancialmente. Para a cola MUF-1 é indicado 9h de pressão de aperto para a razão 100/20 e de 4,5h para a razão 100/35, o que se poderá traduzir em ganhos económicos avultados em ambiente industrial, seja pela redução de custos energéticos na prensagem, ou pela duplicação do número de elementos produzidos no mesmo período de tempo.

Assim, foi considerado o estudo da análise da influência da razão resina/endurecedor no caso da cola MUF-1. O aumento da quantidade de endurecedor resultou no incremento de

delaminação significativo (triplicou para ambos os ciclos). Apesar de o valor médio dos 14 provetes testados (2 elementos) ser inferior ao limite de 5% após o 2º ciclo, ocorreu delaminação excessiva (superior a 5%) em 1 provete de cada elemento. Após o 3º ciclo de delaminação, tanto o valor médio como os valores individuais cumpriram os requisitos da EN 14080 (2013) (delaminação inferior a 10%). Os resultados apontam no sentido de que a razão 100/35 poderá ser adotada para efeitos de produção industrial.

3.2.5.3 Colas do tipo EPI

De acordo com Grostad e Bredesen (2014), as colas do tipo EPI são as mais recentes no fabrico de madeira lamelada colada. O autor indica que a referência EPI-2 foi aprovada para colagem de madeira lamelada colada de Pinho bravo em França. No entanto, não foram encontrados resultados de ensaios para comparação com o presente trabalho. Assim, procurou-se também no presente trabalho incluir o estudo do desempenho da colagem com colas do tipo EPI (Quadro 3.4). Numa primeira fase foi considerada a cola EPI-1 por sugestão da empresa que colaborou ao fornecer este tipo de colas, e somente após a análise dos resultados obtidos com a cola EPI-1, é que foi considerada a cola EPI-2.

A análise dos resultados obtidos (Quadro 3.4) sobre elementos colados com a cola EPI-1 demonstraram um inadequado desempenho para colagem de Pinho bravo. Os resultados dos 4 cenários não cumpriram os limites normativos (valores médios) para ambos os ciclos considerados na análise. Após o 2º ciclo, todos os provetes apresentaram delaminação total superior ao limite máximo de 5%. Após o 3º ciclo, do total de 28 provetes, somente 3 apresentaram delaminação total inferior a 10%. Da análise do Quadro A.10 do Anexo A, verifica-se que 8 dos 28 provetes apresentaram delaminação máxima para uma linha de cola, superior a 30% (valores a vermelho).

Apesar do desempenho inadequado, a análise dos valores médios de delaminação total demonstra um decréscimo perante o aumento da quantidade de cola, isto apenas para o patamar inferior de pressão de aperto (0,6 MPa). Para a pressão de aperto de 0,8 MPa os valores foram muito similares, não se verificando uma tendência clara de evolução de delaminação (Figura 3.6) através da variação da quantidade de cola, apesar de ter ocorrido um ligeiro decréscimo de 1%.

Relativamente à cola EPI-2, o patamar inferior de quantidade de cola considerado foi de 300 g/m². O objetivo inicial era a aplicação de 250 g/m², contudo verificaram-se dificuldades em garantir uma distribuição uniforme de cola por toda a superfície. Apesar de o patamar inferior (quantidade de cola) não ser diretamente comparável com a cola EPI-1, verificou-se em termos gerais, uma evolução positiva significativa no decréscimo de delaminação total.

Quadro 3.4 – Resumo da delaminação total média e máxima obtida de provetes colados com colas do tipo EPI

Cola	Quantidade de cola (g/m ²)	Pressão de aperto (MPa)	TF (min)	Massa volúmica (kg/m ³)	Nº de provetes	Delaminação total média (valor máximo)	
						2º ciclo (%)	3º ciclo (%)
EPI-1	250	0,6	5	649	7	17,8 (25,6)	20,5 (28,2)
		0,8	5	645	7	13,2 (30,6)	14,9 (32,1)
	350	0,6	5	653	7	13,2 (18,0)	13,8 (18,7)
		0,8	5	651	7	12,3 (14,5)	14,1 (16,8)
EPI-2	300	0,6	12	644	7	7,7 (10,8)	9,9 (12,9)
		0,8	11	635	7	0,7 (2,5)	0,7 (2,7)
	350	0,6	5	644	7	8,9 (17,8)	11,3 (20,0)
		0,8	5	634	7	3,3 (9,3)	4,1 (10,9)

Nota: Os valores apresentados a vermelho correspondem a valores médios acima dos limites estabelecidos pela EN 14080 (2013). Valores sublinhados correspondem a situações em que se verificou apenas 1 provete com delaminação total excessiva. Valores a negrito correspondem a situações em que se verificaram 2 ou mais provetes com delaminação total excessiva.

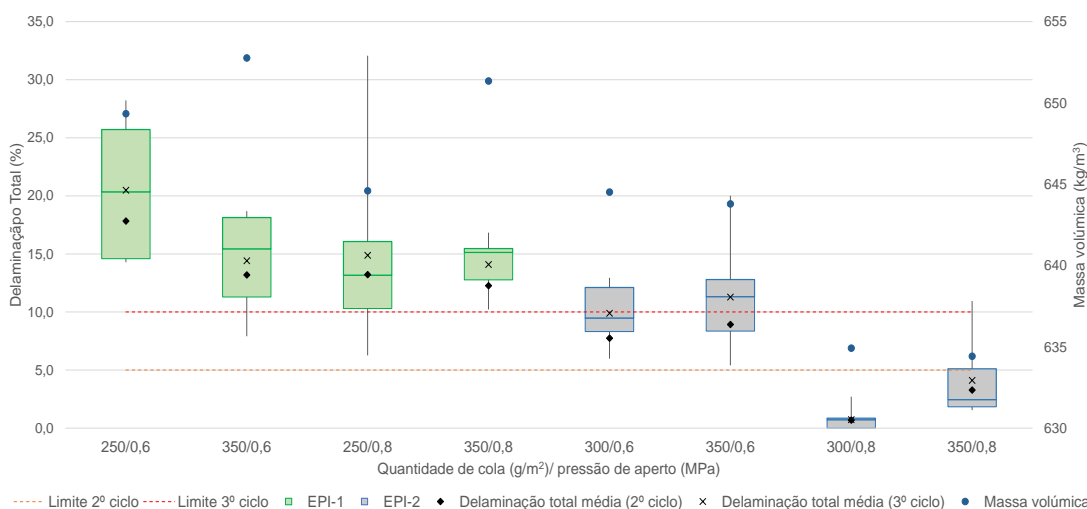


Figura 3.6 – Delaminação média (2º e 3º ciclos) para os diferentes cenários considerados – colas do tipo EPI

A combinação que permitiu obter melhor desempenho relativamente à delaminação foi 300 g/m² com 0,8 MPa. O mesmo patamar de pressão de aperto, combinado com 350 g/m² de quantidade de cola apresentou também um bom desempenho, tendo-se registado apenas 1 provete com delaminação excessiva após ambos os ciclos analisados (Quadro A.11 - Anexo A).

A partir da análise da Figura 3.6 verifica-se que para a cola EPI-2 o aumento da pressão de aperto exerceu uma influência positiva e significativa para ambas as quantidades de cola

consideradas. Por outro lado, o aumento da quantidade de cola sem variar a pressão de aperto demonstrou uma ligeira tendência para aumentar a delaminação.

Verificou-se por outro lado, que a tendência de evolução da massa volúmica se assemelha à registada na delaminação total. Contudo, a variação ocorrida na massa volúmica média dos elementos é bastante reduzida e da análise do Quadro A.11 do Anexo A, constatou-se que alguns provetes com massa volúmica na ordem dos 635 kg/m^3 também apresentam delaminação total excessiva.

Da análise do referido quadro, pode-se verificar ainda que os valores de delaminação total excessiva registados não podem ser atribuídos a valores excessivos de teor de água das lamelas, uma vez que os valores foram sempre inferiores a 15%.

3.2.5.4 Colas do tipo PUR

Em relação às colas do tipo PUR, foram consideradas diferentes referências, nomeadamente PUR-1, PUR-2 e PUR-3, tendo sido dado especial enfoque à cola PUR-1 devido à recomendação inicial do fabricante (Quadro 3.5). Os resultados dos ensaios de delaminação dos provetes colados com as colas PUR-2 e PUR-3 (com e sem primário) são apresentados no Quadro 3.6. No Anexo A são apresentados em detalhe os resultados obtidos dos diversos provetes para a cola PUR-1 (Quadro A.12), cola PUR-1+PR (Quadro A.13 e Quadro A.14), cola PUR-2 e PUR-2+PR (Quadro A.15) e por fim a cola PUR-3 e PUR-3+PR (Quadro A.16).

Do Quadro 3.5 verifica-se que a cola PUR-1 apresentou um inadequado desempenho à delaminação, após ambos os ciclos de ensaio pelo Método A. Numa primeira fase, foi produzido 1 elemento para cada combinação (quantidade de cola e pressão de aperto), tendo-se verificado um excelente desempenho para a combinação 160 g/m^2 com $0,8 \text{ MPa}$ (elemento nº 15) ao invés das restantes combinações que apresentaram valores bastante elevados (Quadro A.12 – Anexo A). Tendo em conta o excelente desempenho registado pelo elemento nº 15 (média de 1,8% para a delaminação total após 2º ciclo), foi fabricado 1 elemento adicional para validação a exemplo do que foi feito para o melhor cenário das restantes colas consideradas no presente trabalho. Contudo, como se pode verificar do Quadro A.12 (Anexo A) o desempenho não foi o esperado, tendo-se observado delaminação excessiva em todos os provetes para ambos os ciclos (elemento nº 42).

Quadro 3.5 – Resumo da delaminação total média e máxima obtida de provetes colados com colas do tipo PUR-1

Cola	Quantidade de cola (g/m ²)	Pressão de aperto (MPa)	TF (min)	Massa volúmica (kg/m ³)	Nº de provetes	Delaminação total média (valor máximo)	
						2º ciclo (%)	3º ciclo (%)
PUR-1	160	0,6	14	666	5	26,2 (30,0)	30,7 (32,7)
		0,8	5/14	641	14	10,0 (21,0)	11,5 (24,4)
	180	0,6	5	659	5	29,8 (41,5)	34,7 (46,2)
		0,8	5	634	7	18,7 (29,0)	20,7 (31,8)
PUR-1+PR	160	0,6	16	655	14	1,6 (4,2)	2,5 (8,3)
		0,8	16	643	14	0,8 (3,9)	1,2 (4,1)
	180	0,6	7/9	645	14	2,4 (17,4)	3,0 (19,2)
		0,8	7/9	643	14	0,1 (1,6)	0,4 (2,2)

Nota: Os valores apresentados a vermelho correspondem a valores médios acima dos limites estabelecidos pela EN 14080 (2013). Valores sublinhados correspondem a situações em que se verificou apenas 1 provete com delaminação total excessiva. Valores a negrito correspondem a situações em que se verificaram 2 ou mais provetes com delaminação total excessiva.

Uma análise detalhada aos elementos nº15 e nº42 (Quadro A.12 do Anexo A) permitiu concluir que a grande diferença de desempenho não se deveu à massa volúmica, nem ao teor de água das lamelas, pois são muito semelhantes entre si. No entanto, da análise da Figura 3.7, verifica-se que a grande diferença poderá estar relacionada com a orientação dos anéis de crescimento das várias lamelas. Tal conclusão é reforçada com o facto de no elemento nº15 os anéis de crescimento se encontrarem dispostos verticalmente na maioria das lamelas (exceto na lamela superior). Por sua vez o elemento nº42 apresenta lamelas em que os anéis de crescimento se encontram parcialmente dispostos tangencialmente à linha de cola. A Figura 3.8 ilustra os mesmos provetes após o 3º ciclo, sendo visível a ocorrência de delaminação, no elemento nº42, em zonas cujos anéis de crescimento se encontram dispostos horizontalmente e coincidentes com as linhas de cola, em especial na linha de cola 3.

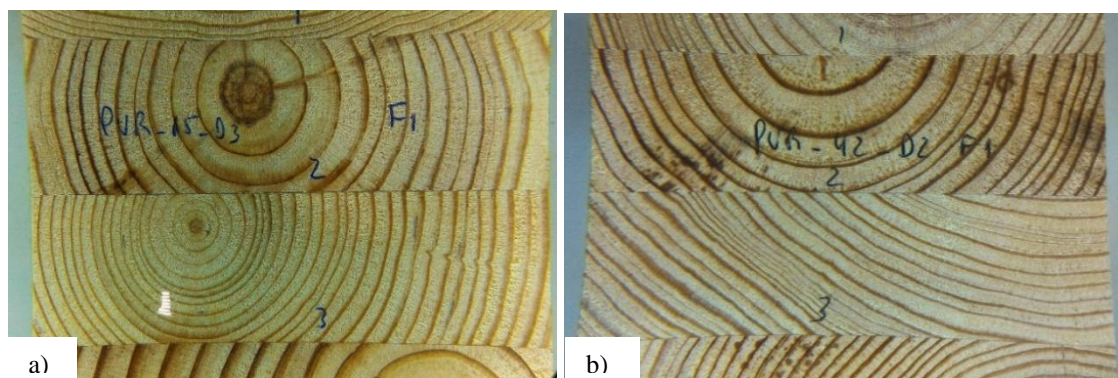


Figura 3.7 – Disposição dos anéis de crescimento em provetes antes do ensaio de delaminação: a) elemento nº 15, b) elemento nº 42

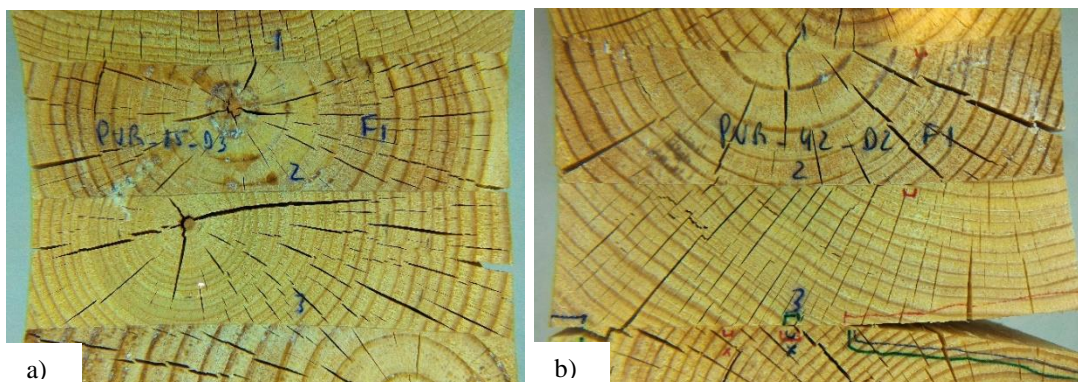


Figura 3.8 – Delaminação ocorrida em provetes após o 3º ciclo do ensaio de delaminação: a) elemento n° 15, b) elemento n° 42

Tendo em conta os resultados obtidos dos provetes fabricados com a cola PUR-1, a empresa fornecedora da cola foi contactada de modo a obter apoio técnico para melhorar o desempenho à delaminação. A proposta da empresa recaiu sobre a utilização de um primário (desenvolvido especificamente para colagem de Eucalipto) antes da aplicação da cola PUR-1 (PUR-1+PR).

A aplicação de primário previamente à cola PUR-1 (PUR-1+PR) resultou num excelente desempenho para todas as combinações (Quadro 3.5). O melhor desempenho foi obtido para 0,8 MPa e 180 g/m². Das quatro combinações consideradas verificou-se uma tendência para decréscimo de delaminação com o aumento da pressão de aperto (Figura 3.9). A mesma tendência foi verificada para o aumento da quantidade de cola (pressão de aperto igual a 0,8 MPa). No entanto, para o patamar de 0,6 MPa o mesmo não sucede, verificando-se um incremento de delaminação devido a um provete com delaminação excessiva. Se esse mesmo provete for descartado da análise, a delaminação é semelhante para ambas as quantidades de cola.

Relativamente ao referido provete com delaminação excessiva (D7) do elemento n°48, a delaminação total foi de 17,4% e 19,2%, após o 2º e 3º ciclos, respetivamente. Verificou-se também que a delaminação máxima (por linha de cola) foi superior ao limite de 30% (Quadro A.13 do Anexo A). Uma análise da delaminação observada no provete permitiu verificar que a maioria da delaminação ocorreu na linha de cola 3 (Figura 3.10), coincidente com anéis de crescimento dispostos horizontalmente em ambas as lamelas adjacentes à linha de cola. Para além da disposição dos anéis de crescimento, a delaminação excessiva pode ser associada também ao eventual défice de primário nas lamelas, dado que o provete em causa foi obtido de localização próxima do topo do elemento. O primário foi aplicado sob a forma de *spray* e o facto de ser transparente dificulta o controlo visual do produto aplicado.

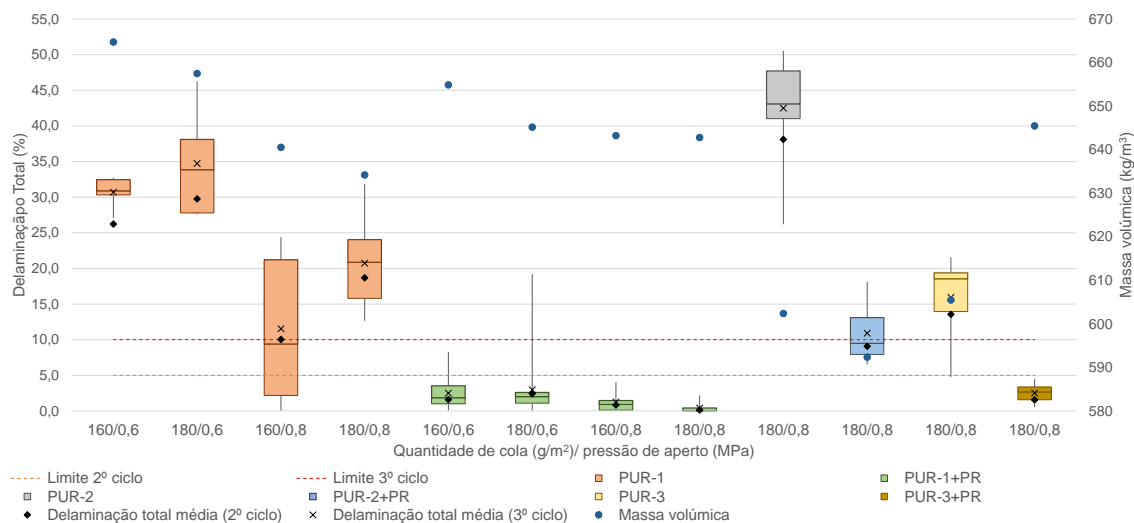


Figura 3.9 – Delaminação média (2º e 3º ciclos) para os diferentes cenários considerados – cola PUR-1+PR

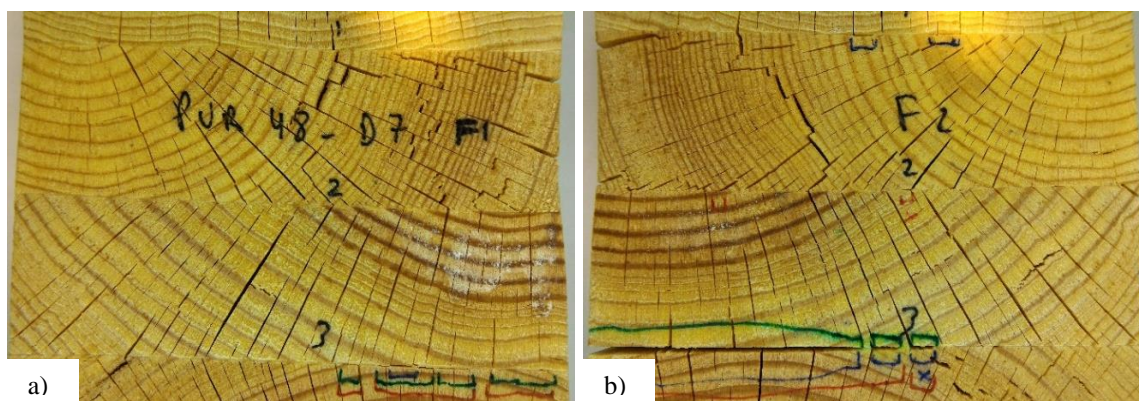


Figura 3.10 – Disposição dos anéis de crescimento no provete D7 (elemento nº 48) após o 3º ciclo do ensaio de delaminação: a) Face 1 b) Face 2

Não se prevê que tenha ocorrido influência de quaisquer outros parâmetros na delaminação excessiva observada, uma vez que a mesma ocorreu em excesso apenas no referido provete. Ainda assim, de referir que o teor de água das várias lamelas se situou abaixo de 15% e que a diferença entre as lamelas não excedeu os 4%. Também o TF não deverá ter exercido qualquer influência dada a semelhança de tempos registados entre ambos os elementos colados (nº 48 e nº 55) com a mesma quantidade de cola e pressão de aperto.

Cola PUR-2 e PUR-3 com e sem primário

Relativamente às colas PUR-2 e PUR-3 (com e sem primário), foram obtidos diferentes desempenhos quando comparadas entre si e com a cola PUR-1. Contudo, de registar que também para estas colas se verificou que a não aplicação de primário conduz a valores excessivos de delaminação (Quadro 3.6 e Figura 3.9).

O desempenho geral da cola PUR-2 verificou-se inadequado mesmo com a aplicação de primário (PUR-2+PR), apresentando valores médios bem acima do limite de 5% após o 2º ciclo e ligeiramente acima do limite de 10% após o 3º ciclo. No entanto, é de registar a evolução significativa da delaminação total na cola PUR-2+PR, tendo sido registado um decréscimo de aproximadamente 30% em ambos os ciclos. Do total de 14 provetes apenas 1 apresentou delaminação total inferior a 5% após o 2º ciclo e 4 provetes apresentaram delaminação total inferior a 10% após o 3º ciclo. A presença de delaminação verificou-se, tal como anteriormente, em zonas onde os anéis se encontram dispostos horizontalmente.

Relativamente à cola PUR-3 e PUR-3+PR verificou-se um decréscimo acentuado na delaminação total média com a aplicação prévia de primário. Os valores de PUR-3+PR indicam o potencial da cola para o fabrico de MLC, permitindo uma redução significativa do tempo de prensagem dos elementos de 350 minutos (PUR-1+PR) para 150 minutos (PUR-3+PR).

Quadro 3.6 – Resumo da delaminação total média e máxima obtida de provetes colados com colas do tipo PUR-2 e PUR-3

Cola	Quantidade de cola (g/m ²)	Pressão de aperto (MPa)	TF (min)	Massa volúmica (kg/m ³)	Nº de provetes	Delaminação total média (valor máximo)	
						2º ciclo (%)	3º ciclo (%)
PUR-2	180	0,8	5	602	7	38,1 (46,8)	42,5 (50,5)
PUR-2 + PR	180	0,8	5	592	7	9,1 (16,8)	10,9 (18,1)
PUR-3	180	0,8	5	605	7	13,6 (19,6)	15,9 (21,6)
PUR-3 + PR	180	0,8	5	645	7	1,6 (3,8)	2,5 (4,5)

Nota: Os valores apresentados a vermelho correspondem a valores médios acima dos limites estabelecidos pela EN 14080 (2013). Valores sublinhados correspondem a situações em que se verificou apenas 1 provete com delaminação total excessiva. Valores a negrito correspondem a situações em que se verificaram 2 ou mais provetes com delaminação total excessiva.

Procurou-se ainda assim encontrar a causa para o inadequado desempenho das colas PUR-2, PUR-2+PR e PUR-3. Em primeiro lugar a massa volúmica não poderá ser responsável devido ao facto de os valores médios dos elementos (e dos provetes) em causa serem inferiores aos registados nos elementos colados com a cola PUR-1 (com e sem primário) (Quadro 3.5).

Em relação aos teores de água verificaram-se diversas lamelas com valores acima dos 15% nos vários elementos. Ainda assim, no caso da cola PUR-2 o valor mais elevado foi de 15,4% (apenas 1 lamela) e na cola PUR-2+PR duas das lamelas apresentaram valores acima de 15% com valor máximo de 16,2%. Quanto ao elemento nº 95 (cola PUR-3) todas as lamelas apresentaram teor de água acima dos 15%, com valor máximo de 17,4%. Por fim o elemento nº 96 (cola PUR-3+PR) apresentou 3 das 4 lamelas com teor de água máximo

de 17,7%. Tendo em conta os valores apresentados e as diferenças de comportamento à delaminação, não parece razoável considerar que os teores de água acima dos limites estipulados pela EN 14080 (2013) tenham sido a causa da delaminação excessiva observada.

Influência do tempo de ativação do primário

Tendo em consideração o excelente desempenho à delaminação obtido pela cola PUR-1+PR, procurou-se perceber qual o impacto do tempo decorrido desde a aplicação do primário nas lamelas até à aplicação da cola e restante processo de assemblagem na qualidade da colagem.

Para o estudo preliminar foi considerado o fabrico de 3 elementos de 500 mm de comprimento com as condições de assemblagem respeitantes aos melhores resultados obtidos com a cola PUR-1+PR (180 g/m² e 0,8 MPa). De cada elemento foram obtidos 4 provetes para ensaio de delaminação pelo Método A, sendo apresentados os resultados no Quadro 3.7.

Quadro 3.7 – Resumo da delaminação total média e máxima obtida de provetes colados com colas do tipo PUR-1+PR - diferentes períodos decorridos após aplicação de primário

Cola	Quantidade de cola (g/m ²)	Pressão de aperto (MPa)	Tempo de ativação do primário	Massa volúmica (kg/m ³)	Nº de provetes	Delaminação total média (máximo)	
						2º ciclo (%)	3º ciclo (%)
PUR-1 + PR	180	0,8	10 min	643	14	0,1 (1,6)	0,4 (2,2)
			25 h	631	4	0,5 (2,0)	0,8 (2,3)
			7 dias	631	4	6,0 (18,0)	6,7 (19,2)
			14 dias	621	4	0,7 (1,6)	1,1 (2,9)

Nota: Os valores apresentados a vermelho correspondem a valores médios acima dos limites estabelecidos pela EN 14080 (2013). Valores sublinhados correspondem a situações em que se verificou apenas 1 provete com delaminação total excessiva. Valores a negrito correspondem a situações em que se verificaram 2 ou mais provetes com delaminação total excessiva.

Dos resultados obtidos é perceptível o bom desempenho da colagem realizada com períodos de ativação do primário de 25h e/ou 14 dias. Este desempenho poderá permitir a criação de *stock* de lamelas já devidamente preparadas (espessura final) para receber a cola em ambiente industrial. Ainda assim, de referir que estes resultados foram preliminares e obtidos em condições laboratoriais em que não houve contacto entre as superfícies das lamelas após a aplicação do primário e até à aplicação da cola.

Em relação aos provetes obtidos do elemento colado 7 dias após aplicação do primário, verificou-se um desempenho desigual em 2 dos 4 provetes (Quadro A.14 do Anexo A). A delaminação ocorrida nos 2 provetes (localizados nas extremidades) foi quase exclusivamente nas faces correspondentes ao topo do elemento. No provete D1-face 1

registou-se 86% e no provete D4-face 2 100% da delaminação dos respetivos provetes. Dado que o inadequado desempenho foi registado apenas nas faces de extremidade do elemento, a delaminação registada poderá estar relacionada com a incorreta aplicação de primário nas superfícies. Nos 2 provetes centrais a delaminação foi praticamente inexistente após ambos os ciclos do ensaio de delaminação. A viabilidade de colagem com cola PUR-1 sete dias após aplicação de primário não deve ser descartada. Contudo, de referir a necessidade de garantir a correta aplicação de primário em toda a superfície das lamelas a colar.

3.2.6 Resistência ao corte – resultados e discussão

De cada elemento colado foram retiradas 7 secções transversais com aproximadamente 50 mm de comprimento. Cada uma das secções foi posteriormente dividida de modo a obter 2 provetes, perfazendo um total de 14 provetes por cada elemento de 1000 mm de comprimento, com dimensões aproximadas de 50 x 50 x 120 mm³. Destes, 10 provetes foram objeto de ensaio pela linha de cola e os restantes 4 foram ensaiados pela madeira. O ensaio foi realizado em controlo de deslocamento a uma taxa constante de 0,06 mm/s. Após cada ensaio foi registado o valor máximo de carga aplicada, bem como a percentagem de rotura pela madeira (WFP – *Wood Failure Percentage*).

Para a medição da WFP foi usada uma película subdividida em 100 quadrículas em que cada quadrícula corresponde a 1%. Foi considerada rotura pela madeira quando ambas as faces apresentavam fibras de madeira na mesma área. Para melhor contabilização da WFP ocorrida nos provetes colados com as colas do tipo MUF, EPI e PUR (colas brancas), foi utilizada uma mistura de Floroglucinol (2%) com solução de Ácido clorídrico (10%) em partes iguais. A referida mistura quando em contacto com a madeira evidencia a lenhina, que toma tons de rosa, permitindo assim distinguir as zonas onde a rotura ocorreu pela linha de cola (coesiva ou adesiva) das zonas em que a rotura ocorreu pela madeira. A Figura 3.11 ilustra um exemplo da diferença de coloração associada à rotura pela madeira e pela linha de cola num ensaio não válido (presença de nós na interface das lamelas adjacentes).



Figura 3.11 – Interface de linha de cola após ensaio de resistência ao corte para análise da WFP (cola branca – aplicação de mistura para evidenciar lenhina)

No caso das colas do tipo PRF não foi necessária a aplicação da mistura, devido à cor escura que apresentam permitir uma fácil distinção entre rotura pela madeira e pela cola (Figura 3.12). Os resultados obtidos encontram-se listados no Quadro 3.8 para as colas do tipo PRF e MUF e no Quadro 3.9 para as colas do tipo EPI e PUR. Do total de ensaios realizados só são apresentados os relativos às linhas de cola isentas de defeitos (p. ex. nós e bolsas de resina). Os resultados dos ensaios de rotura pela madeira são relativos apenas aos que ocorreram em lamelas isentas dos defeitos anteriormente referidos. É igualmente apresentada a eficiência da linha de cola, obtida da relação entre a resistência ao corte da linha de cola e da madeira.

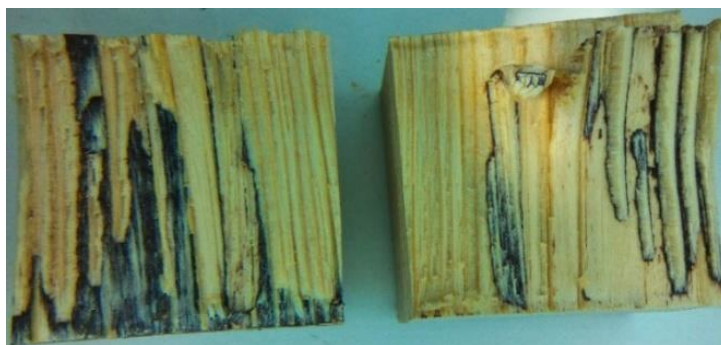


Figura 3.12 – Interface de linha de cola após ensaio de resistência ao corte para análise da WFP (cola PRF)

Uma análise geral dos resultados obtidos permite verificar que diferentes colas não conduzem a diferenças significativas de resistência ao corte. Os valores médios variaram entre 11,1 MPa e 14,8 MPa, tendo-se verificado que os valores mais baixos ocorreram geralmente nos provetes fabricados com colas do tipo PUR sem primário. Verifica-se igualmente que nas colas PUR (sem primário) e na cola EPI-1 os valores de WFP foram significativamente inferiores aos obtidos com as restantes colas. As colas/cenários referidos coincidem com a ocorrência de delaminação total excessiva, podendo-se concluir que para o Pinho bravo sem tratamento preservador, os valores de WFP podem ser considerados um bom indicador de uma inadequada qualidade de colagem.

Da análise dos resultados obtidos verifica-se também que regra geral, a resistência ao corte pela linha de cola foi ligeiramente inferior à resistência ao corte pela madeira. No entanto, verificou-se um excelente desempenho nas colas do tipo PRF e MUF, que apresentaram uma eficiência entre 0,93 e 1,05.

Quadro 3.8 – Resumo da resistência ao corte e WFP das linhas de cola e resistência ao corte pela madeira – colas PRF e MUF – Pinho bravo sem tratamento

Cola	Quantidade de cola (g/m ²)	Pressão de aperto (MPa)	Massa volúmica (kg/m ³)	Linha de cola			Madeira		Eficiência da linha de cola
				Nº de provetes	Resist. Corte (Desv. padrão) (MPa)	WFP (%)	Nº de provetes	Resist. Corte (Desv. padrão) (MPa)	
PRF-1	350	0,6	647	22	13,8 (1,5)	99	15	14,9 (0,9)	0,93
		0,8	642	84	13,5 (1,3)	95	44	14,2 (1,2)	0,95
	450	0,6	653	24	14,7 (2,0)	98	16	15,1 (1,3)	0,97
		0,8	631	26	13,7 (1,1)	97	14	14,1 (0,8)	0,97
PRF-2	350	0,6	647	60	14,6 (1,1)	99	32	14,6 (1,5)	1,00
		0,8	653	28	14,0 (2,0)	99	15	14,0 (1,3)	1,00
	450	0,6	650	28	14,1 (1,4)	99	16	15,1 (1,2)	0,93
		0,8	646	29	14,5 (2,0)	99	12	14,5 (1,7)	1,00
PRF-3	350	0,6	649	27	13,4 (1,8)	99	16	14,2 (1,9)	0,94
		0,8	655	22	13,9 (1,7)	99	14	15,5 (1,5)	0,90
	450	0,6	659	27	13,6 (1,3)	99	15	13,5 (1,8)	1,01
		0,8	644	60	14,4 (1,4)	100	30	15,1 (1,7)	0,95
MUF-1	400	0,6	654	84	13,9 (1,2)	96	47	13,3 (1,2)	1,05
		0,8	656	27	14,2 (1,5)	98	16	15,1 (2,0)	0,94
	500	0,6	652	29	13,0 (1,1)	98	15	15,0 (1,6)	0,87
		0,8	649	29	14,8 (1,2)	99	15	14,3 (1,2)	1,03
400*	0,6	661	57	13,2 (1,6)	95	30	13,8 (0,9)	0,96	
MUF-2	350	0,6	636	26	13,3 (1,5)	94	13	14,3 (2,7)	0,93
		0,8	647	23	12,3 (1,4)	93	16	12,8 (1,3)	0,96
	450	0,6	656	52	13,1 (1,6)	93	28	13,7 (1,7)	0,96
		0,8	640	27	11,7 (1,0)	91	15	12,4 (1,5)	0,94

A Figura 3.13 apresenta a nuvem de valores individuais obtidos da resistência ao corte e percentagem de rotura pela madeira. Da análise da mesma é possível verificar o número reduzido de linhas de cola (12) que não cumpriram os requisitos mínimos da norma EN 14080 (2013). A exemplo do que se verificou através dos ensaios de delaminação, as linhas de cola que não cumpriram os mínimos estabelecidos ocorreram em provetes obtidos de elementos fabricados com as colas EPI-1 (5 linhas de cola), PUR-1 (6 linhas de cola) e PUR-3 (1 linha de cola). Verifica-se também a proximidade dos valores obtidos aos mínimos regulamentares para as colas referidas e também para a cola PUR-2. Em suma, as colas do tipo PUR só devem ser utilizadas se for prevista a aplicação prévia de primário na superfície das lamelas.

Quadro 3.9 – Resumo da resistência ao corte e WFP das linhas de cola e resistência ao corte pela madeira – colas EPI e PUR – Pinho bravo sem tratamento preservador

Cola	Quantidade de cola (g/m ²)	Pressão de aperto (MPa)	Massa volúmica (kg/m ³)	Linha de cola			Madeira		Eficiência da linha de cola	
				Nº de provetes	Resist. Corte (Desv. padrão) (MPa)	WFP (%)	Nº de provetes	Resist. Corte (Desv. padrão) (MPa)		
EPI-1	250**	0,6	649	28	12,5 (1,4)	83	14	15,7 (2,4)	0,80	
		0,8	645	27	12,2 (1,9)	91	12	15,6 (1,9)	0,78	
	350**	0,6	653	25	11,7 (2,7)	74	16	15,1 (1,2)	0,77	
		0,8	651	24	13,0 (1,9)	79	14	14,5 (1,8)	0,90	
EPI-2	300**	0,6	644	29	12,5 (1,3)	86	14	14,7 (1,8)	0,85	
		0,8	635	22	12,8 (1,2)	96	16	14,6 (2,1)	0,88	
	350**	0,6	644	26	13,1 (1,0)	89	14	14,2 (1,6)	0,92	
		0,8	634	22	12,9 (0,9)	94	14	13,6 (1,8)	0,95	
PUR-1	160	0,6	666	29	11,6 (1,9)	71	15	14,3 (1,8)	0,81	
		0,8	641	44	13,5 (1,4)	87	29	14,4 (1,1)	0,94	
	180	0,6	659	25	11,4 (1,5)	61	15	14,0 (2,4)	0,81	
		0,8	634	25	13,8 (1,2)	80	16	15,0 (1,5)	0,92	
PUR-1 + PR	160	0,6	655	52	14,1 (1,6)	89	31	15,0 (1,4)	0,94	
		0,8	643	51	13,7 (1,0)	93	23	14,3 (1,6)	0,96	
	180	0,6	645	55	13,7 (1,4)	93	30	15,5 (1,8)	0,88	
		0,8	643	50	13,5 (1,1)	93	30	14,4 (1,9)	0,94	
PUR-1 + PR	25h	180	0,8	631	11	13,0 (1,0)	99	7	13,3 (1,3)	0,98
	7dias		631	12	12,6 (1,4)	99	5	14,7 (0,8)	0,86	
	14dias		621	8	12,9 (1,3)	92	7	14,8 (0,8)	0,87	
PUR-2	180	0,8	602	22	11,4 (0,9)	70	15	13,2 (2,3)	0,86	
PUR-2+PR	180	0,8	592	24	11,4 (1,3)	88	13	12,2 (1,7)	0,93	
PUR-3	180	0,8	605	18	11,1 (0,8)	68	13	12,6 (1,4)	0,88	
PUR-3+PR	180	0,8	645	21	12,5 (2,0)	93	13	13,4 (1,2)	0,93	

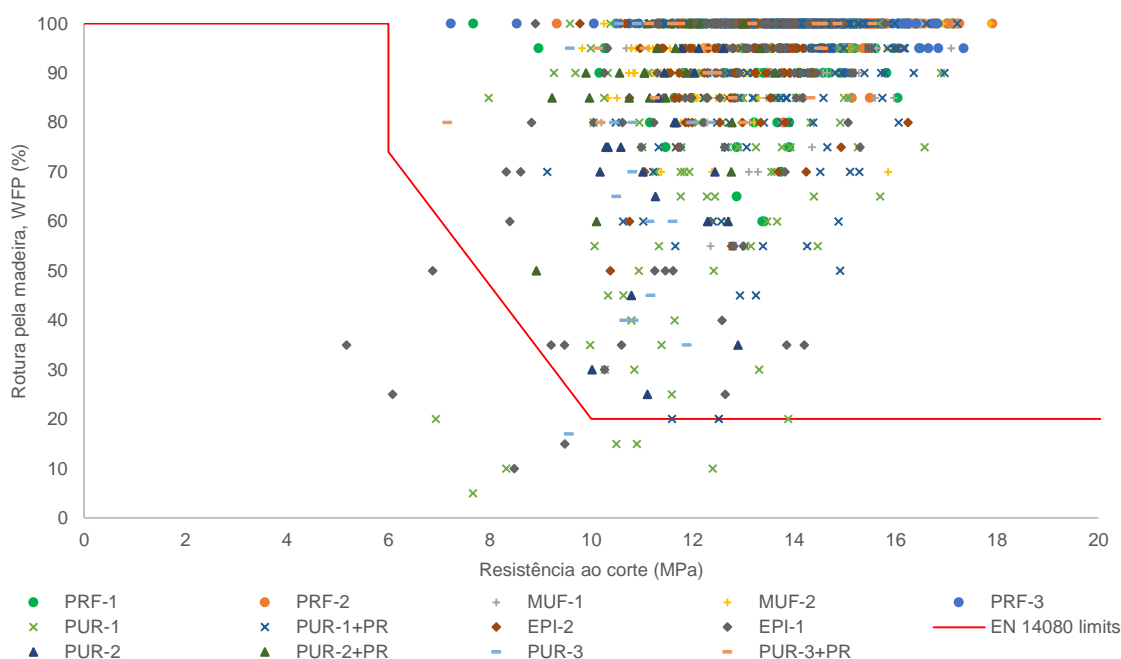


Figura 3.13 – Resultados da resistência ao corte e percentagem de rotura pela madeira para todas as colas (valores individuais) – Pinho bravo sem tratamento

3.2.7 Conclusões

Em termos gerais a madeira de Pinho bravo sem tratamento permite um bom desempenho de colagem de face, como havia sido demonstrado por estudos anteriores (Lampreia, 2010, e Gaspar, 2010). A influência da quantidade de cola e da pressão de aperto na delaminação total varia de cola para cola.

A análise detalhada por cenário e por tipo de cola foi realizada anteriormente, de modo a perceber a influência de cada parâmetro na qualidade de colagem. Foram tidos em conta os seguintes parâmetros: i) quantidade de cola; ii) pressão de aperto; iii) teor de água; iv) massa volúmica; e v) orientação dos anéis de crescimento.

Verificou-se que a generalidade das lamelas consideradas na fabricação dos provetes apresentava teor de água abaixo de 15%. Também a diferença de teor de água entre lamelas adjacentes não foi superior a 5%. Nas situações em que o teor de água das lamelas se situou (ligeiramente) acima de 15%, verificou-se que o mesmo não terá sido a causa principal da eventual delaminação excessiva registada.

Relativamente à massa volúmica, é referida por Vick (1999) a dificuldade de colagem de lamelas com massas volúmicas acima de 700 kg/m^3 , sem particularizar para uma espécie específica. Contudo, desde então vários avanços tecnológicos decorreram não se tendo

verificado delaminação excessiva em provetes cuja causa para tal facto possa ser exclusivamente imputada à massa volúmica excessiva. Em geral, não se verificou a ocorrência de mais delaminação na linha de cola 3 (interface com lamela de massa volúmica superior) em relação às restantes linhas de cola dos provetes.

A disposição das lamelas (disposição dos anéis de crescimento) no fabrico dos elementos teve em conta os requisitos para aplicação em Classe de Serviço 3. Da análise dos resultados verificou-se que em bastantes provetes com delaminação excessiva, a mesma ocorreu adjacente a anéis de crescimento dispostos tangencialmente à linha de cola. Em alguns casos verificou-se a presença de anéis de crescimento de outono com largura acima da média.

Em relação ao tempo fechado, é apresentada na Figura 3.14 a tendência registada nos elementos colados sob as mesmas condições de quantidade de cola e pressão de aperto e em que foram registados diferentes tempos durante o processo de colagem. Da análise da referida figura, é clara uma tendência para diminuição da delaminação com o aumento do tempo fechado. Esta mesma tendência foi observada por Knorz et al. (2014) na avaliação da colagem de Freixo com colas do tipo PRF e MUF. Por outro lado, Bourreau et al. (2013) obtiveram melhor desempenho à delaminação para tempo fechado de 5 minutos em comparação com tempo fechado de 15 minutos. No entanto, o estudo focou-se na colagem de diversas espécies tropicais com cola do tipo PRF. A cola PRF - 2 apresentou um aumento de delaminação com o aumento do tempo fechado de 10 para 14 minutos, seguindo a tendência observada por Bourreau et al. (2013).

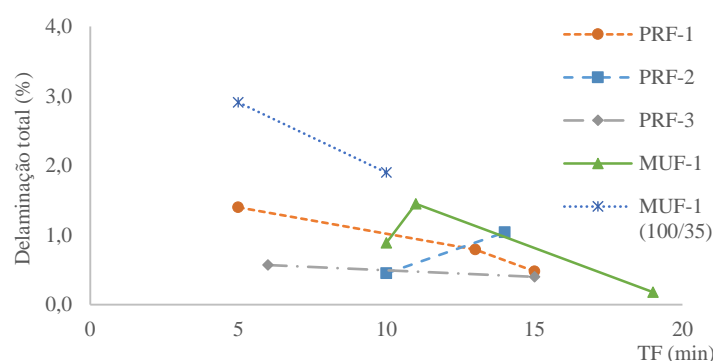


Figura 3.14 –Delaminação total (valores médios) após o 2º ciclo em função do tempo fechado

Seguidamente, apresenta-se no Quadro 3.10 um sumário dos resultados obtidos dos ensaios de delaminação para todas as colas consideradas nas colagens com Pinho bravo sem tratamento. São listadas apenas as combinações de quantidade de cola e pressão de aperto que deram lugar aos melhores resultados. A análise dos mesmos permite concluir que a cola PUR-1+PR apresentou um excelente desempenho através da obtenção dos melhores

resultados de entre as várias colas, com valor médio de 0,4% após o 3º ciclo. De entre as colas PUR, a cola PUR-3+PR apresentou bons resultados, mostrando-se uma alternativa fiável à cola PUR-1+PR, reduzindo significativamente o período de prensagem para metade (3h).

Quadro 3.10 – Resumo dos resultados de delaminação obtidos para os melhores desempenhos das várias colas consideradas no presente estudo – Pinho bravo sem tratamento

Cola	Quantidade de cola (g/m ²)	Pressão de aperto (MPa)	Massa volúmica (kg/m ³)	Nº de provetes	Delaminação total média (valor máximo)	
					2º ciclo (%)	3º ciclo (%)
PRF-1	350	0,8	642	21	0,9 (3,5)	1,1 (3,5)
PRF-2	350	0,6	647	14	0,7 (2,5)	1,0 (3,5)
PRF-3	450	0,8	644	14	0,5 (2,4)	0,6 (3,2)
MUF-1	400	0,6	654	14	0,8 (3,3)	1,0 (3,6)
MUF-2	450	0,8	640	7	0,7 (1,3)	0,9 (2,3)
EPI-1	350	0,8	651	7	12,3 (14,5)	14,1 (16,8)
EPI-2	300	0,8	635	7	0,7 (2,7)	0,7 (2,7)
PUR-1+PR	180	0,8	643	14	0,1 (1,6)	0,4 (2,2)
PUR-2+PR	180	0,8	592	7	9,1 (16,8)	10,9 (18,1)
PUR-3+PR	180	0,8	645	7	1,6 (3,8)	2,5 (4,5)

Nota: Os valores apresentados a vermelho correspondem a valores médios acima dos limites estabelecidos pela EN 14080 (2013). Valores a negrito correspondem a situações em que se verificaram 2 ou mais provetes com delaminação total excessiva.

As colas PRF e MUF conduziram igualmente a excelente qualidade de colagem. Contudo, as colas EPI-1, PUR-2 e PUR-2+PR e PUR-3, revelaram inadequado desempenho na colagem de Pinho bravo. De referir os resultados promissores obtidos pela cola EPI-2 com período de prensagem de 2h. Dado que a ficha técnica desta cola indica um período mínimo de 20 minutos, considera-se oportuno avaliar futuramente a qualidade de colagem para tempos de prensagem próximos de 20 minutos. As colas PUR e EPI apresentam como principal vantagem, relativamente às restantes colas, a ausência de libertação de formaldeídos. Por outro lado, a cola PUR demonstrou a necessidade de aplicação de primário o que pode conduzir a custos acrescidos ao produto final. No entanto, a aplicação de primário poderá permitir o armazenamento das lamelas já com espessura final em caso de necessidade. A cola EPI apresenta como principal desvantagem em ambiente laboratorial, o reduzido tempo de montagem, que no caso do tempo fechado não deve exceder 15 minutos. De referir que em ambiente industrial o reduzido tempo de montagem poderá não ser uma limitação.

Relativamente às colas MUF e PRF os resultados são bastante idênticos entre si. Contudo, as colas MUF apesar de apresentarem como vantagem estética a cor branca, apresentam o inconveniente de requererem um tempo de prensagem bastante superior (total de 9 horas)

em comparação com as restantes colas (regra geral 3 a 4 horas). Trabalhos futuros poderão ser realizados, nomeadamente para a cola MUF-2 a fim de verificar a viabilidade de utilizar outra *razão* resina/endurecedor que permita reduzir o tempo de prensagem. De referir também que a resina das colas MUF apresenta uma viscosidade bastante elevada o que dificultou a mistura com o respetivo endurecedor. Contudo, em ambiente industrial esta não será certamente uma condicionante.

As colas PRF apresentaram um bom desempenho, como esperado com base nos estudos realizados anteriormente. O estudo mais recente realizado por Lampreia (2010) demonstrou claramente o excelente desempenho da colagem obtido pela utilização da cola PRF-1, nomeadamente através de ensaios de delaminação. Nesse mesmo estudo foram considerados no fabrico dos elementos os seguintes parâmetros: i) 445 g/m² para a quantidade de cola e ii) 0,6 MPa para a pressão de aperto. Dos provetes obtidos resultaram valores de delaminação total de 0,8% e 1,3%, após o 2º e 3º ciclos, respetivamente. Os resultados obtidos no presente trabalho encontram-se assim em linha com os obtidos anteriormente, tendo-se verificado a necessidade de menor quantidade de cola (350 g/m²) e maior pressão de aperto (0.8 MPa).

A análise comparativa entre as três colas PRF consideradas permite concluir que qualquer uma pode ser considerada no fabrico de madeira lamelada colada. No entanto, a cola PRF-3 apresenta uma vantagem relativamente às restantes colas PRF que está relacionada com o período de armazenamento bastante superior (18 meses para a cola e 36 meses para o endurecedor).

De referir por fim que os resultados aqui apresentados requerem validação em provetes obtidos de elementos produzidos em ambiente industrial.

3.3 Pinheiro bravo com tratamento (TMP)

O presente subcapítulo debruça-se sobre o comportamento da colagem de madeira de Pinho bravo com tratamento preservador aplicado por impregnação. É apresentado um enquadramento de estudos anteriores, prosseguindo com descrição dos trabalhos experimentais conduzidos. Segue-se a apresentação dos resultados obtidos de ensaios de delaminação segundo o Método A do Anexo C da norma EN 14080 (2013) e de resistência ao corte pela linha de cola e pela madeira segundo o Anexo D da referida norma. Por fim é realizada a análise dos resultados obtidos entre ambas as amostras de Pinho bravo consideradas no presente trabalho, bem como a comparação com resultados obtidos por outros autores e que se encontram disponíveis na bibliografia.

3.3.1 Estado da arte

Os estudos descritos em 3.2.1 demonstraram a aptidão da colagem de Pinho bravo sem tratamento através do uso de colas do tipo PRF e RF. No presente estudo ficou também comprovado o bom desempenho através de colas do tipo MUF e PUR para além de outras referências de colas do tipo PRF. Por outro lado, as colas do tipo EPI apresentaram resultados promissores, que carecem de validação futura.

Como referido anteriormente, o Pinho bravo apresenta enorme potencial para aplicação na Classe de Serviço 3, se aplicado o tratamento de preservação adequado. Contudo, segundo um estudo conduzido por Vick (1995) o nível de retenção do produto preservador CCA (Crómio-Cobre-Arsénio) afeta significativamente a durabilidade das ligações coladas com colas do tipo PRF.

Também no Pinho bravo tratado com produto preservador por impregnação foram conduzidos alguns estudos sobre a viabilidade de colagem. Gaspar (2006) conduziu um estudo com Pinho bravo tratado com um produto preservador do grupo dos azóis de cobre (TANALITH E 3492) adequado às classes de risco 3 e 4. Nesse estudo, a amostra foi dividida em 3 sub amostras: i) sem tratamento, ii) tratamento com taxa de retenção de 7,1 kg/m³ e iii) tratamento com taxa de retenção de 16,4 kg/m³. Um outro parâmetro que o autor fez variar foi a pressão de aperto, tendo considerado 3 níveis distintos (0,6 MPa, 0,9 MPa e 1,12 MPa). No total foram produzidas em ambiente industrial 27 vigas (2,88 m x 0,15 m x 0,08 m) com 5 lamelas de 3 cm de espessura cada coladas com cola do tipo PRF (Prefere 4099 e endurecedor 5824).

A caracterização mecânica consistiu na realização de ensaios de flexão das vigas e em ligações de topo, bem como ensaios de resistência à delaminação e resistência ao corte em provetes retirados das vigas após ensaio de flexão. Dos diferentes níveis de pressão de aperto considerados, o autor verificou que a delaminação foi mais elevada para níveis de pressão de aperto mais elevados (1,12 MPa). Verificou-se também o aumento da delaminação com o aumento da taxa de retenção, revelando-se excessiva para a amostra com taxa de retenção de 16,4 kg/m³ (níveis de retenção de tratamento para aplicação na classe de risco 4). No que à resistência à flexão das vigas diz respeito, o valor característico determinado foi superior a 28 MPa, permitindo enquadrar na classe de resistência GL 28h.

Gaspar (2010) deu conta de algumas debilidades na colagem da madeira tratada de Pinho bravo no estudo conduzido por Gaspar (2006). Assim, Gaspar (2010) definiu no estudo dois objetivos principais: i) a avaliação do efeito da temperatura de cura nas colagens e ii) o efeito do envelhecimento natural/artificial na percentagem de delaminação e na resistência ao corte.

Para o estudo do efeito da temperatura de cura na qualidade de colagem foram fabricadas 12 vigas (1,0 x 0,112 x 0,08 m) com 4 lamelas de 28 mm de espessura (após aparelhamento realizado até 6h antes da colagem). Foram avaliados 4 níveis de temperatura (20 °C, 30 °C, 40 °C e 45 °C) em combinação com 3 níveis de tratamento preservador (sem tratamento, 7,6 kg/m³, 19,1 kg/m³). O desempenho das colagens foi avaliado através de ensaios de resistência ao corte e ensaios de resistência à delaminação. Dos ensaios de resistência ao corte, Gaspar (2010) verificou que tanto o tratamento preservador como a temperatura de cura não influenciam significativamente os resultados, tendo obtido valores médios e individuais superiores a 10 MPa.

Em relação aos resultados dos ensaios de delaminação os autores verificaram que o aumento da temperatura de cura conduziu a valores inferiores de delaminação em relação às condições ambiente (20°C), cumprindo os requisitos da EN 386 (2001). Diferentes níveis de retenção de tratamento preservador provocaram diferentes percentagens de delaminação, tendo-se obtido valores mais elevados de delaminação para níveis de retenção de produto preservador mais elevados.

Tendo em conta os resultados obtidos por Gaspar, (2005 e 2010), havia a necessidade de avaliar alternativas à utilização de temperaturas elevadas (45°C) no processo de cura das colagens de madeira de Pinho bravo tratada. Lampreia (2010) prosseguiu desse modo o estudo da viabilidade da colagem de Pinho bravo tratado, tendo para tal utilizado primários do tipo novolak (versão original, HMR e nova versão, n-HMR).

Para a realização dos trabalhos, Lampreia (2010) utilizou também uma cola do tipo PRF (cola Prefere 4040 e endurecedor Prefere 5839) adequada para ambiente exterior. A cola diferiu da utilizada nos estudos conduzidos por Gaspar (2005, 2010) por questões de extinção da comercialização daquela referência de cola e de endurecedor por parte da empresa. Para avaliar a viabilidade da colagem foram conduzidos ensaios de corte e de delaminação em 18 elementos, cada um constituído por 4 lamelas de dimensões (1,0 m x 0,03 m x 0,12 m). O processo de colagem consistiu na aplicação de pressão de aperto de 0,6 MPa em ambiente controlado (temperatura de 20 °C e humidade relativa de 65 %). Lampreia et al. (2011) concluíram que a utilização de primários na colagem, apesar de melhorar a resistência à delaminação, revelou-se desnecessária (com a cola considerada) pois os valores obtidos sem utilização de primário cumpriram os requisitos normativos.

Recentemente Dias (2016) conduziu um estudo cujo objetivo foi avaliar a influência da fase de tratamento na qualidade de colagem de Pinho bravo. A análise consistiu na realização de ensaios de delaminação e resistência ao corte em madeira lamelada colada: i) sem tratamento; ii) com tratamento preservador aplicado antes da colagem e iii) com tratamento preservador aplicado após a colagem. A delaminação total obtida foi

semelhantes entre os 3 cenários, apesar de ligeiramente superior no caso da madeira lamelada colada produzida a partir de matéria-prima previamente tratada. A resistência ao corte foi inferior nos cenários de madeira tratada (antes e após colagem), não comprometendo os valores limite estabelecidos pela EN 14080 (2013).

Os estudos relativos à colagem de Pinho bravo com tratamento de preservação foram conduzidos com cola do tipo PRF. No presente estudo pretende-se alargar o espectro de resultados a outras colas, tais como MUF e PUR e outras referências de colas PRF cujo bom desempenho foi demonstrado para colagem de Pinho bravo sem tratamento.

3.3.2 Caracterização física da matéria-prima

Para avaliar a qualidade de colagem de Pinho bravo com tratamento preservador foi considerada uma amostra de 45 tábuas. A exemplo do que foi realizado anteriormente para a amostra de Pinho bravo sem tratamento preservador, a presente amostra foi armazenada em espaço climatizado durante todo o processo que antecedeu o uso da mesma para as colagens.

A caracterização física foi realizada para cada tábua seguindo os mesmos princípios descritos em 3.2.2. Os valores de massa volúmica determinados foram ligeiramente superiores aos obtidos da amostra de Pinho bravo sem tratamento, tendo-se obtido um valor médio e desvio padrão de $659,1 \pm 45,2 \text{ kg/m}^3$, respetivamente. O valor mínimo e máximo determinado foram de $583,8 \text{ kg/m}^3$ e de $761,2 \text{ kg/m}^3$.

Quanto ao teor de água foi seguido o procedimento adotado para a amostra de Pinho bravo sem tratamento (ver 3.2.2). Contudo, segundo a EN 14080 (2013) para tábuas tratadas com produto preservador, o valor de teor de água deve situar-se entre 11% e 18%, mantendo como diferencial máximo entre tábuas o valor de 5%. Antes da realização da colagem, cada tábua selecionada foi alvo de medição do teor de água através do higrómetro de agulhas. O valor médio registado foi de 18,1% com valor mínimo e máximo de 14,8% e 21,3%. Verificou-se também que 76% da amostra se situava acima de 18% pelas medições do higrómetro de agulhas.

Tendo em conta os valores obtidos foi realizada uma comparação entre os valores medidos pelo higrómetro de agulhas e o método de determinação do teor de água em estufa (Figura 3.15), seguindo a EN 13183-1 (2002). Foram recolhidos 24 provetes de diferentes tábuas cujos valores medidos pelo higrómetro de agulhas variaram entre 15% e 30%. Dos resultados obtidos, a diferença média entre ambos os métodos foi de 4,1%, tendo-se verificado reduzidas diferenças (iguais ou inferiores a 1%) para valores obtidos pelo higrómetro de agulhas na ordem dos 15%. Considerando a diferença registada entre

métodos e os valores máximos obtidos nas 45 tábuas pode-se concluir que toda a amostra de Pinho bravo com tratamento preservador possuía teor de água inferior a 18%, cumprindo os requisitos da EN 14080 (2013).

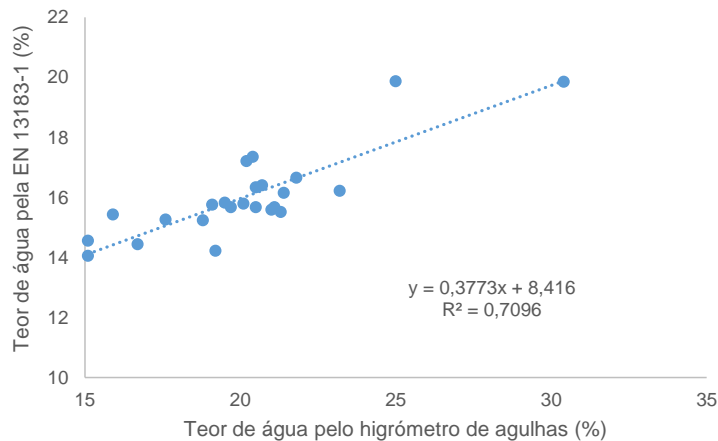


Figura 3.15 – Comparação entre métodos de determinação de teor de água (higrômetro de agulhas vs EN 13183 - 1)

Posteriormente ao processo de redução de espessura de cada tábua foi retirado um provete para medição do teor de água segundo a EN 13183-1 (2002), tendo sido registado o valor médio de 14,4%. Apenas 1 tábua apresentou teor de água acima de 18% tendo-se registado o valor de 20,8%. Adiante será realizada a análise da possível influência do teor de água na delaminação dos provetes e na resistência ao corte das linhas de cola.

3.3.3 Tratamento preservador considerado

Para o presente trabalho foi solicitado a uma empresa o fornecimento de madeira tratada por impregnação com retenção mínima adequada à Classe de Risco 3, para comparação com os resultados obtidos anteriormente por Gaspar (2006), Gaspar (2010) e Lampreia (2010).

O tratamento preservador aplicado na amostra foi o TANALITH E 8001, produto hidrossolúvel cuja aplicação foi realizada por impregnação em autoclave por vácuo e pressão. A composição química do produto TANALITH E 8001 encontra-se listada no Quadro 3.11. De referir que apesar de ter sido solicitado tratamento adequado para Classe de Risco 3, a taxa de retenção na amostra foi, segundo a ficha de controlo, de 31,2 kg/m³, o que corresponde a tratamento adequado para aplicação em Classe de Risco 4.

Quadro 3.11 – Composição química do produto preservador TANALITH E 8001 e respectivas quantidades

Elemento químico	Quantidade (% m/m)
Carbonato de Cobre	14,55 (8% Cu)
Tebuconazole	0,16
Propiconazole	0,16
Cloreto de Didecildimetilamónico [DDAC]	0,5

3.3.4 Colas

Tendo em conta algumas restrições relacionadas com a quantidade de matéria-prima disponível e fornecimento de colas, não foi possível avaliar o comportamento de todas as colas consideradas na amostra MP. Foram, portanto, consideradas as colas PRF-1, PRF-2, PRF-3, MUF-1, PUR-1 numa primeira fase e posteriormente a cola PUR-1+PR (Quadro 3.1).

Relativamente à cola PRF-1 foi adicionalmente realizado um teste de colagem de 4 elementos no mesmo processo de fabrico, assegurando diferentes períodos de tempo fechado bastante díspares entre estes elementos (mínimo de 10 minutos e máximo de 31 minutos). Foi ainda analisada a variação da razão entre resina e endurecedor para a cola MUF-1.

3.3.5 Parâmetros de colagem e preparação das vigas

A preparação das vigas teve como base o procedimento definido anteriormente em 3.2.4 para a amostra MP. Contudo, na presente amostra (TMP) foi decidido considerar apenas os parâmetros de colagem que forneceram previamente melhores resultados no comportamento de delaminação para a amostra MP (Quadro 3.10). Deste modo, na presente amostra não foi analisada a influência da quantidade de cola e pressão de aperto na delaminação.

3.3.6 Delaminação – resultados e discussão

Tendo em conta o menor número de colas utilizadas e a menor variação de cenários (quantidade de cola e pressão de aperto), os resultados obtidos das colagens realizadas com a amostra TMP são apresentados no Quadro 3.12.

Para todos os cenários são apresentados os valores de delaminação total média, bem como o valor máximo. Os resultados detalhados, nomeadamente relativos à massa volúmica de cada lamela, delaminação total individual e delaminação máxima (linha de cola) podem ser consultados no Anexo B do presente documento (Quadro B.1 a Quadro B.6).

Em termos gerais, verificou-se um aumento significativo da delaminação total quando comparado o desempenho com a amostra de Pinho bravo sem tratamento. No entanto, é de realçar que após o 3º ciclo apenas a cola PUR-1 não cumpriu os requisitos em termos de delaminação total média. Por outro lado, as colas PRF-1 e PRF-3 apresentaram muito bom desempenho apenas com um ligeiro incremento de delaminação total, não apresentando qualquer provete com delaminação total acima do limite de 10% após o 3º ciclo de ensaio.

Quadro 3.12 – Resumo da delaminação total (média e máximo) obtida de provetes colados com colas do tipo PRF, MUF e PUR – Amostra TMP

Cola	Quantidade de cola (g/m ²)	Pressão de aperto (MPa)	TF (min)	Massa volúmica (kg/m ³)	Nº de provetes	Delaminação total média (valor máximo)	
						2º ciclo (%)	3º ciclo (%)
PRF-1	350	0,8	5/12	666	28	1,2 (6,0)	1,7 (7,5)
			10/16/24/31*	665	28	5,0 (12,7)	6,3 (17,0)
PRF-2	350	0,6	10/18	669	14	3,7 (10,2)	5,1 (12,1)
PRF-3	450	0,8	15/23	671	14	0,9 (2,4)	1,3 (4,3)
MUF-1 (100/20)	400	0,6	10/19	661	28	3,0 (11,4)	3,5 (12,8)
MUF-1 (100/35)			10	659	7	1,8 (4,1)	2,3 (5,0)
PUR-1	160	0,8	5	654	7	19,6 (24,5)	21,9 (29,3)
PUR-1+PR	180		9/16	671	14	3,1 (9,2)	4,1 (12,9)
Lampreia (2010)	TB	445	-	-	14	0,4 (2,3)	0,7 (2,3)
	NB				14	0,9 (5,1)	1,2 (7,2)

Nota: Os valores apresentados a vermelho correspondem a valores médios acima dos limites estabelecidos pela EN 14080 (2013). Valores sublinhados correspondem a situações em que se verificou apenas 1 provete com delaminação total excessiva. Valores a negrito correspondem a situações em que se verificaram 2 ou mais provetes com delaminação total excessiva. * Valores obtidos no estudo conduzido por Lampreia (2010) para a mesma referência de cola PRF-1, mas com diferentes condições de colagem (quantidade de cola e pressão de aperto).

3.3.6.1 Colas do tipo PRF

Da análise do Quadro 3.12 e da Figura 3.16 é possível verificar que a cola PRF-3 apresentou um excelente desempenho comparativamente com as restantes colas para ambos os ciclos do ensaio de delaminação.

Relativamente às restantes colas do tipo PRF, o pior desempenho foi obtido por parte da cola PRF-2, tendo sido registada delaminação excessiva em 28% dos provetes após o 2º e 3º ciclos de ensaio. Ainda assim, o valor médio após o 2º e 3º ciclos cumpriu os limites máximos permitidos. A análise dos provetes (PRF-2 - Quadro B.3 do Anexo B) com delaminação excessiva permite verificar que o mau desempenho à delaminação não pode ser associado ao teor de água das lamelas pois os valores eram inferiores a 18%. Também a massa volúmica medida se situou dentro do intervalo dos valores considerados nas

restantes colagens e apenas 2 provetes apresentaram delaminação excessiva e não a totalidade do elemento. Verifica-se, no entanto, mais uma vez, que a delaminação registada coincide na sua maioria com zonas onde os anéis de crescimento se encontram dispostos tangencialmente à linha de cola (Figura 3.17).

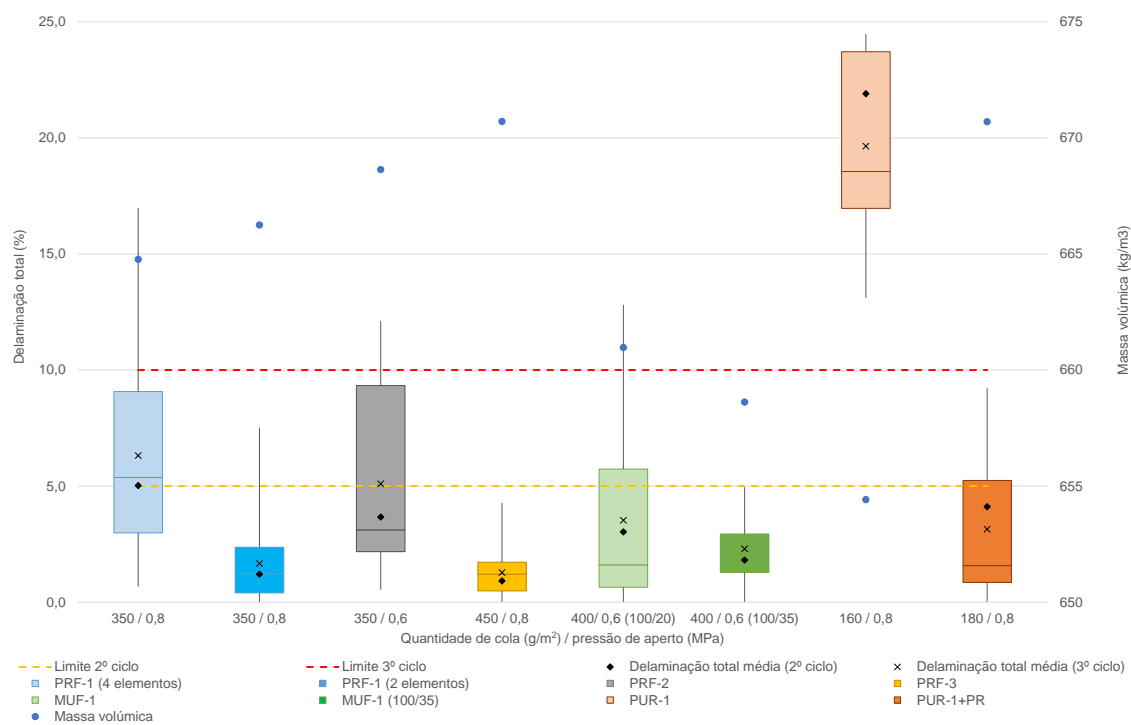


Figura 3.16 – Delaminação total registada após o 3º ciclo para as diferentes colas consideradas – amostra TMP

No que diz respeito à cola PRF-1 foram obtidos comportamentos diferentes entre o processo de colagem de 2 elementos de cada vez e o processo de colagem de 4 elementos na mesma série. Para o primeiro caso foi registado um bom desempenho apesar de ligeiramente superior aos resultados obtidos pela cola PRF-3. Foi registado apenas 1 provete com delaminação excessiva após o 2º ciclo (6,0%) que, no entanto, cumpriu o limite após o 3º ciclo (7,5%), como se pode verificar do Quadro B.4 do Anexo B.

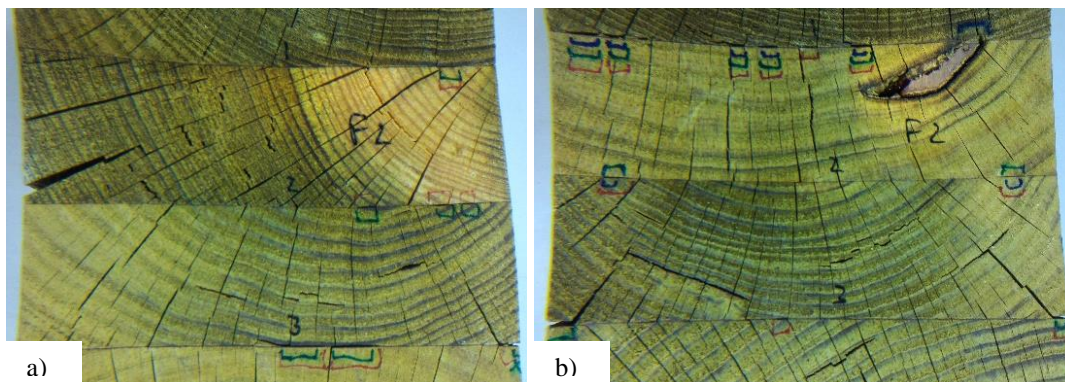


Figura 3.17 – Delaminação coincidente com anéis de crescimento dispostos horizontalmente: a) elemento n°13 – D3; b) elemento n° 14-D2

Relativamente à colagem de 4 elementos no mesmo processo de colagem, verificou-se um inadequado desempenho após o 2º ciclo, tendo-se obtido vários provetes (43%) com delaminação acima do limite estabelecido de 5% após o 2º ciclo. Após o 3º ciclo, verificou-se delaminação total acima de 10% em 21% dos provetes. Ainda assim, o valor médio situou-se bastante abaixo dos 10% após o 3º ciclo, apesar de ligeiramente superior ao máximo permitido após o 2º ciclo.

Excluindo da análise a série de 4 elementos colados no mesmo processo, verificou-se que para diferentes valores de tempo fechado, nas colas PRF, não se registaram diferenças significativas (Figura 3.18). Da comparação com a amostra de Pinho bravo sem tratamento (Figura 3.14), verifica-se uma tendência semelhante na cola PRF-3, com ligeiro decréscimo da delaminação total com o aumento do tempo fechado. Em relação à cola PRF-2 a tendência para aumento da delaminação total é bastante mais reduzida.

A colagem de 4 elementos com a mesma mistura de cola PRF-1, no mesmo processo de montagem, conduziu a um comportamento distinto dos restantes casos. Verificou-se uma tendência para o aumento da delaminação total com o aumento do tempo fechado (10 minutos para 16 minutos), seguindo-se uma redução acentuada da delaminação para valores superiores de tempo fechado (24 minutos). A menor delaminação total ocorreu para tempo fechado mais elevado (31 minutos). Apesar dos 4 elementos terem sido colados com a mesma mistura, foi assegurado que o tempo decorrido desde a sua execução até ao término da aplicação da mesma não excedeu 1h45min indicados pela ficha técnica como validade da mistura. Foi também assegurado o tempo fechado mínimo era superior a 10 minutos. A ficha técnica indica que 5-10 minutos de tempo fechado pode ser benéfico na colagem, em particular para madeiras densas. Verificaram-se igualmente vários provetes cuja delaminação ocorreu na maioria localizada junto de anéis de crescimento dispostos horizontalmente (Figura 3.19).

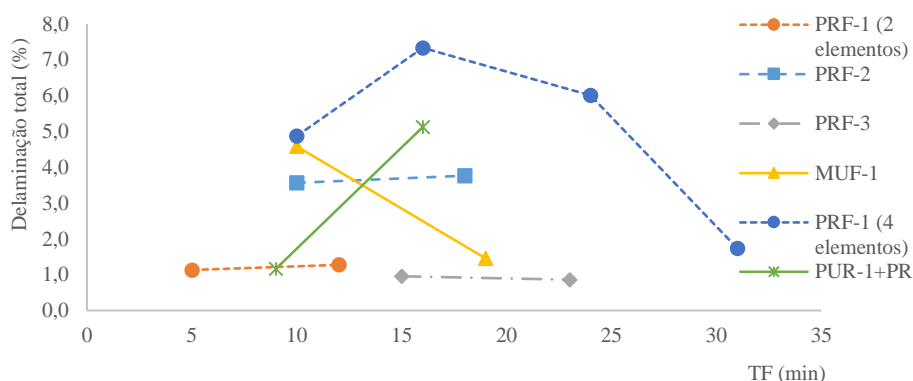


Figura 3.18 – Evolução da delaminação total (valores médios) após o 2º ciclo em função do tempo fechado – amostra TMP

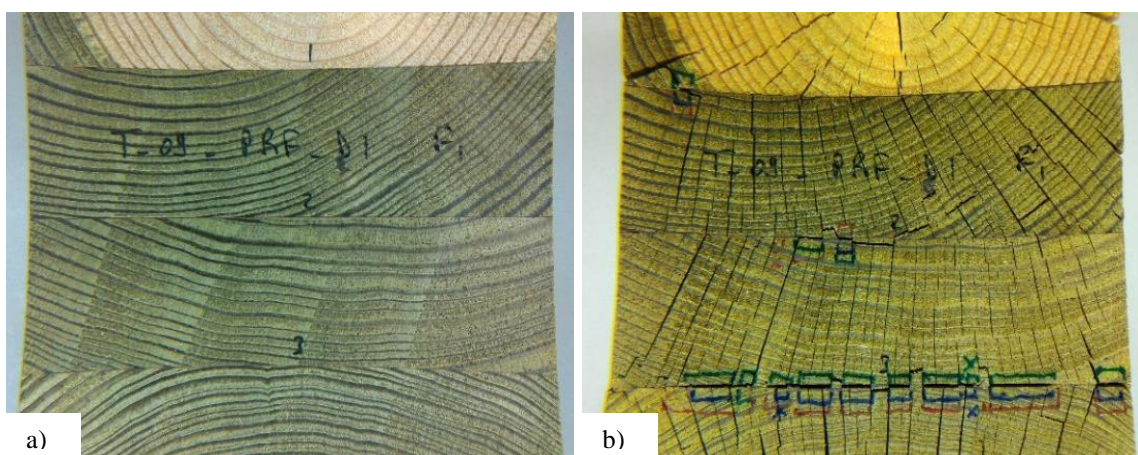


Figura 3.19 – Provete TMP03 – D1: a) antes de ensaio de delaminação; b) após 3º ciclo com delaminação localizada junto a anéis de crescimento dispostos horizontalmente

A comparação dos resultados obtidos do presente estudo com os obtidos por Lampreia (2010) mostrou um desempenho menos eficaz na presente colagem de madeira tratada com produto preservador. Por um lado, os produtos preservadores utilizados por Lampreia (TB – TANALITH E 3492 e NB – TANALITH E NB) diferem do aplicado no presente trabalho (TANALITH E 8001). Por outro lado, as diferentes taxas de retenção do produto preservador poderão ter influenciado os resultados, pois como foi verificado por Gaspar et al. (2005), quanto maior a taxa de retenção maior a delaminação total registrada.

3.3.6.2 Colas do tipo MUF

Na presente amostra foi considerado apenas o estudo do desempenho da cola MUF-1 tendo-se optado pela análise da razão resina/endurecedor de 100/20 e 100/35. Em ambas as situações foi evidente um melhor desempenho dos provetes colados com a razão 100/35, tendo-se registado uma pequena diferença de 1,2% em relação aos resultados obtidos pelos

provetes colados com a razão 100/20, para ambos os ciclos do ensaio de delaminação. Esta diferença obtida surge no sentido oposto do que foi obtido na amostra MP em que a razão 100/20 apresentou um desempenho melhor comparativamente à razão 100/35.

Tendo em conta as referidas diferenças e dado que os resultados obtidos não foram ao encontro do esperado, procedeu-se à análise individual dos elementos colados com a razão 100/20 (elementos A, B, C e D). Os resultados dos ensaios de delaminação total (valores médios e máximos) são apresentados no Quadro 3.13.

Quadro 3.13 – Resumo da delaminação total (média e máxima) obtida dos provetes colados com a cola MUF-1 – Amostra TMP

Cola	Elemento	Quantidade de cola (g/m ²)	Pressão de aperto (MPa)	TF (min)	Massa volúmica (kg/m ³)	Nº de provetes	Delaminação total média (valor máximo)	
							2º ciclo (%)	3º ciclo (%)
MUF-1 (100/20)	A	400	0,6	19	660	7	2,4 (6,8)	2,9 (7,5)
	B			10	657	7	7,6 (11,4)	8,6 (12,8)
	C			19	664	7	0,5 (2,1)	0,8 (2,6)
	D			10	663	7	1,5 (5,6)	1,7 (5,7)
MUF-1 (100/35)	-	-	-	10	659	7	1,8 (4,1)	2,3 (5,0)

Nota: Os valores apresentados a vermelho correspondem a valores médios acima dos limites estabelecidos pela EN 14080 (2013). Valores sublinhados correspondem a situações em que se verificou apenas 1 provete com delaminação total excessiva.

Como se pode visualizar do Quadro 3.13, o elemento B apresentou um comportamento díspar relativamente aos restantes elementos colados com a cola MUF-1 (100/20). A análise detalhada dos resultados dos provetes dos vários elementos (Quadro B.5 – Anexo B) permitiu verificar que as diferenças registadas não terão ocorrido por influência do teor de água. A exceção foi uma das lamelas do elemento colado com a razão 100/35. No entanto, como se pode verificar a presença de teor de água acima do limite de 18% não conduziu a delaminação total excessiva.

Em relação à influência do tempo fechado, verifica-se uma tendência para diminuição da delaminação com o aumento do tempo fechado (Figura 3.18). Contudo, ocorreram diferenças entre os elementos B e D cujo tempo fechado foi igual, pelo que este cenário não terá sido responsável pelo excedente de delaminação observado no elemento B. Igualmente a massa volúmica não terá sido a causa para a delaminação excessiva registada pois os valores das várias lamelas do elemento B são idênticos aos valores dos restantes elementos. Inclusive o valor mais elevado foi registado na lamela inferior (L4) de 671 kg/m³, bastante inferior ao valor de 718 kg/m³ medido na lamela inferior do elemento A.

A análise aos vários provetes do elemento B permitiu verificar que as delaminações ocorreram maioritariamente na linha de cola 2. A análise da massa volúmica nas lamelas adjacentes à referida linha de cola permitiu verificar que as diferenças registadas entre si não foram além dos 25 kg/m^3 . No entanto, verificou-se que as delaminações ocorreram em zonas adjacentes a anéis de crescimento com grande largura e especialmente em zonas próximas a anéis de crescimento dispostos tangencialmente e próximos da linha de cola (Figura 3.20).

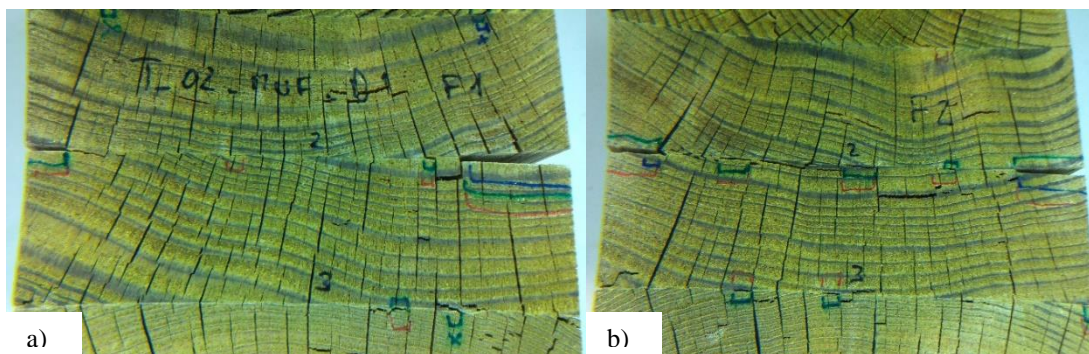


Figura 3.20 – Delaminação registada no elemento B após o 3º ciclo: a) provete D1 – face 1; b) provete D2 – face 2

3.3.6.3 Colas do tipo PUR

A cola PUR-1 foi considerada numa primeira fase tendo por base o bom desempenho que a combinação de 160 g/m^2 com $0,8 \text{ MPa}$ tinha demonstrado na amostra MP, em particular no elemento nº15 como referido no ponto 3.2.5.4. Contudo, e como se verificou posteriormente, o bom desempenho da cola PUR-1 para colagem na amostra MP só foi conseguido através da aplicação prévia de um primário (PR).

Da análise do Quadro 3.12, verificou-se o inadequado desempenho da cola PUR-1, apresentando delaminação bastante superior aos limites de 5% e 10%, para o 2º e 3º ciclos, respetivamente. A aplicação do primário (cola PUR-1+PR) na presente amostra conduziu a um desempenho aceitável no que à colagem de face diz respeito, apresentando valores médios inferiores aos limites definidos. Verificou-se uma variação de 16,5 e 17,8 pontos percentuais após o 2º e 3º ciclos, respetivamente.

Apesar dos valores médios registados terem sido inferiores aos limites máximos, verificou-se a ocorrência de delaminação excessiva (superior a 5%) em 4 provetes de um dos elementos colados com PUR-1+PR após o 2º ciclo (Quadro B.6 do Anexo B). Após o 3º ciclo, registaram-se apenas 2 provetes no mesmo elemento com delaminação total superior a 10%. Um dos referidos provetes apresentou delaminação máxima pela linha de cola superior a 30%. A análise visual dos provetes com delaminação excessiva (Figura 3.21)

mostra claramente a ocorrência de delaminação significativa na linha de cola nº3, em particular onde os anéis de crescimento das lamelas são tangenciais à linha de colagem. Considera-se portanto que a causa para a delaminação excessiva registada se encontra relacionada com a disposição dos anéis de crescimento das lamelas, como verificado anteriormente nas colagens realizadas com a cola MUF-1.

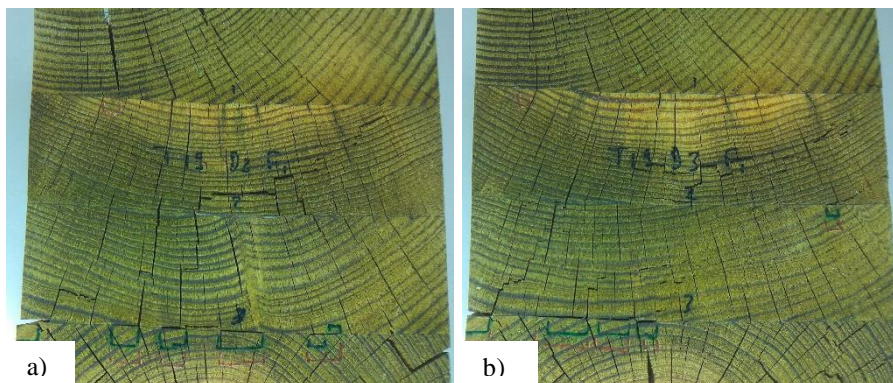


Figura 3.21 – Delaminação registada no elemento T_19 após o 3º ciclo: a) provete D2 – face 1; b) provete D3 – face 1

Face aos valores indicados no Quadro B.6 do Anexo B é pouco provável que tenha ocorrido qualquer influência por parte do teor de água uma vez que o teor de água variou entre 14,5% e 15,1%. Do mesmo modo, a massa volúmica foi idêntica entre os elementos nº 19 e nº 20, tendo inclusive o elemento nº 20 apresentado menor valor médio de delaminação total. Foi ainda possível observar um aumento da delaminação com o aumento do tempo fechado, pelo que a delaminação excessiva registada no elemento 19 poderá também estar relacionada com o tempo fechado.

3.3.7 Resistência ao corte – resultados e discussão

A exemplo do que foi realizado para a amostra de Pinho bravo sem tratamento, foram obtidas 7 secções transversais (50 mm de comprimento) por elemento, que resultaram em 14 provetes com dimensões aproximadas de 50 x 50 x 120 mm³. O procedimento de ensaio bem como o processo de medição foram os considerados na amostra de Pinho bravo sem tratamento (ver 3.2.6).

No Quadro 3.14 são apresentados os resultados obtidos da resistência ao corte pela linha de cola e pela madeira, bem como da percentagem de rotura pela madeira e a eficiência da linha de cola. A Figura 3.22 apresenta a nuvem de dispersão de resultados individuais para cada ensaio (resistência ao corte da linha de cola e percentagem de rotura pela madeira). Os resultados apresentados são relativos aos ensaios válidos, ou seja, isentos de defeitos como nós ou bolsas de resina, que possam ter influência na linha de cola. O número de

ensaios válidos foi de 853 ensaios (547 pela linha de cola e 306 pela madeira) de um total de 920 ensaios realizados (600 pela linha de cola e 306 pela madeira).

Quadro 3.14 – Resumo da resistência ao corte e WFP das linhas de cola e resistência ao corte pela madeira – Pinho bravo com tratamento

Cola	Quantidade de cola (g/m ²)	Pressão de aperto (MPa)	Massa volúmica (kg/m ³)	Linha de cola			Madeira		Eficiência da linha de cola
				Nº de provetes	Resist. Corte (Desv. padrão) (MPa)	WFP (%)	Nº de provetes	Resist. Corte (Desv. padrão) (MPa)	
PRF-1 (4 elementos)	350	0.6	666	111	12,5 (1,4)	96	60	13,3 (1,4)	0,94
PRF-1 (2 elementos)			665	98	12,8 (1,2)	97	60	13,9 (1,4)	0,92
PRF-2	350	0.6	669	56	12,9 (1,7)	91	31	13,0 (1,5)	0,99
PRF-3	350	0.6	671	57	12,1 (1,3)	99	32	13,0 (1,3)	0,93
MUF-1 (100/20)	400	0.6	661	116	12,7 (0,9)	97	61	13,5 (1,6)	0,94
MUF-1 (100/35)	400*	0.6	659	27	12,4 (1,0)	95	16	13,6 (2,1)	0,91
PUR-1	160	0.6	654	26	12,9 (0,9)	77	15	13,8 (1,4)	0,93
PUR-1+PR	180	0.8	671	56	12,2 (1,2)	95	31	12,6 (1,3)	0,97

Da análise do Quadro 3.14 verifica-se uma semelhança de resultados obtidos entre as várias colas ao nível da resistência ao corte que variou entre 12,1 MPa e 12,9 MPa (valores médios). A mesma conclusão é válida para a percentagem de rotura pela madeira, com exceção da cola PUR-1 que apresentou valores médios de 77% a exemplo do que se tinha registado para a amostra de Pinho bravo sem tratamento. A análise conjunta do Quadro 3.14 e do Quadro 3.12 permite verificar que também na amostra de Pinho bravo com tratamento preservador é notória a relação entre os valores mais baixos de WFP e a delaminação excessiva registada em termos de valores médios (PUR-1), e também em delaminação excessiva registada em vários provetes (PRF-2). A eficiência das linhas de cola variou entre 0,91 e 0,99, o que representa um bom desempenho das mesmas em relação à resistência pela madeira. Da Figura 3.22 é possível verificar que todas as linhas de cola (ensaios válidos) cumpriram os valores mínimos estabelecidos pela EN 14080 (2013). Ainda assim, ocorreu um ensaio cuja percentagem de rotura pela madeira foi de 20% (PUR-1).

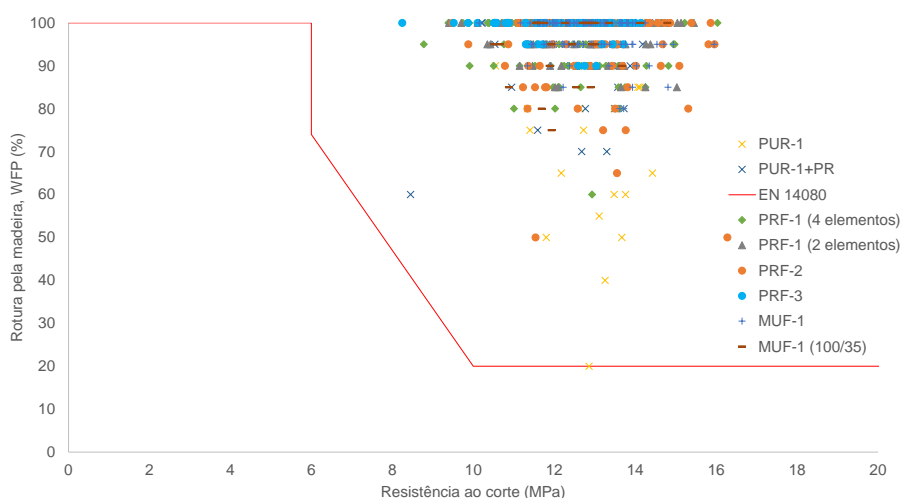


Figura 3.22 – Resultados da resistência ao corte e percentagem de rotura pela madeira para todas as colas (valores individuais) – TMP

3.3.8 Influência do tratamento preservador

No presente subcapítulo pretende-se avaliar a influência do tratamento preservador na qualidade da colagem de face. Para tal apresenta-se no Quadro 3.15 a compilação dos resultados obtidos para as colas consideradas em ambas as amostras de Pinho bravo (sem e com tratamento preservador). São apresentados os valores de delaminação total média (3º ciclo), bem como a resistência ao corte da linha de cola, a percentagem de rotura pela madeira e a resistência ao corte da madeira.

Quadro 3.15 – Resumo da delaminação total média (3º ciclo), resistência ao corte (linha de cola e madeira) e WFP – TMP

Cola	Quantidade de cola (g/m ²)	Pressão de aperto (MPa)	Pinho bravo sem tratamento				Pinho bravo com tratamento			
			Delaminação (%)	Resist. Corte LC (MPa)	WFP (%)	Resist. Corte Mad. (MPa)	Delaminação (%)	Resist. Corte LC (MPa)	WFP (%)	Resist. Corte Mad. (MPa)
PRF-1	350	0,8	1,1	13,5	95	14,2	1,7	12,8	97	13,9
PRF-2	350	0,6	1,0	14,6	99	14,6	5,1	12,9	91	13,0
PRF-3	450	0,8	0,6	14,4	100	15,1	1,3	12,1	99	13,0
MUF-1 (100/20)	400	0,6	1,0	13,9	96	13,3	3,5	12,7	97	13,5
MUF-1 (100/35)			2,8	13,2	95	13,8	2,3	12,4	95	13,6
PUR-1+PR	180	0,8	0,4	13,5	93	14,4	4,1	12,2	95	12,6

A análise comparativa dos resultados obtidos de ambas as amostras de Pinho bravo torna evidente a influência do tratamento preservador na qualidade de colagem de face. Em termos de delaminação total, verifica-se um incremento generalizado para todos os tipos de cola, com exceção da cola MUF-1 (100/35) em que ocorreu um ligeiro decréscimo. As colas PRF-1 e PRF-3 foram as que apresentaram melhor desempenho geral, com um ligeiro

aumento da delaminação total, situando-se o valor médio bastante abaixo do limite máximo de 10% (3º ciclo).

A tendência registada no presente trabalho difere ligeiramente da observada por Lampreia (2010). Contudo, como referido anteriormente, a taxa de retenção de tratamento preservador no presente trabalho foi de 31 kg/m³, bastante superior aos valores considerados por Lampreia (2010) (de 18 kg/m³ e 15,6 kg/m³ dos tratamentos preservadores TANALITH E 3492 e TANALITH E NB, respetivamente).

No estudo conduzido por Gaspar (2006), o autor verificou o inadequado desempenho de uma cola do tipo PRF para taxas de retenção de produto preservador de 16,4 kg/m³, em especial para os níveis de pressão de aperto inferiores (0,6 MPa) e superiores (1,12 MPa). No estudo conduzido por Gaspar (2010) o desempenho de uma nova referência de uma cola PRF melhorou significativamente. Ainda assim, foi possível observar o aumento ligeiro da delaminação após o 3º ciclo de ensaio de delaminação com o aumento da taxa de retenção de produto preservador (1,0%, 1,4% e 4,0% para o cenário sem tratamento, 7,6 kg/m³ e 20,6 kg/m³, respetivamente).

Relativamente aos resultados dos ensaios de resistência ao corte, verificou-se uma clara influência do tratamento preservador na resistência ao corte da linha de cola, tendo-se registado um decréscimo médio de 10% (variando entre 5% e 16%). Apesar de os elementos de Pinho bravo com tratamento possuírem massa volúmica superior (3%), foi registado um decréscimo na resistência ao corte pela madeira de 7%. Relativamente à WFP não se verificou qualquer influência do tratamento preservador.

3.4 Choupo

3.4.1 Estado da arte

O Choupo é uma espécie de rápido crescimento e reduzida massa volúmica. De acordo com Balatinecz e Kretschmann (2001) o Choupo encontra-se bastante disperso na América do Norte, ocorrendo subespécies como *aspen* (*P. tremuloides*), *bigthooth aspen* (*P. grandidentata*) *balsam poplar* (*P. balsamifera*), *eastern cottonwood* (*P. deltoides*) e *black cottonwood* (*P. trichocarpa*). O mesmo autor refere também a presença de Choupo híbrido, com referência a plantações na Europa com vários séculos através do cruzamento de Choupo negro Europeu (*P. nigra*) e *Eastern cottonwood* da América do Norte (*P. deltoides*).

A madeira de Choupo é utilizada em diversos produtos comercialmente disponíveis, de entre os quais se destacam: i) papel e polpa; ii) madeira maciça; iii) contraplacado; iv)

painéis compostos, v) *structural composite lumber*; vi) paletes; vii) mobiliário; viii) caixas de fruta e ix) contentores de armazenamento (Balatinecz e Kretschmann (2001) e Acker et al. (2016)).

Castro e Fragnelli (2006) referem a MLC como produto de elevado potencial de aplicação do Choupo. Os autores referem inclusive alguns estudos conduzidos em Itália que incluem a colagem com mistura de espécies, tais como: i) Eucalipto e Choupo (Castro e Paganini, 2003); ii) Larício e Choupo (Paganini e Castro, 2001) e iii) Espruce e Choupo (Paganini e Castro, 2000). Castro e Paganini (2003) demonstraram a viabilidade de colagem de madeira de Choupo entre si e combinada com Eucalipto (*Eucalyptus grandis*), tendo usado uma cola do tipo PRF. Também a colagem de Choupo com Espruce e Larício revelou-se eficaz, como demonstrado por Paganini e Castro (2000, 2001).

Mais recentemente, Konnerth et al. (2016) estudaram a viabilidade de colagem de 9 espécies resinosas e folhosas europeias, de entre as quais o Choupo. Foram realizados ensaios de resistência ao corte por tração (tratamentos A1, A2 e A4) de acordo com a EN 302-1 (2004) e ensaios de resistência à delaminação de acordo com a EN 302-2 (2004). Foram consideradas 3 colas, nomeadamente: i) MUF; ii) PRF e iii) 1C-PUR. Dos resultados obtidos os autores concluíram que a cola PRF utilizada foi compatível com a maioria das espécies estudadas. Em relação ao desempenho do Choupo, os autores verificaram um bom desempenho à delaminação dos provetes colados com a cola PRF. Os resultados dos ensaios conduzidos com provetes colados com 1C-PUR não cumpriram os requisitos, tal como os obtidos com cola MUF que apresentou os piores resultados. Ao nível da resistência ao corte por tração longitudinal, os resultados obtidos com Choupo foram semelhantes aos obtidos com Espruce, ainda que ligeiramente inferiores. Das 9 espécies consideradas no estudo, os autores consideraram como adequadas para colagem as espécies Espruce, Bétula e Choupo devido aos reduzidos valores de delaminação registados.

Boever et al. (2016) concluiu no seu estudo que a madeira de Choupo modificada termicamente pode ser aplicada em elementos de madeira lamelada colada e em caixilharia de janelas. Mirzaei et al. (2018) conduziram um estudo com o objetivo de determinar várias propriedades de MLC com Choupo (*Populus deltoides*) tratado através de imersão em água e temperaturas de 140°C e 160°C durante 30min. Para as colagens foi usada uma cola do tipo 1C-PUR. Para além das propriedades mecânicas das vigas, foi avaliada a resistência ao corte pela ASTM D 905-03 (2003) e a delaminação das linhas de cola pela ASTM D 1101-97a (2006). Os autores verificaram um adequado desempenho das linhas de cola, apesar de ter ocorrido aumento de delaminação para madeira tratada a temperaturas mais elevadas (1,0% para 160°C). O aumento da temperatura conduziu também a uma redução da resistência ao corte de 12% para 140°C e de 18% para 160°C.

Em Portugal verifica-se a existência de pequenas plantações de Choupo, contudo a sua representatividade na floresta nacional é ainda muito reduzida sendo associada ao grupo de outras folhosas com uma representação de 6% segundo o 6º Inventário Florestal Nacional (ICNF, 2013). A investigação nacional relativa ao Choupo é escassa, conhecendo-se um estudo conduzido por Hodousek et al. (2017) relativo à determinação das propriedades mecânicas de madeira serrada. Nesse mesmo estudo, os autores demonstraram o potencial da espécie para aplicação em produtos com finalidade estrutural. De seguida são apresentados detalhadamente os resultados obtidos da avaliação da qualidade de colagem de face de Choupo, bem como todos os processos intermédios até à obtenção dos resultados finais.

3.4.2 Caracterização física da madeira

A amostra de Choupo considerada no presente estudo era constituída por 158 tábuas que foram armazenadas em espaço climatizado ($20\pm 2^{\circ}\text{C}$ de temperatura e $65\pm 5\%$ de humidade relativa), nas instalações do SerQ. Durante o processo de armazenamento foi realizada a caracterização física das tábuas seguindo os mesmos princípios descritos para a amostra de Pinho bravo (ver 3.2.2).

As dimensões médias das tábuas eram 39 mm x 122 mm x 2149 mm (espessura x largura x comprimento). A massa volúmica média e desvio padrão eram de $461,0 \pm 26,3 \text{ kg/m}^3$ com valor mínimo e máximo de $411,0 \text{ kg/m}^3$ e $530,6 \text{ kg/m}^3$.

Em relação ao teor de água, o critério de medição adotado foi o seguido para as amostras de Pinho bravo, (ver 3.2.2) tendo-se registado um valor médio de 17,3% pelo higrómetro de agulhas, com valor mínimo e máximo de 13,7% e 21,9%. Posteriormente, no decorrer do processo de colagem foram obtidos provetes para medição de teor de água pela EN 13183-1 (2002). Os resultados obtidos variaram entre 12,8% (mínimo) e 16,2% (máximo), com valor médio de 14,6%. Tendo em conta o facto de o valor máximo ser superior ao limite superior indicado pela norma EN 14080 (2013), será adiante realizada a análise da influência do teor de água na delaminação e resistência ao corte para as diversas colas.

3.4.3 Colas

Ao contrário do Pinho bravo, para a espécie de Choupo não foram encontrados estudos prévios específicos na avaliação da colagem de face. Apesar de demonstrado o potencial de colagem de Choupo com crescimento na Europa (em especial em Itália), foi decidido estudar o desempenho de várias colas na colagem de face de Choupo produzido em Portugal. A exemplo do que foi considerado para a amostra de Pinho bravo sem tratamento, consideraram-se como principais variáveis: i) a quantidade de cola e ii) a pressão de aperto.

De entre as colas referidas no Quadro 3.1 foram selecionadas as que apresentaram melhores resultados na amostra de Pinho bravo sem tratamento, nomeadamente: PRF-1, PRF-2, PRF-3, MUF-1, MUF-2, EPI-2 e PUR-1+PR. Tendo em conta as diferenças anatómicas entre o Choupo e o Pinho bravo, nomeadamente a menor massa volúmica e a maior porosidade, decidiu-se avaliar também a qualidade de colagem da cola PUR-1.

3.4.4 Parâmetros de colagem e preparação das vigas

3.4.4.1 Preparação e organização das lamelas

A avaliação da qualidade de colagem de face foi realizada através de ensaios de delaminação e resistência ao corte obtidos de elementos de MLC constituídos por 4 lamelas de 24 mm de espessura. A espessura foi definida tendo em conta o estudo realizado por Castro e Paganini (2003) que colaram várias vigas de Choupo (clone “Neva”) e Choupo com Eucalipto (*Eucalyptus grandis*) e a espessura considerada foi de aproximadamente 16 mm. Assim, optou-se por um valor intermédio entre os 16 mm e os 30 mm considerados no Pinho bravo.

Grande parte das tábuas da amostra apresentava uma elevada quantidade de nós, pelo que para otimizar a matéria-prima disponível se optou também pelo fabrico de elementos com comprimento de 500 mm, reduzindo assim a presença de nós nas lamelas que poderiam influenciar os resultados de delaminação e resistência ao corte. Em cada processo de colagem foram fabricados 2 elementos, 1 com comprimento de 1000 mm e outro com comprimento de 500 mm. A largura dos elementos variou entre 90 mm e 115 mm.

A quantidade de cola e a pressão de aperto selecionadas seguiram o mesmo critério considerado para o Pinho bravo (ver 3.2.4), ou seja, dois valores por parâmetro. As fichas técnicas das colas indicam valores entre 0,8 e 1,2 MPa para o intervalo de pressão de aperto de espécies folhosas. Uma vez que o Choupo apresenta características físicas e propriedades mecânicas mais próximas das espécies resinosas do que das restantes folhosas, considerou-se os valores de 0,8 MPa e 1,0 MPa, desprezando o limite máximo do intervalo indicado nas fichas técnicas.

A distribuição das tábuas teve como objetivo a obtenção de elementos com valor médio de massa volúmica idêntico entre si e próximo do valor médio da amostra (461 kg/m³). As tábuas de cada elemento foram aparelhadas imediatamente antes da aplicação da cola para obter espessura final constante e evitar possíveis contaminações por oxidação da superfície e/ou acumulação de poeiras. Posteriormente, cada lamela foi medida novamente e calculada a sua massa volúmica final que permitiu a distribuição das lamelas como indicado na Figura 3.23. De referir igualmente que a orientação dos anéis de crescimento foi tida em

conta de modo a cumprir os requisitos da Classe de Serviço 3 para permitir a comparação direta com o comportamento observado no Pinho bravo.

Lamela 1	→	$400 < \rho \leq 450$
Lamela 2	→	$450 < \rho \leq 500$
Lamela 3	→	$400 < \rho \leq 450$
Lamela 4	→	$\rho \geq 450$

Figura 3.23 – Distribuição de massas volúmicas das lamelas pelos elementos de Choupo (kg/m^3)

3.4.4.2 Aplicação da cola e montagem das lamelas

A aplicação da cola e processo de montagem seguiu os procedimentos descritos em 3.2.4 para a amostra de Pinho bravo. A quantidade de cola foi controlada através de pesagem durante a aplicação na superfície da lamela e espalhada de modo a distribuir a cola uniformemente sob toda a superfície (Figura 3.24). O tempo aberto foi o mínimo possível enquanto que o tempo fechado cumpriu com o mínimo recomendado pelas fichas técnicas.



Figura 3.24 – Aplicação de cola manual através de espátula denteada – Cola EPI-1

Todo o processo de fabrico desde a aplicação da cola, montagem, prensagem e cura dos elementos, decorreu numa sala com ambiente controlado de temperatura ($20 \pm 2^\circ\text{C}$) e de humidade relativa ($65 \pm 5\%$). Os provetes para avaliação da qualidade de colagem (delaminação e resistência ao corte) foram obtidos após um período de cura mínimo de 7 dias após o processo de prensagem.

Dos elementos com 1000 mm foram retirados 7 provetes para ensaios de delaminação. Para ensaios de resistência ao corte foram obtidos 14 provetes, sendo 10 para avaliação pela linha de cola e 4 para avaliação da resistência pela madeira. Dos elementos com 500 mm obtiveram-se 4 provetes para ensaios de delaminação e 6 provetes para ensaios de resistência ao corte (4 pela linha de cola e 2 pela madeira). Todos os provetes obtidos

cumpriram as dimensões estabelecidas pela EN 14080 (2013), para ensaios à delaminação e resistência ao corte, respetivamente.

3.4.5 Delaminação – resultados e discussão

A amostra de Choupo considerada não teve qualquer tratamento preservador, contudo considerou-se o Método A do Anexo C da EN 14080 (2013) de modo a avaliar a qualidade de colagem pelo cenário mais exigente (Classe de Serviço 3). No total foram ensaiados 297 provetes, obtidos de 27 elementos com 1000 mm e de 27 elementos com 500 mm.

Os resultados dos ensaios de delaminação são de seguida apresentados, acompanhados de uma análise detalhada das variações ocorridas e da influência de cada parâmetro, nomeadamente as principais variáveis: i) quantidade de cola e ii) pressão de aperto. Fatores como a massa volúmica, teor de água, tempo fechado e disposição dos anéis de crescimento foram também alvo de análise de modo a quantificar a sua influência nos resultados obtidos.

Os resultados encontram-se divididos por tipo de cola para mais fácil interpretação, sendo apresentados no Quadro 3.16 os resultados das colagens com cola do tipo PRF. Os resultados das colas MUF, EPI e PUR são apresentados no Quadro 3.17, Quadro 3.18 e Quadro 3.19, respetivamente. Em cada quadro são apresentados os valores considerados de quantidade de cola e pressão de aperto (variáveis iniciais), bem como tempo fechado, e massa volúmica média dos provetes. Os valores de delaminação total apresentados são respeitantes aos valores médios dos elementos colados nas mesmas condições e o valor máximo obtido do conjunto de provetes para ambos os ciclos de ensaio. No Anexo C (Quadro C.1 a Quadro C.13) são apresentados os valores de delaminação total e delaminação máxima por provete, bem como o teor de água de cada lamela e a massa volúmica de cada lamela e provete.

3.4.5.1 Colas do tipo PRF

O Quadro 3.16 apresenta os resultados dos ensaios de delaminação relativos às colas PRF-1, PRF-2 e PRF-3 obtidos após o 2º e 3º ciclos, verificando-se um excelente desempenho nas 3 colas. Após o 3º ciclo de ensaio registaram-se valores médios de delaminação total inferiores ou muito próximos de 1% em uma ou duas combinações (quantidade de cola e pressão de aperto).

Quadro 3.16 – Resumo da delaminação total média e máxima obtida de provetes colados com colas do tipo PRF - BP

Cola	Quantidade de cola (g/m ²)	Pressão de aperto (MPa)	TF (min)	Massa volúmica (kg/m ³)	Nº de provetes	Delaminação total média (valor máximo)	
						2º ciclo (%)	3º ciclo (%)
PRF-1	350	0,8	5/6/9	474	15	1,0 (4,0)	1,8 (8,6)
		1,0	5/10	466	11	0,3 (1,6)	0,6 (2,0)
	450	0,8	5/9/10	472	15	1,2 (4,9)	1,5 (5,1)
		1,0	5/9	476	14	0,2 (1,2)	0,3 (1,4)
PRF-2	350	0,8	5/9	471	11	1,1 (2,6)	2,0 (5,1)
		1,0	6/11	467	11	1,0 (3,1)	1,6 (4,7)
	450	0,8	6/9	461	11	0,9 (3,6)	1,3 (5,0)
		1,0	6/9	447	11	2,8 (5,5)	3,6 (6,9)
PRF-3	350	0,8	5/9	471	11	3,6 (8,3)	5,6 (<u>13,1</u>)
		1,0	5/9	445	11	0,7 (3,0)	1,3 (3,8)
	450	0,8	5/9	464	11	0,2 (1,1)	0,5 (1,3)
		1,0	5/9/10	476	22	1,1 (5,3)	2,3 (8,0)

Nota: Valores sublinhados correspondem a situações em que se verificou apenas 1 provete com delaminação total excessiva. Valores a negrito correspondem a situações em que se verificaram 2 ou mais provetes com delaminação total excessiva.

O melhor desempenho geral foi obtido pela cola PRF-1, que não apresentou qualquer provete com delaminação excessiva em ambos os ciclos de ensaio e nas 4 combinações estudadas. Verifica-se também uma tendência clara para a diminuição da delaminação com o aumento da pressão de aperto, quer na delaminação total média quer nos valores máximos individuais (Figura 3.25). Esta tendência tinha sido igualmente verificada na amostra de Pinho bravo sem tratamento. De entre as 4 combinações estudadas verificou-se um desempenho idêntico para as combinações 350 g/m² /1,0 MPa e 450 g/m² /1,0 MPa pelo que por razões económicas será aconselhável verificar o desempenho a nível industrial da combinação 350 g/m² /1,0 MPa.

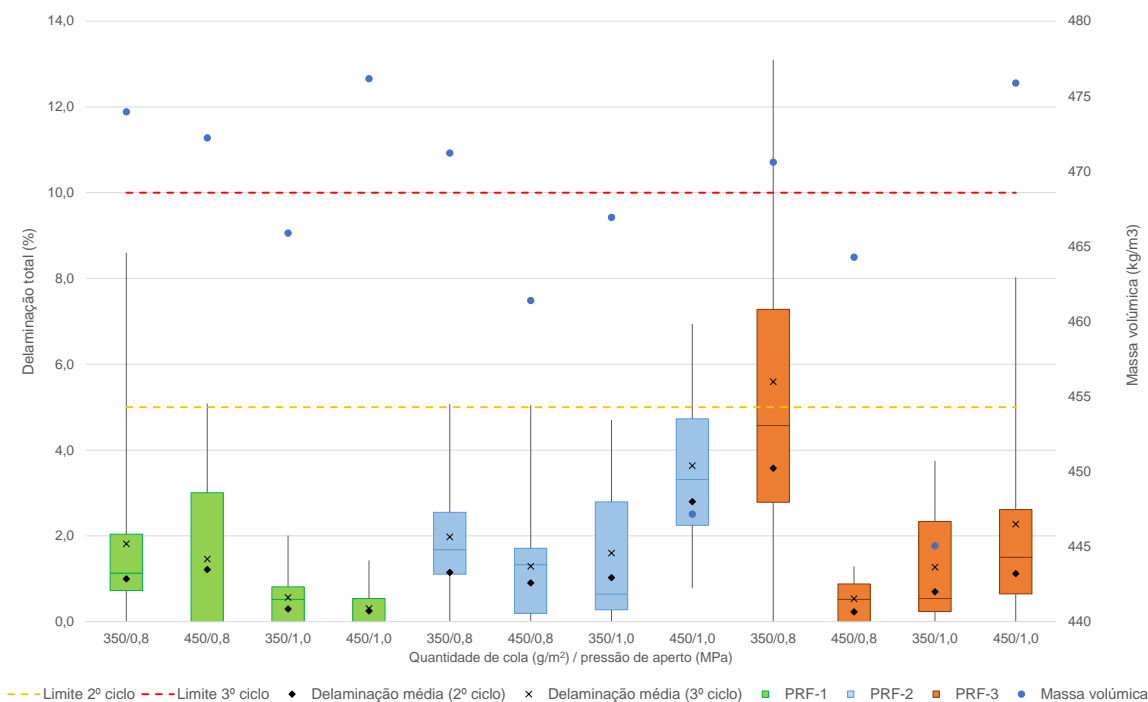


Figura 3.25 – Delaminação total registada após o 3º ciclo para os diferentes cenários considerados – colas PRF

Relativamente à cola PRF-2 foi obtido um excelente desempenho, idêntico entre as várias combinações, com exceção da combinação $450 \text{ g/m}^2 / 1,0 \text{ MPa}$ que apresentou maior valor médio de delaminação total e inclusive 2 provetes com delaminação excessiva após o 2º ciclo de ensaio. A análise dos teores de água das lamelas constituintes dos elementos nº 49 e nº 50 (Quadro C.3 e Quadro C.4 – Anexo C) demonstra a presença de valores ligeiramente superiores a 15% (valor máximo 15,4%). Contudo, o teor de água não terá sido a causa isolada para os valores mais altos de delaminação, pois nas restantes combinações verificaram-se teores de água superiores com menor delaminação. Também a massa volúmica não terá sido responsável pelo desempenho menos eficaz pois a média dos provetes foi inferior à registada para as restantes combinações. Verifica-se uma semelhança de comportamento da cola PRF-2 quando comparados os resultados obtidos com Pinho bravo sem tratamento. Foi igualmente obtido pior desempenho para maior quantidade de cola e maior pressão de aperto.

A cola PRF-3 apresentou, a exemplo do que tinha ocorrido com Pinho bravo sem tratamento um excelente desempenho em particular para a combinação $450 \text{ g/m}^2 / 0,8 \text{ MPa}$. Verificou-se portanto que a cola PRF-3 apresenta melhores desempenhos para maior quantidade de cola em combinação com menor pressão de aperto.

Contudo, apesar do bom desempenho geral, registaram-se 5 provetes com delaminação excessiva após o 2º ciclo em 2 combinações (350 g/m² /0,8 MPa e 450 g/m² /1,0 MPa). Da análise dos provetes (Quadro C.5 e Quadro C.6 do Anexo C) que não cumpriram os limites normativos verifica-se que os respetivos elementos foram fabricados com lamelas com teor de água ligeiramente acima do limite de 15% (máximo 15,9%). Verificou-se também que na combinação 450 g/m² /1,0 MPa, os 2 provetes com delaminação excessiva possuíam massa volúmica mais elevada (496 kg/m³) que os restantes provetes (477 kg/m³). No entanto, as diferenças referidas são pequenas, pelo que poderá ter havido influência de outros fatores não identificados.

3.4.5.2 Colas do tipo MUF

No Quadro 3.17 são apresentados os resultados dos provetes colados com colas do tipo MUF. A cola MUF-1 (100/35) foi selecionada com o objetivo de avaliar o seu potencial reduzindo o tempo de prensagem comparativamente à razão 100/20. Carece ainda assim de avaliação futura o potencial de aplicação da cola MUF-1 com a razão 100/20 para melhor comparação dos resultados com a cola MUF-2.

A análise geral dos resultados das diversas colas demonstrou que a cola MUF-2 apresentou o melhor desempenho geral na colagem de face de Choupo. Das 4 combinações consideradas o valor médio mais elevado de delaminação total após o 3º ciclo foi de 1,2% (450 g/m² /1,0 MPa), valor ainda assim bastante reduzido. Nessa mesma combinação, foi observado 1 provete com delaminação total excessiva após o 2º ciclo (5,2%). Da análise dos provetes constituintes do referido elemento (Quadro C.9 do Anexo C), verificou-se um teor de água máximo de 15,0% (em três lamelas), o que não parece justificar a delaminação excessiva. Igualmente a massa volúmica não terá influenciado os resultados, uma vez que os valores são semelhantes aos registados na generalidade das combinações e bastante inferiores à combinação 350 g/m² /0,8 MPa.

Quadro 3.17 – Resumo da delaminação total média e máxima obtida de provetes colados com colas do tipo MUF

Cola	Quantidade de cola (g/m ²)	Pressão de aperto (MPa)	TF (min)	Massa volúmica (kg/m ³)	Nº de provetes	Delaminação total média (valor máximo)	
						2º ciclo (%)	3º ciclo (%)
MUF-1	400	0,8	5/8	461	11	3,8 (8,2)	5,1 (9,2)
	350	0,8	7/12	493	11	0.6 (1.9)	0.9 (3.6)
MUF-2		450	1,0	8/12	456	11	0.1 (0.7)
	450	0,8	7/11	466	11	0.3 (1.6)	0.6 (3.0)
		1,0	5/10	462	11	1.0 (<u>5.2</u>)	1.2 (6.1)

Nota: Valores sublinhados correspondem a situações em que se verificou apenas 1 provete com delaminação total excessiva. Valores a negrito correspondem a situações em que se verificaram 2 ou mais provetes com delaminação total excessiva.

Da análise da Figura 3.26 verifica-se que não existe uma tendência para evolução da delaminação total perante o aumento da quantidade de cola e ou pressão de aperto. Contudo, a combinação de menor quantidade de cola com pressão de aperto mais elevada (350 g/m² /1,0 MPa) deu lugar aos melhores resultados, não ocorrendo variações significativas para as restantes combinações.

Na cola MUF-1 foi adotada apenas a razão 100/35, tendo-se verificado um comportamento idêntico ao observado para o Pinho bravo em termos de valores de delaminação total máxima. A delaminação total média foi ligeiramente superior, contudo bastante abaixo dos limites estabelecidos para ambos os ciclos de ensaio. Futuramente, deverá ser considerado o estudo de desempenho da colagem de face com MUF-1 com a razão 100/20, a fim de verificar se o desempenho evolui no sentido da redução da delaminação total como se verificou com o Pinho bravo.

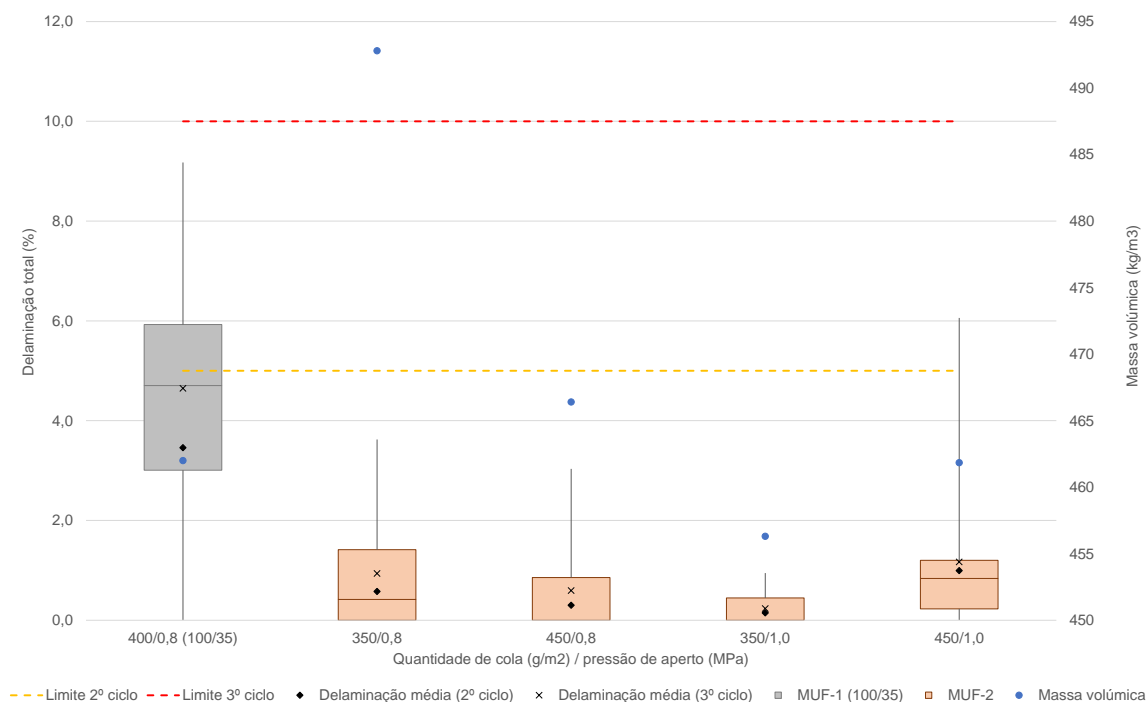


Figura 3.26 – Delaminação total registada após o 3º ciclo para os diferentes cenários considerados – colas do tipo MUF - Choupo

3.4.5.3 Colas do tipo EPI

Tendo em conta o inadequado desempenho demonstrado pela cola EPI-1 na colagem de face de Pinho bravo, considerou-se para a amostra de Choupo apenas a cola EPI-2. De entre as 4 combinações usuais de quantidade de cola e pressão de aperto, apenas foi possível realizar 3 combinações (Quadro 3.18). Dos resultados obtidos, observou-se que a cola EPI-

2 apresentou um desempenho menos eficiente do que as restantes colas analisadas anteriormente.

Verificou-se inclusive que após o 2º ciclo apenas 1 das combinações estudadas apresentou delaminação total média inferior a 5% (300 g/m² /0,8 MPa). Ainda assim, em termos individuais, 64% dos provetes colados com cola EPI-2 apresentaram delaminação total superior a 5%, incluindo alguns valores que após o 2º ciclo já não cumpriam os requisitos do 3º ciclo. O desempenho após o 3º ciclo de ensaio de delaminação melhorou em termos de valores médios, uma vez que todas as combinações apresentaram delaminação total média inferior a 10%. Contudo e apesar da redução do número de provetes em incumprimento, 30% dos provetes apresentaram delaminação total excessiva. Registou-se inclusive nas 2 combinações com pior desempenho a ocorrência de 5 provetes com delaminação máxima por linha de cola superior a 30% (4 deles na combinação 350g/m² /1,0 MPa).

Quadro 3.18 – Resumo da delaminação total média e máxima obtida de provetes colados com colas do tipo EPI

Cola	Quantidade de cola (g/m ²)	Pressão de aperto (MPa)	TF (min)	Massa volúmica (kg/m ³)	Nº de provetes	Delaminação total média (valor máximo)	
						2º ciclo (%)	3º ciclo (%)
EPI-2	300	0,8	5/9	468	11	4.8 (9.6)	6.3 (12.1)
	350	0,8	5/9	470	11	6.7 (11.7)	8.2 (13.4)
		1,0	5/9	455	11	8.2 (19.9)	9.3 (20.9)

Nota: Os valores apresentados a vermelho correspondem a valores médios acima dos limites estabelecidos pela EN 14080 (2013). Valores a negrito correspondem a situações em que se verificaram 2 ou mais provetes com delaminação total excessiva.

Da análise da Figura 3.27 é possível verificar uma tendência para aumento da delaminação total com o aumento da quantidade de cola utilizada e também com o aumento da pressão de aperto. Apesar de não ter sido considerada a combinação 300 g/m² /1,0 MPa, prevê-se que os resultados não venham a ser positivos se a tendência descrita se registar. Por outro lado, a consideração de valores inferiores de pressão de aperto poderá ser considerada como vantajosa para o desempenho à delaminação.

A análise do Quadro C.10 do Anexo C não permite detetar qualquer influência do teor de água e da massa volúmica das lamelas uma vez que no elemento nº 70, único em que se registou teor de água acima de 15%, os resultados foram substancialmente melhores que nos restantes elementos. Também a massa volúmica das lamelas deste elemento era superior à do elemento nº 69 (colado nas mesmas condições). O tempo fechado parece afetar de forma distinta as diferentes combinações estudadas, podendo, no entanto, ter tido alguma influência nos resultados.

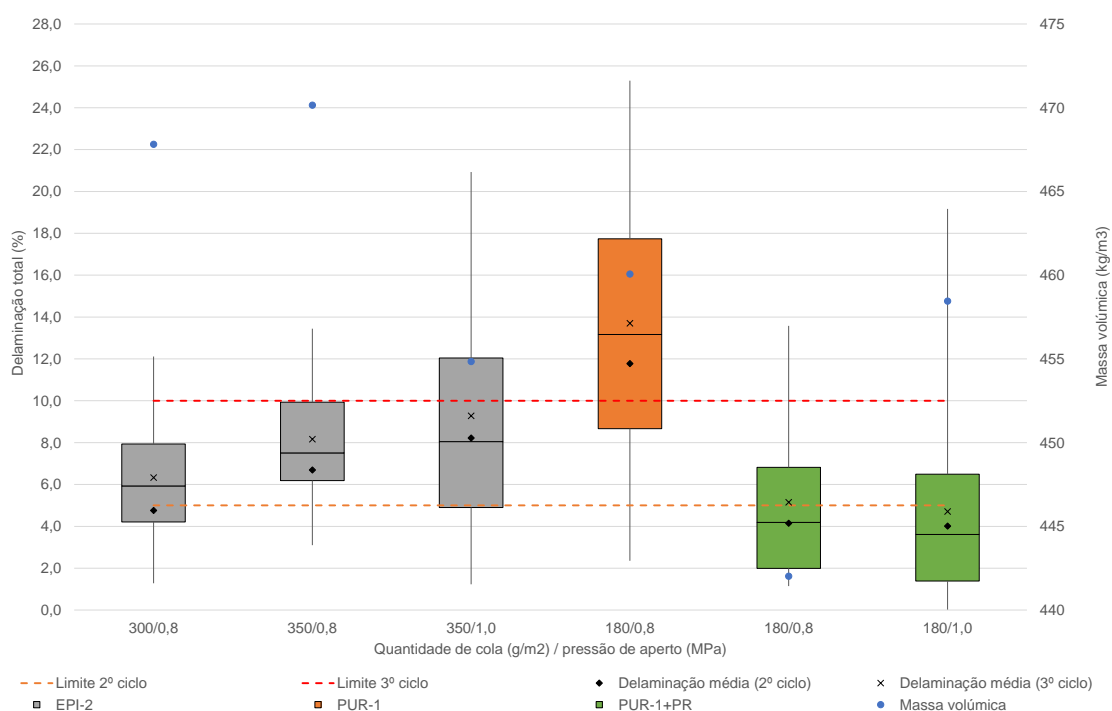


Figura 3.27 – Delaminação total registada após o 3º ciclo para os diferentes cenários considerados – colas do tipo EPI e PUR - Choupo

O desempenho da cola EPI-2 nas colagens de Choupo foi menos eficiente do que nas colagens de Pinho bravo (sem tratamento), ocorrendo maior delaminação total na generalidade das combinações estudadas.

3.4.5.4 Colas do tipo PUR

A exemplo das amostras de Pinho bravo, foi estudada a possibilidade de colagem de Choupo com a cola PUR-1 sem aplicação prévia de primário. O Quadro 3.19 apresenta os resultados dos ensaios de delaminação relativos às colas PUR-1 e PUR-1+PR.

Quadro 3.19 – Resumo da delaminação total média e máxima obtida de provetes colados com colas do tipo PUR

Cola	Quantidade de cola (g/m ²)	Pressão de aperto (MPa)	TF (min)	Massa volúmica (kg/m ³)	Nº de provetes	Delaminação total média (valor máximo)	
						2º ciclo (%)	3º ciclo (%)
PUR-1	180	0,8	5/10	460	11	11,8 (22,2)	13,7 (25,3)
PUR-1+PR	180	0,8	5/11	442	11	4,1 (12,3)	5,1 (13,6)
		1,0	5/9/10	458	33	4,0 (18,2)	4,7 (19,2)

Nota: Os valores apresentados a vermelho correspondem a valores médios acima dos limites estabelecidos pela EN 14080 (2013). Valores a negrito correspondem a situações em que se verificaram 2 ou mais provetes com delaminação total excessiva.

Dos resultados obtidos com a cola PUR-1 verificou-se sem margem para dúvidas que a cola não apresentou desempenho adequado à colagem de Choupo, tal como se tinha verificado para o Pinho bravo, sem e com tratamento preservador (Figura 3.27). Verificou-se inclusive que apenas 1 provete apresentou delaminação total inferior a 5% após o 2º ciclo e menos de metade dos provetes (4 em 11) apresentaram delaminação inferior a 10% após o 3º ciclo (Quadro C.11 do Anexo C).

A aplicação do primário, previamente à cola, PUR-1+PR, conduziu a um melhor desempenho em termos de delaminação total, tendo-se verificado valores médios abaixo dos limites máximos permitidos após ambos os ciclos de ensaio. Ainda assim, verificaram-se alguns provetes (13 no total) em ambas as combinações com delaminação total acima do limite permitido após o 2º ciclo e em 7 provetes após o 3º ciclo de ensaio. O mesmo foi verificado para a delaminação máxima por linha de cola em 2 provetes com valor superior a 30%.

Apesar de os resultados apresentados no Quadro 3.19 serem semelhantes para ambos os níveis de pressão de aperto, verificou-se ao longo do trabalho diferentes desempenhos das colagens, como se pode verificar no Quadro C.12 e Quadro C.13 do Anexo C. Dos 6 elementos produzidos com a combinação $180 \text{ g/m}^2 / 1,0 \text{ MPa}$ (nº 39-42, 73 e 74) verificou-se um excelente desempenho dos elementos nº 39 e 40, um desempenho adequado dos elementos nº 41, 73 e 74 e um desempenho inadequado do elemento nº 42. Tendo em conta o desempenho diferenciado entre os vários elementos colados nas mesmas condições, foi realizada a análise de influência dos vários parâmetros passíveis de influenciar os resultados. Em relação ao teor de água verificou-se do Quadro C.12 e Quadro C.13 do Anexo C que só os elementos nº 39 e 40 foram produzidos com lamelas cujo teor de água excedeu os 15%, pelo que se conclui que o mesmo não terá influenciado a delaminação excessiva registada no elemento nº 42. Por outro lado, a massa volúmica média dos provetes do elemento nº 42 é idêntica à média de outros elementos, sendo descartada também como causa para a excessiva delaminação. Uma causa possível para o incumprimento dos limites poderá estar associada a deficiente aplicação de primário nas lamelas, pois registou-se maior delaminação nos provetes posicionados nos topos do elemento.

Foi também possível verificar que os elementos nº 39 e 40 apresentaram lamelas com anéis tangenciais à linha de cola (madeira em corte tangencial), enquanto os restantes dispunham de pelo menos uma lamela de corte radial, tendo-se verificado algumas delaminações coincidentes com a interface de anéis de outono.

As colagens dos vários elementos foram realizadas em conjuntos de 2 elementos por campanha, tendo seguido o procedimento usado para as colagens com cola do tipo PUR-1.

A Figura 3.28 apresenta a delaminação total média consoante o tempo fechado registado para cada elemento, verificando-se uma clara tendência para diminuição da delaminação com o aumento do tempo fechado. Conclui-se portanto que para colagens de Choupo com cola PUR-1+PR deve ser assegurado um tempo fechado mínimo de 10 minutos.

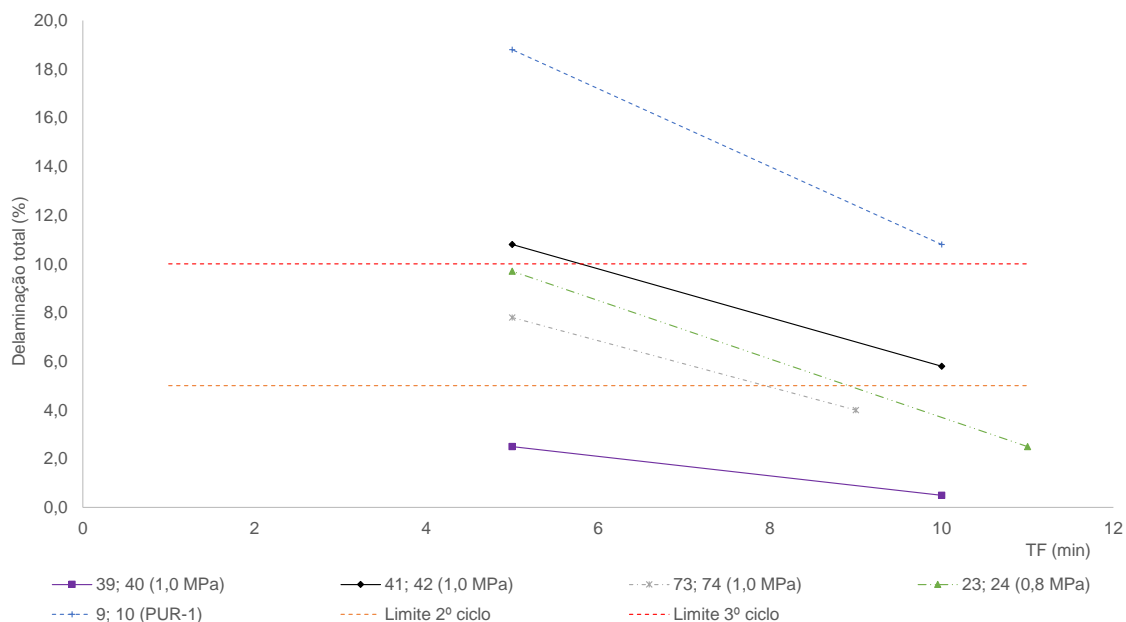


Figura 3.28 – Influência do tempo fechado na delaminação total após o 3º ciclo – cola do tipo PUR - Choupo

3.4.6 Resistência ao corte – resultados e discussão

Como referido anteriormente foram obtidos 14 provetes para ensaios de resistência ao corte dos elementos com 1000 mm (10 pela linha de cola e 4 pela madeira) e dos elementos com 500 mm foram obtidos 6 provetes (4 pela linha de cola e 2 pela madeira).

Após cada ensaio foi registada a carga máxima de rotura e realizada a medição da percentagem de rotura pela madeira como descrito em 3.2.6. Os resultados obtidos encontram-se listados no Quadro 3.20, sendo apresentados apenas os resultados dos ensaios considerados válidos (isentos de defeitos como nós e bolsas de resina). Do total de 1134 ensaios pela linha de cola foram considerados 1003 válidos (88%) e dos 648 ensaios pela madeira foram considerados válidos 596 ensaios (92%).

Observam-se, regra geral, valores médios muito próximos entre as diversas colas consideradas (cerca de 11,0 MPa), apesar de se terem registado valores mínimos de 8,8 MPa e máximos de 11,8 MPa. Verifica-se igualmente que na generalidade das combinações em que se registaram WFP mais baixos coincidiram com delaminação total média mais elevada. As colas PUR-1 e PUR-1+PR apresentaram valores mais reduzidos

de WFP o que vai ao encontro da maior delaminação obtida. Este comportamento tinha sido observado também nos resultados obtidos das colagens com Pinho bravo. De destacar a eficiência das linhas de cola, que regra geral foi superior a 1,0 demonstrando o bom desempenho da colagem, através de resistência ao corte superior à resistência ao corte da madeira.

Quadro 3.20 – Resumo da resistência ao corte e WFP das linhas de cola e resistência ao corte da pela madeira – Choupo

Cola	Quantidade de cola (g/m ²)	Pressão de aperto (MPa)	Massa volúmica (kg/m ³)	Linha de cola			Madeira		Eficiência da linha de cola
				Nº de provetes	Resist. Corte (Desv. padrão) (MPa)	WFP (%)	Nº de provetes	Resist. Corte (Desv. padrão) (MPa)	
PRF-1	350	0,8	474	44	11,0 (1,3)	90	30	10,1 (1,5)	1,10
		1,0	466	40	11,1 (0,6)	95	24	11,0 (1,7)	1,01
	450	0,8	472	44	11,2 (1,1)	96	26	10,1 (1,4)	1,11
		1,0	476	52	11,2 (0,9)	95	27	10,5 (1,7)	1,07
PRF-2	350	0,8	471	35	10,5 (1,3)	96	23	11,1 (1,5)	0,95
		1,0	467	41	10,9 (0,8)	98	24	9,3 (0,9)	1,17
	450	0,8	461	40	10,9 (0,9)	93	21	10,5 (1,1)	1,05
		1,0	447	39	11,3 (1,0)	97	22	9,2 (1,1)	1,23
PRF-3	350	0,8	471	41	10,3 (0,9)	96	21	10,2 (1,0)	1,02
		1,0	445	34	10,4 (0,8)	99	22	8,2 (0,9)	1,27
	450	0,8	464	42	10,9 (0,8)	98	22	11,4 (1,4)	0,96
		1,0	476	68	11,8 (1,1)	97	46	10,3 (1,4)	1,14
MUF-1	400	0,8	461	39	8,8 (0,6)	97	22	8,8 (1,3)	1,00
MUF-2	350	0,8	493	42	11,0 (1,2)	96	21	11,1 (1,7)	0,99
		1,0	456	38	11,2 (1,2)	99	24	11,8 (1,2)	0,95
	450	0,8	466	38	10,3 (1,0)	97	18	11,1 (0,9)	0,92
		1,0	462	34	8,8 (0,7)	92	21	8,9 (1,2)	0,99
EPI-2	300	0,8	468	41	9,1 (0,8)	97	23	8,7 (1,5)	1,05
	350	0,8	470	34	10,7 (1,1)	97	22	10,3 (1,1)	1,04
		1,0	455	37	11,1 (1,0)	98	24	11,0 (1,0)	1,01
PUR-1	180	0,8	460	36	11,2 (0,9)	90	21	10,0 (1,7)	1,12
PUR-1 + PR	180	0,8	442	40	10,6 (0,8)	87	22	10,4 (1,1)	1,01
		1,0	458	104	10,0 (1,0)	93	70	9,9 (1,2)	1,01

A Figura 3.29 apresenta a nuvem de valores individuais obtidos da resistência ao corte e percentagem de rotura pela madeira.

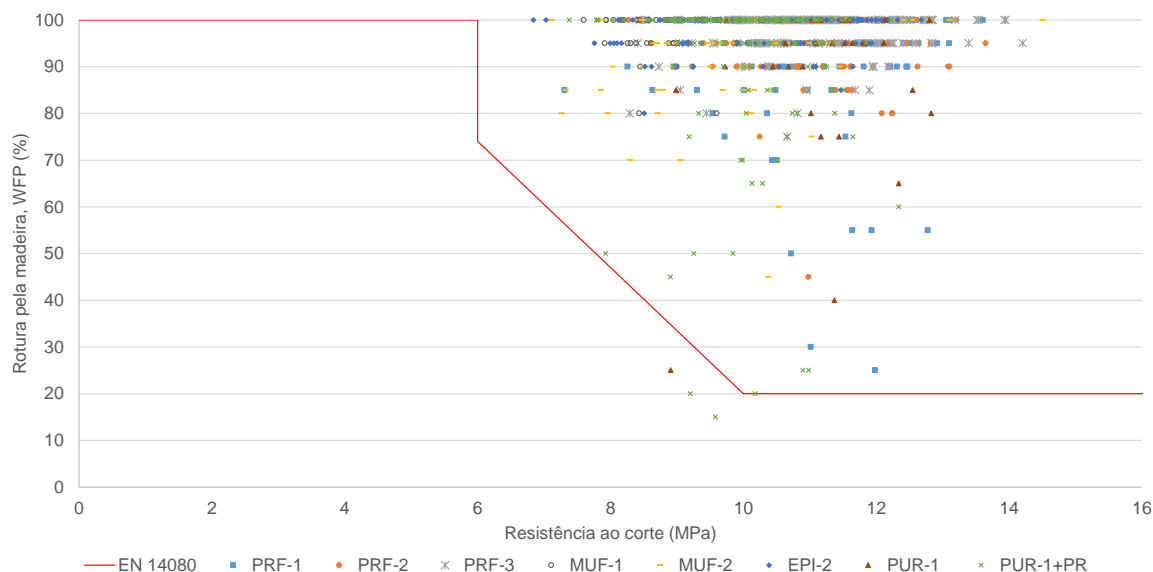


Figura 3.29 – Resultados da resistência ao corte e percentagem de rotura pela madeira para todas as colas (valores individuais) - Choupo

Da análise dos valores individuais verifica-se o incumprimento dos limites mínimos em 3 linhas de cola obtidas de provetes colados com cola PUR-1 (1 ensaio) e com cola PUR-1+PR (2 ensaios).

3.4.7 Conclusões

Do conjunto de resultados obtidos dos 54 provetes colados com Choupo, verificou-se que o desempenho geral das várias colas cumpriu os limites estabelecidos pela norma EN 14080 (2013) para ambos os ciclos de ensaio. Para a avaliação da qualidade de colagem foram considerados os critérios de avaliação do Método A para cumprir os requisitos de exposição da Classe de Serviço 3.

O melhor desempenho ao nível da delaminação foi observado para a cola MUF-2 com valores médios de delaminação total após o 3º ciclo iguais ou inferiores a 1,2%. Como já referido, uma das vantagens da cola MUF-2 está relacionada com a sua cor branca. Contudo, os tempos de prensagem são superiores aos necessários para as colas PRF. De entre as 3 colas PRF consideradas no estudo, a cola PRF-1 apresentou melhor desempenho. No entanto, a sua cor castanha pode ser um inconveniente estético uma vez que a cor da madeira de Choupo é um amarelo bastante claro, tornando-se evidentes as linhas de cola nos elementos produzidos.

A cola EPI-2 apresentou um desempenho inadequado para colagem de Choupo, tendo-se registado delaminação excessiva após o 2º ciclo de ensaio em aproximadamente 60% dos provetes. Ainda assim, após o 3º ciclo os valores médios registados foram inferiores a 10%,

apesar de 30% dos provetes não cumprirem os limites. Face à tendência de evolução da delaminação com a quantidade de cola e pressão de aperto, estima-se que poderão ser obtidos resultados favoráveis à colagem de Choupo aplicando menor pressão de aperto.

Relativamente às colagens com cola PUR, verifica-se ser necessária a aplicação prévia de primário, tal como se tinha verificado no Pinho bravo. Ainda assim, o comportamento da cola PUR-1+PR não foi totalmente satisfatório tendo em conta a ocorrência de provetes com delaminação excessiva. Verificou-se uma tendência clara da diminuição da delaminação total com o aumento do tempo fechado para valores próximos de 10 minutos.

Em relação aos ensaios de corte, as várias colas consideradas, tiveram desempenho idêntico, tendo-se registado menores valores de WFP para as combinações que apresentaram valores mais elevados de delaminação total. Conclui-se, portanto, que a WFP pode ser um bom indicador da qualidade de colagem, apesar de não ser vinculativo, pois os resultados cumprem os requisitos dos ensaios de resistência ao corte não cumprindo os valores de delaminação total permitida como foi o caso da cola PUR-1.

4 INTEGRIDADE DAS LINHAS DE COLA APÓS ENVELHECIMENTO NATURAL

4.1 Enquadramento

A durabilidade das estruturas de madeira é, regra geral, afetada por três tipos de agentes: i) agentes atmosféricos; ii) agentes biológicos e iii) agentes químicos (Dias et al, 2009). No presente capítulo pretende-se avaliar a influência dos agentes atmosféricos na durabilidade das linhas de cola de madeira lamelada colada.

Os efeitos dos agentes atmosféricos estão relacionados com a exposição da madeira à chuva, ao sol e ao vento, traduzindo-se em alterações dos elementos essencialmente a nível estético, como é exemplo a mudança de cor para um tom acinzentado (Cruz e Nunes, 2009). Para além da mudança de cor, a exposição à ação de agentes atmosféricos conduz a variações de temperatura, gradientes de teor de água e consequentemente tensões internas na madeira e nas linhas de cola, o que pode provocar delaminação e também o aparecimento de fendas nas lamelas.

Gaspar (2010) conduziu um estudo cujo objetivo consistiu na avaliação do envelhecimento natural de madeira lamelada colada de Pinho bravo e consequente desempenho das juntas coladas. Os elementos de Pinho bravo foram produzidos em laboratório através da colagem com cola do tipo PRF. Foi considerada a colagem de madeira de Pinho sem tratamento preservador (Z) e com tratamento preservador à base de azóis de cobre (H). Resultados prévios tinham revelado melhor desempenho da colagem de face para temperaturas de cura de 45°C, pelo que o autor optou pelo fabrico de elementos sem tratamento à temperatura de 20°C (Z20) e 45°C (Z45). Por sua vez, na madeira com tratamento foi considerada apenas a temperatura de 45°C (H45). Cada elemento foi produzido com 6 lamelas de 0,033m de espessura, 0,125m de largura e 1,5m de comprimento. As dimensões finais dos elementos expostos eram 0,115 m x 0,20 m x 1,50 m. No total foram colocadas em exposição 30 vigas (10 vigas Z20, 5 vigas Z45 e 15 vigas H45) protegidas (pintura) 1 mês após o início da exposição.

Da análise das superfícies dos elementos após exposição, os autores verificaram que o comprimento total de delaminação na face exposta a sul das vigas Z20 foi significativamente superior à das vigas Z45 ao longo de todo o período de envelhecimento. Verificou-se um valor máximo de 20% após 27 meses de envelhecimento. Foi igualmente registada pelos autores uma tendência para maior delaminação nas vigas Z20 para massas volúmicas mais elevadas. Gaspar (2010) refere como possível causa o facto de ocorrer

maior penetração de cola na madeira menos densa, tornando a ligação mais eficaz e ainda o facto de madeira mais densa apresentar uma tendência maior para retrair.

Em relação aos elementos de Pinho tratado (H45), foram registados valores máximos de delaminação correspondentes a 57% do comprimento total na face sul e 45% na face norte. Estes valores foram obtidos após 30 meses de envelhecimento, apesar de após 9 e 18 meses de envelhecimento se terem registado valores entre 40% e 50% para ambas as faces.

Gaspar (2010) realizou igualmente ensaios de delaminação após envelhecimento, tendo obtido desempenho adequado nas vigas sem tratamento. A comparação de valores de delaminação total (3º ciclo - Método A) para provetes retirados após igual período de envelhecimento, revelou melhor desempenho por parte das vigas Z45 em relação às vigas Z20. Por outro lado, as vigas H45 apresentaram desempenho adequado apenas nos períodos de análise relativos a 3 e 6 meses de envelhecimento. Após 9, 15 e 21 meses de envelhecimento foram registados valores médios de delaminação total superior a 10%.

Lampreia (2010) procurou avaliar o desempenho da colagem com a aplicação prévia de primário com a cola PRF-1 em Pinho bravo sem e com tratamento. As colagens realizadas em ambiente controlado (20°C de temperatura e 65% de humidade relativa) revelaram um bom desempenho, mesmo sem a aplicação de primário. Tendo em consideração a evolução do desempenho das colas PRF registado do estudo de Gaspar (2010) para Lampreia (2010), procurou-se avaliar o desempenho da colagem de Pinho bravo (sem e com tratamento preservador) submetido a períodos de envelhecimento natural prolongados.

No decorrer do presente capítulo são descritos os processos de fabrico dos elementos de madeira lamelada colada, as condições de exposição e os resultados obtidos após períodos de exposição em ambiente exterior de 4, 6 e 9 meses. São listados os resultados tendo em consideração uma avaliação da superfície externa, seguida de ensaios de delaminação e resistência ao corte das linhas de cola. Por fim, são apresentadas as principais conclusões obtidas.

4.2 Fabrico dos elementos

No presente trabalho foi decidido avaliar o desempenho de elementos de madeira lamelada colada de Pinho bravo sem e com tratamento preservador. O objetivo consistiu essencialmente na avaliação do desempenho das linhas de cola na situação de madeira exposta sem qualquer tipo de proteção (pintura). No entanto, foram também expostos elementos com proteção para analisar a influência da mesma no desempenho das linhas de cola. No total foram produzidos 42 elementos (21 de MP_{env} e 21 de TMP_{env}), tendo-se considerado para o seu fabrico duas amostras: i) Pinho bravo sem tratamento (MP_{env}) e ii)

Pinho bravo com tratamento preservador TANALITH E 8001 (TMP_{env}). A constituição do tratamento preservador pode ser consultada no subcapítulo 3.3.3.

Ambas as amostras foram alvo de caracterização física tal como indicado no capítulo 3. A amostra MP_{env} consistiu em 115 tábuas de dimensões médias 41 mm x 121 mm x 2892 mm. A média e desvio padrão da massa volúmica eram $638,4 \pm 59,2 \text{ kg/m}^3$ com valores variando entre $531,0 \text{ kg/m}^3$ e $828,4 \text{ kg/m}^3$. O teor de água médio medido através do higrómetro de agulhas foi de 16,5% com valores mínimo e máximo de 13,6% e 18,4%. Por sua vez, a amostra TMP_{env} era composta por 105 tábuas de dimensões médias de 39 mm x 113 mm x 2591 mm. A média e desvio padrão da massa volúmica eram $650,1 \pm 51,8 \text{ kg/m}^3$ com valores mínimo e máximo de $564,4 \text{ kg/m}^3$ e de $824,8 \text{ kg/m}^3$. O teor de água médio medido através do higrómetro de agulhas foi de 17,4% com valores mínimo e máximo de 15,2% e 19,4%.

Após a caracterização física das amostras, as tábuas foram separadas por conjuntos de 6 para produção dos elementos, tendo-se considerado como critério para a distribuição das mesmas a massa volúmica, como ilustra a Figura 4.1. A orientação dos anéis de crescimento das lamelas teve em conta as indicações presentes na EN 14080 (2013) para Classe de Serviço 3. Antes de proceder à montagem, as tábuas foram aparelhadas para a espessura final de 30 mm.

Lamela 1	→	$\rho \geq 650$
Lamela 2	→	$600 < \rho \leq 650$
Lamela 3	→	$\rho \leq 600$
Lamela 4	→	$\rho \leq 600$
Lamela 5	→	$600 < \rho \leq 650$
Lamela 6	→	$\rho \geq 650$

Figura 4.1 – Distribuição de massas volúmicas das lamelas dos elementos sujeitos a envelhecimento natural (kg/m^3)

Do processo de redução de espessura resultaram as lamelas necessárias para o fabrico dos elementos, com 1500 mm de comprimento. Foi também obtido de cada lamela 1 provete para determinação do teor de água segundo a EN 13183-1 (2002), tendo-se obtido para a amostra MP_{env} o teor de água médio de 14,2% com valores mínimo e máximo de 12,7% e de 15,9%. Do conjunto de 115 tábuas apenas 13 apresentaram teor de água superior a 15%. De qualquer forma, tendo em conta as conclusões registadas no capítulo 3, não é de esperar influência destes valores no desempenho da colagem durante o envelhecimento. Para a amostra TMP_{env} obteve-se um teor de água médio de 14,5% com valor mínimo de 12,5% e máximo de 16,3%.

Tendo em consideração os resultados obtidos no capítulo 3 (Quadro 3.10 e Quadro 3.12) foi decidido avaliar o desempenho de 3 tipos de cola, tendo-se optado por aqueles cujo desempenho na qualidade de colagem de face foi melhor nos ensaios anteriores, bem como os respectivos parâmetros de colagem que proporcionaram esse mesmo desempenho. Seguidamente são apresentadas as colas utilizadas e os parâmetros de colagem adotados para fabrico dos elementos:

- PRF-1 (quantidade de cola: 350 g/m²; pressão de aperto: 0,8 MPa);
- PRF-3 (quantidade de cola: 450 g/m²; pressão de aperto: 0,8 MPa);
- PUR-1+PR (quantidade de cola: 180 g/m²; pressão de aperto: 0,8 MPa; primário: 20g/m²);

O processo de aplicação da cola e prensagem seguiu o procedimento referido em 3.2.4. Decorrido o processo de prensagem, os elementos foram mantidos durante 7 dias em espaço climatizado (20±2°C de temperatura e 65±5% de humidade relativa). Após esse período foi processado o aparelhamento lateral e corte dos topos para remoção do excedente de cola. Cada elemento foi medido nas três dimensões (largura, altura e comprimento) e pesado antes de ser colocado em exposição natural. Dos 21 elementos de MP_{env}, a cola PUR-1+PR foi usada em 5 e as colas PRF-1 e PRF-3 foram usadas em 8 elementos cada. Relativamente aos 21 elementos de TMP_{env}, foram produzidos 7 elementos com cada uma destas referências de cola.

4.3 Condições de exposição

4.3.1 Localização e descrição dos elementos

O envelhecimento natural decorreu na cobertura do edifício do SerQ – Centro de Inovação e Competências da Floresta, localizado na Sertã (coordenadas GPS decimais: latitude 39,819649° e longitude -8,110132°). No total foram expostos 42 elementos de madeira lamelada colada (Figura 4.2) com dimensões aproximadas de 105 mm x 180 mm x 1450 mm (largura x altura x comprimento).

Os elementos foram dispostos sobre uma estrutura de madeira (cavaletes e ripas) produzida para o efeito. A distância da estrutura ao pavimento da cobertura foi de 0,74 m, assegurando que não ocorria sombreamento pelos elementos da cobertura circundantes e que as platibandas não impediam a circulação do ar entre elementos de MLC. A estrutura foi posicionada de modo a que os elementos ao serem dispostos sobre a mesma ficassem com uma das faces exposta à radiação solar na direção sul e a outra face na direção norte como indica a ASTM D1828 (2007). Assim, um dos topos de cada elemento ficou orientado a nascente e outro orientado a poente. O espaçamento entre faces dos elementos era de 0,6 m, determinado para uma altura solar de 17,6° garantindo assim que no dia com menos tempo

de luz solar do ano (22 de dezembro) não ocorria sombreamento entre elementos durante pelo menos 5h (tempo solar verdadeiro).



Figura 4.2 – Elementos de madeira lamelada colada em envelhecimento natural

O Quadro 4.1 e o Quadro 4.2 apresentam o resumo da informação respeitante aos elementos MP_{env} e TMP_{env} , respetivamente. São apresentados os períodos de análise, bem como as condições iniciais, nomeadamente: peso inicial, teor de água inicial (média das lamelas) e informação relativa à proteção aplicada.

Quadro 4.1 – Resumo dos elementos submetidos a envelhecimento natural e condições iniciais – MP_{env}

Elemento	Cola	Tempo de exposição (meses)	Término exposição (mês/ano)	Massa inicial (kg)	Teor de água inicial (%)	Observações
80	PRF-1	4	agosto / 2017	17,76	14,1	
85	PRF-1	6	outubro / 2017	17,86	14,0	
88	PRF-1	9	janeiro / 2018	17,51	14,1	Sem proteção
89	PRF-1	18	outubro / 2018	17,82	14,8	
79	PRF-1	24	abril / 2019	18,07	14,0	
91	PRF-3	4	agosto / 2017	18,12	14,8	
86	PRF-3	6	outubro / 2017	18,09	13,9	
87	PRF-3	9	janeiro / 2018	17,94	14,4	Sem proteção
74	PRF-3	18	outubro / 2018	17,88	14,4	
83	PRF-3	24	abril / 2019	17,62	14,2	
77	PUR-1+PR	4	agosto / 2017	17,56	13,9	
73	PUR-1+PR	6	outubro / 2017	17,56	14,4	
76	PUR-1+PR	9	janeiro / 2018	18,39	14,1	Sem proteção
71	PUR-1+PR	18	outubro / 2018	18,35	14,4	
72	PUR-1+PR	24	abril / 2019	18,21	14,6	
78	PRF-1	36	abril / 2020	18,06	14,1	Aplicação de imunizador
81	PRF-1	36	abril / 2020	18,01	14,2	Pintura com solução aquosa
84	PRF-1	36	abril / 2020	18,05	14,0	Pintura com solução solvente
82	PRF-3	36	abril / 2020	17,76	14,0	Aplicação de imunizador
90	PRF-3	36	abril / 2020	18,13	15,2	Pintura com solução aquosa
75	PRF-3	36	abril / 2020	17,93	14,3	Pintura com solução solvente

A análise dos elementos MP_{env} teve como objetivo avaliar, não só o desempenho durante um período de tempo prolongado, mas também apreciar o desempenho dos elementos perante outros 3 cenários: i) aplicação de “imunizador” (I) (produto preservador de aplicação superficial com ação fungicida), ii) pintura com solução aquosa (SA) e iii) pintura com solução solvente (SS). Nos elementos nº 78 e 82 foi apenas feita a aplicação de imunizador (Cuprinol), com o objetivo de proteger a superfície do elemento de eventuais ataques de agentes biológicos. Tendo por base o estudo conduzido por Gaspar (2010) em que foi aplicada uma pintura integral nos elementos após o primeiro mês de envelhecimento, decidiu-se considerar também a aplicação de pintura em alguns elementos com função de proteção da madeira face aos agentes atmosféricos. Assim, os elementos nº 81 e 90 foram pintados com um produto da Robbialac, comercialmente designado por Transcolor Aqua, que consiste numa solução semitransparente aquosa incolor e concebida para aplicação em interior e exterior. O produto foi aplicado em três demãos por pincelagem. Por sugestão da empresa foi igualmente testado um produto à base de solução semitransparente solvente com a cor da madeira de Teca (Transcolor acetinado) e concebido para aplicação em exterior. O produto foi aplicado em duas demãos nos elementos nº 84 e 75.

Quadro 4.2 – Resumo dos elementos submetidos a envelhecimento natural e condições iniciais – TMP_{env}

Elemento	Cola	Tempo de exposição (meses)	Término exposição (mês/ano)	Massa inicial (kg)	Teor de água inicial (%)	Observações
40	PRF-1	4	agosto / 2017	18,34	14,9	
43	PRF-1	6	outubro / 2017	17,70	14,9	
23	PRF-1	9	janeiro / 2018	18,19	14,0	Sem proteção
28	PRF-1	18	outubro / 2018	19,10	14,1	
27	PRF-1	24	abril / 2019	18,40	14,0	
25	PRF-3	4	agosto / 2017	18,29	14,0	
26	PRF-3	6	outubro / 2017	18,28	14,1	
42	PRF-3	9	janeiro / 2018	18,05	14,9	Sem proteção
32	PRF-3	18	outubro / 2018	19,18	14,6	
22	PRF-3	24	abril / 2019	18,09	15,0	
36	PUR-1+PR	4	agosto / 2017	17,44	15,4	
41	PUR-1+PR	6	outubro / 2017	17,95	15,1	
33	PUR-1+PR	9	janeiro / 2018	17,65	15,1	Sem proteção
30	PUR-1+PR	18	outubro / 2018	18,40	14,3	
29	PUR-1+PR	24	abril / 2019	17,59	14,3	
24	PRF-1	36	abril / 2020	18,65	14,0	Pintura com solução aquosa
39	PRF-1	36	abril / 2020	18,56	14,9	Sem proteção
31	PRF-3	36	abril / 2020	18,39	14,2	Pintura com solução aquosa
21	PRF-3	36	abril / 2020	18,22	14,8	Sem proteção
35	PUR-1+PR	36	abril / 2020	18,05	15,4	Pintura com solução aquosa
34	PUR-1+PR	36	abril / 2020	17,70	15,1	Sem proteção

A exemplo do considerado nos elementos MP_{env} , também para os elementos TMP_{env} foram produzidos 5 elementos por tipo de cola para avaliação do desempenho sem qualquer tipo de proteção. Adicionalmente foram produzidos 2 elementos por tipo de cola, que foram expostos 15 dias depois dos restantes, em que 1 dos elementos foi pintado com o produto à base de solução aquosa Transcolor Aqua.

4.3.2 Dados meteorológicos

No momento em que os 42 elementos foram expostos a envelhecimento natural, foram iniciados os procedimentos de monitorização da temperatura e humidade relativa do ar através de um termo-higrómetro (modelo HOBO Pro v2 Part # U23-001) com gravação de dados a cada 15 minutos. O intervalo de funcionamento do equipamento é de -40 a 70°C de temperatura e de 0 a 100% de humidade relativa.

Foram também solicitados alguns dados meteorológicos ao Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA), nomeadamente: i) temperatura média do ar (°C), ii) intensidade média do vento (m/s), iii) precipitação total (mm), iv) radiação global total (KJ/m²) e v) humidade relativa média (%). Os dados foram fornecidos para cada dia do período compreendido entre 01 de abril de 2017 e 31 de março de 2018. A informação fornecida pelo IPMA diz respeito à recolha de dados por uma estação meteorológica localizada em Moitas, município de Proença-a-Nova, com exceção da humidade relativa cuja estação meteorológica se localiza em Vale Donas, município de Tomar.

São apresentados na Figura 4.3 os dados mensais de temperatura e humidade relativa obtidos pelo equipamento localizado junto aos elementos, e também os fornecidos pelo IPMA. Na Figura 4.4 são mostrados os valores mensais registados na estação meteorológica de Moitas, relativos à velocidade média do vento, radiação total solar e precipitação total.

Da análise dos registos de temperatura verifica-se um bom ajustamento entre os dois conjuntos de registos apesar de a estação meteorológica localizada em Moitas (Proença-a-Nova) distar cerca de 25,4 km do SerQ. Em relação à humidade relativa do ar verificou-se uma tendência semelhante apesar de existirem diferenças mais notórias nos primeiros 8 meses de envelhecimento (abril a novembro de 2017). No período de dezembro de 2017 a março de 2018 os valores foram praticamente coincidentes.

Assim, com base nos valores monitorizados na cobertura junto aos elementos, foi apurada a temperatura média anual de 16,2°C, com valores a variar entre -2,2°C (fevereiro de 2018) e 45,0°C (agosto de 2017). Nos meses mais quentes (abril a outubro de 2017) registaram-se temperaturas médias de 21,4°C, com valores máximos mensais a oscilar entre 33,3°C e

45,0°C e valores mínimos mensais a variar entre 2,4°C e 10,7°C. Por outro lado, nos meses mais frios (novembro de 2017 a março de 2018) foi registada uma temperatura média de 10,2°C com valores máximos mensais a oscilar entre 20,1°C e 25,6°C e valores mínimos mensais a variar entre -2,2°C e 1,8°C. Este período (novembro de 2017 a março de 2018) coincidiu com os valores médios de humidade relativa mais elevados, superiores a 80% com exceção do mês de fevereiro de 2018 cujo valor médio foi de 68,8%.

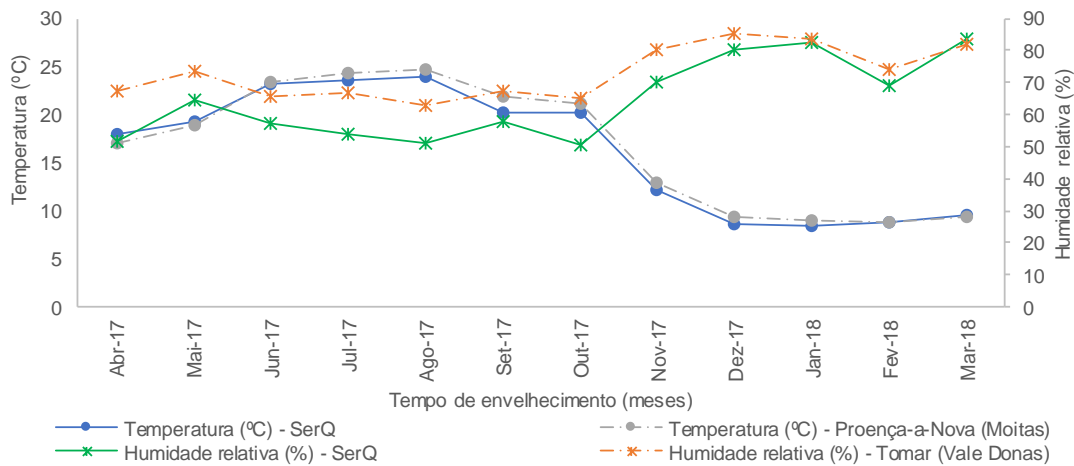


Figura 4.3 – Valores médios mensais de temperatura (SerQ e estação meteorológica de Moitas) e humidade relativa (SerQ e estação meteorológica de Vale Donas)

O ano de 2017 foi bastante seco, o que se pode constatar pela curva de precipitação total (Figura 4.4). No período de abril a outubro de 2017 apenas o mês de maio registou precipitação total superior à precipitação média registada no período de 1971 a 2000 para o Distrito de Castelo Branco (66,8 l/m²) (Portal do Clima, 2018). O período de outono registou precipitação total média próxima dos 100 l/m², tendo-se registado um incremento significativo de precipitação no mês de março de 2018 (391,9 l/m²).

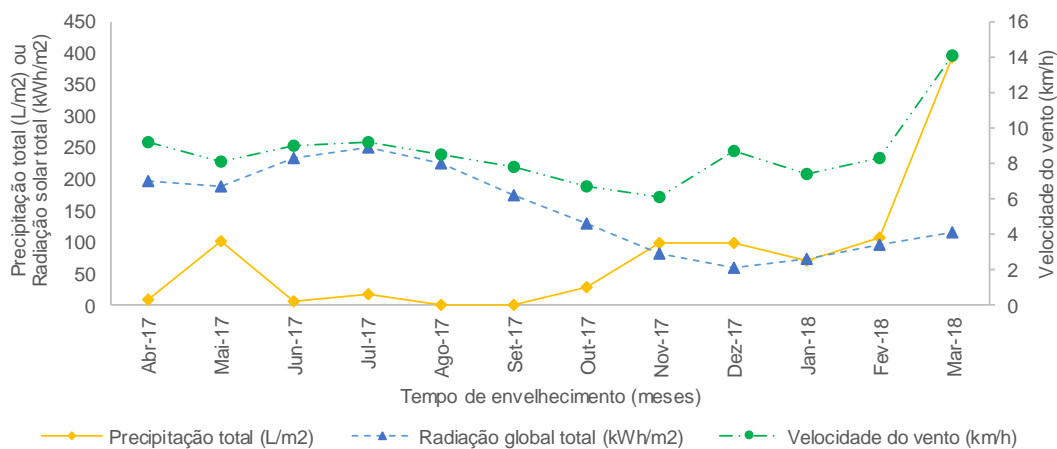


Figura 4.4 – Velocidade média mensal do vento, precipitação total mensal e radiação solar total mensal (estação meteorológica de Moitas)

A curva de precipitação registada no período de abril de 2017 a março de 2018 é claramente distinta da curva obtida do período considerado por Gaspar (2010) (abril 2007 a março de 2009). Como termo de comparação são apresentados no Quadro 4.3, o número de horas acumulado com temperatura inferior a 15°C e com temperatura superior a 20°C, 30°C ou 35°C, e o número de horas acumulado com humidade relativa inferior a 30% e com humidade relativa superior a 65%, 85% ou 95% durante o período de 12 meses de envelhecimento (abril de 2017 a maio de 2018).

Quadro 4.3 – Número acumulado de horas para temperatura média inferior a 15°C ou superior a 20°C, 30°C ou 35°C e humidade relativa inferior a 30% ou superior a 65%, 85% ou 95%

Tempo de exposição (meses)	Período de envelhecimento	Número acumulado de horas com temperatura:				Número acumulado de horas com humidade relativa:			
		< 15°C	> 20°C	> 30°C	> 35°C	< 30%	> 65%	> 85%	> 95%
3	abr/2017 - jun/2017	558	913	229	81	242	814	341	56
4	abr/2017 - jul/2017	652	1353	407	163	383	1090	415	60
6	abr/2017 - set/2017	918	2133	669	249	627	1615	571	76
9	abr/2017 - dez/2017	2311	2521	763	260	826	2849	1246	375
12	abr/2017 - mar/2018	4271	2539	763	260	867	4478	2353	969

Os valores obtidos no presente trabalho quando comparados com os obtidos por Gaspar (2010) após 12 meses de envelhecimento, refletem um número ligeiramente inferior de horas com temperatura média inferior a 15°C (-92h). Por outro lado, o número de horas com temperatura média superior a 20°C foi significativamente superior (+991h), o que se traduziu em mais 668 horas com temperatura média superior a 30°C e mais 242 horas com temperatura média acima de 35°C. Em sentido inverso, na humidade relativa o número de horas acumulado foi superior para valores de HR inferior a 30% (+634h). Para humidade relativa superior a 65% a diferença foi de menos 1356 horas.

Verificou-se ainda que a radiação solar nos meses mais quentes (abril a outubro de 2017) teve um valor médio mensal de 199,1 kWh/m² e nos meses mais frios (novembro de 2017 a março de 2018) teve um valor médio mensal de 84,5 kWh/m². No período em análise (abril de 2017 a março de 2018) o valor médio mensal de radiação solar foi de 151,4 kWh/m² a variar entre 60,0 kWh/m² (dezembro de 2017) e 250,4 kWh/m² (julho de 2017), superior à média registada por Gaspar (2010) (143,3 kWh/m²).

A velocidade média do vento foi relativamente constante ao longo do período de 12 meses de envelhecimento em análise. Contudo, registaram-se velocidades médias mensais do vento com valor máximo de 25,9 km/h em março de 2018.

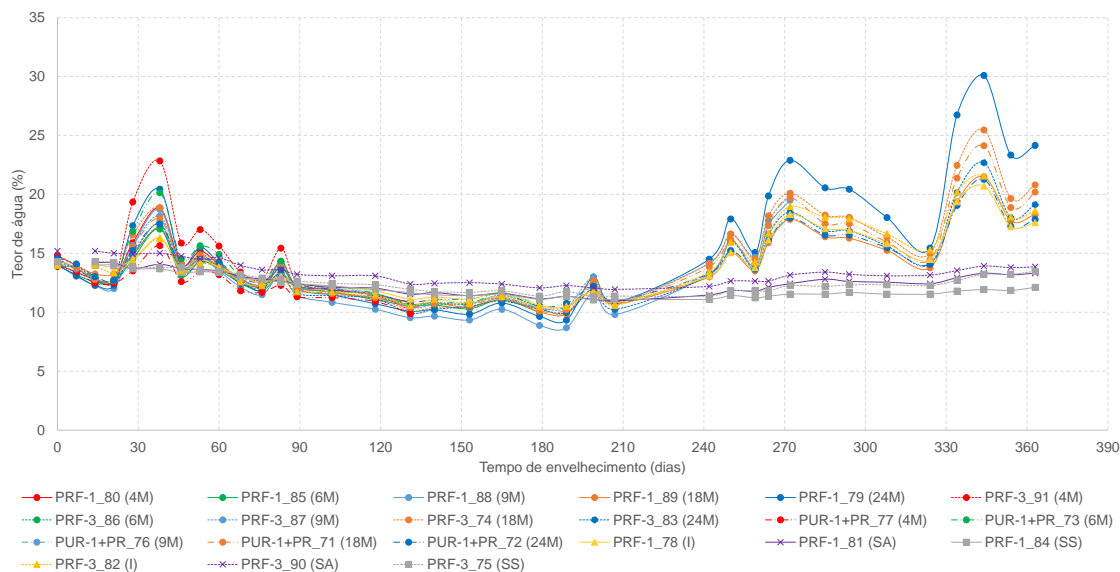
4.4 Monitorização do teor de água

Durante o período de exposição ao envelhecimento natural foi realizada a pesagem dos elementos com periodicidade aproximada de 15 dias. Tendo em conta a massa inicial (m_1) de cada elemento e o teor de água (w) obtido da média do teor de água das lamelas, procurou-se estimar o teor de água ao longo do período de envelhecimento. Assim, foi determinada a massa seca (m_0) com base na Equação 4.2 obtida da Equação 4.1 para a determinação do teor de água em estufa pela EN 13183-1 (2002).

$$w = \frac{(m_1 - m_0)}{m_0} \quad (4.1)$$

$$m_0 = \frac{m_1}{(w+1)} \quad (4.2)$$

Com base na massa seca determinada pela Equação 4.2 e para a massa de cada elemento ao longo do envelhecimento foi estimado o teor de água médio, cujos resultados se apresentam na Figura 4.5 para os elementos MP_{env} e na Figura 4.6 para os elementos TMP_{env} .



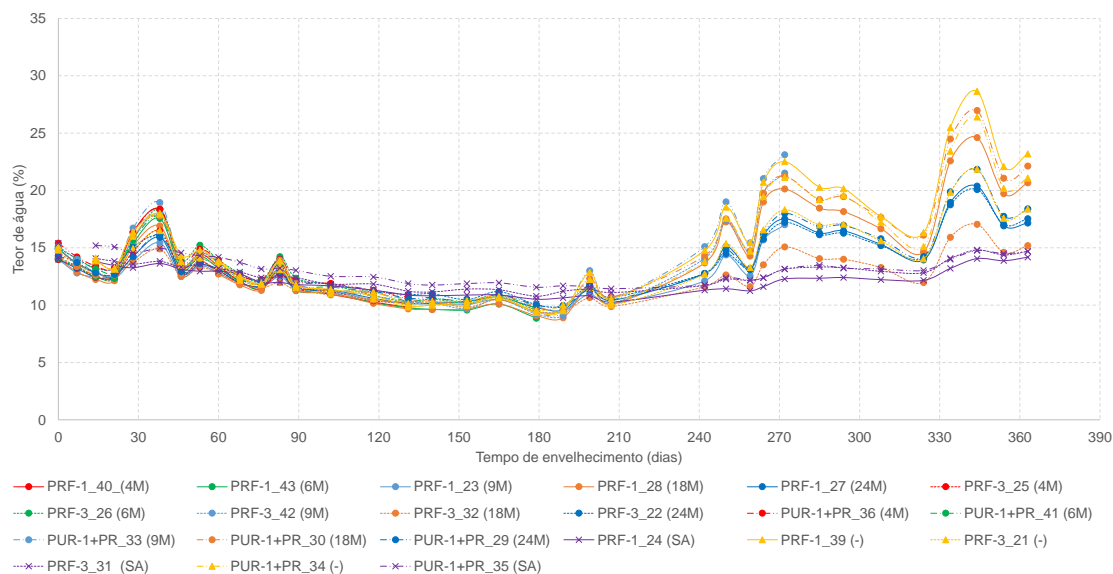


Figura 4.6 – Evolução do teor de água ao longo de 12 meses de envelhecimento natural – TMP_{env}

As variações de teor de água da madeira estão claramente relacionadas com as condições atmosféricas registadas, em especial com a ocorrência de precipitação nos dias que antecederam a pesagem dos elementos. Verificou-se também que as variações ocorreram de forma idêntica nos 42 elementos, com valor mínimo de 8,7% (13/10/2017) e máximo de 30,1% (17/03/2018) registados nos elementos MP_{env} e valor mínimo de 8,9% e máximo de 28,6% nos elementos TMP_{env} .

De realçar as diferenças registadas na evolução do teor de água entre elementos sem qualquer proteção (pintura) e os elementos com proteção (solução aquosa ou solução solvente) cujos valores de teor de água apresentaram variações bastante inferiores, nomeadamente entre 10,3% e 15,4% (elementos MP_{env}) e entre 11,0% e 15,2% (elementos TMP_{env}).

4.5 Avaliação da integridade das linhas de cola

O envelhecimento dos elementos continua a decorrer sendo que se prevê o término da análise aos 36 meses para os elementos que foram alvo de proteção. Em relação aos restantes elementos (sem proteção) foi realizada a avaliação da integridade das linhas de cola após 4, 6, 9 e 18 meses de envelhecimento. A avaliação consistiu numa primeira fase, na análise visual da superfície dos elementos e na medição da delaminação ocorrida nas superfícies dos elementos (laterais e topos). Na segunda fase foi avaliada a qualidade de colagem de cada elemento retirado de exposição através de ensaios de delaminação e de resistência ao corte.

4.5.1 Avaliação da superfície dos elementos

Na avaliação da superfície dos elementos verificou-se o surgimento de manchas acinzentadas na face superior dos elementos MP_{env} aos 5 meses de envelhecimento natural (setembro de 2017). Decorridos 6 meses já se observavam manchas acinzentadas também na face orientada a sul (Figura 4.7). Constatou-se também que a aplicação de imunizador nos elementos número 78 e 82 protegeu significativamente a superfície do aparecimento de fungos que originaram as manchas acinzentadas, em particular nas faces e nos topos (Figura 4.8).

Em relação aos elementos que foram alvo de proteção (pintura) a cor dos mesmos manteve-se intacta durante um período de tempo prolongado. Contudo, após 7 meses de exposição verificou-se que a pintura à base de solução aquosa começava a apresentar sinais de degradação na face superior dos 3 elementos TMP_{env} (n°s 24, 31 e 35). Ainda assim, só aos 9 meses se verificou que a pintura começava a apresentar sinais de degradação ligeira na face sul. Na mesma data os elementos MP_{env} não apresentavam quaisquer sinais de degradação da pintura em ambas as faces (sul e norte). Contudo, o elemento n° 75, pintado com solução solvente, apresentava uma fissura na face superior que não representava qualquer problema para a integridade das linhas de cola. Ainda assim, foi registado um ligeiro incremento de teor de água em comparação com o elemento n° 84, protegido da mesma forma.



Figura 4.7 – Aparência de manchas acinzentadas na face sul dos elementos MP_{env} após 6 meses de envelhecimento

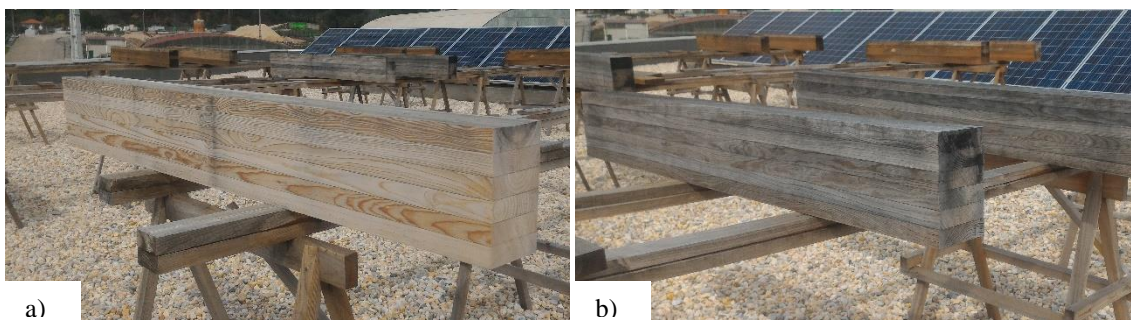


Figura 4.8 – Diferença de coloração em elementos MP_{env} após 12 meses de envelhecimento: a) elemento protegido com imunizador; b) elemento sem proteção

Nos elementos TMP_{env} o surgimento de manchas acinzentadas não foi evidente. No entanto, decorridos 12 meses de envelhecimento natural, era clara a descoloração dos elementos sem proteção em relação aos elementos protegidos com solução aquosa (Figura 4.9).

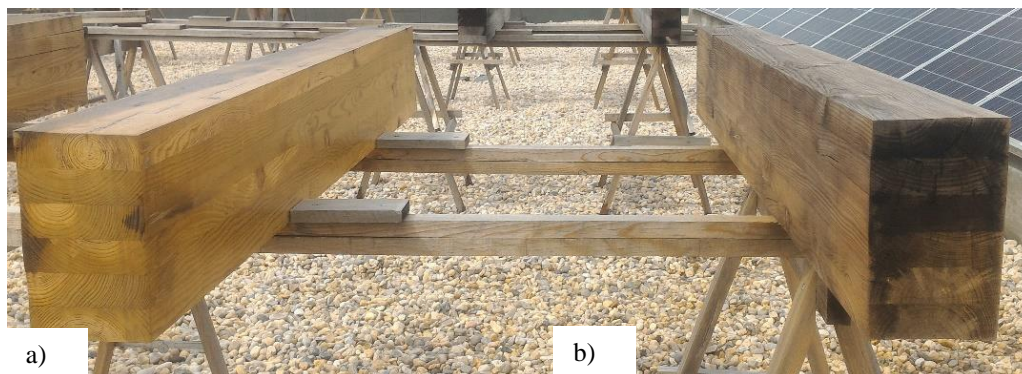


Figura 4.9 – Diferença de coloração em elementos TMP_{env} após 12 meses de envelhecimento: a) elemento protegido com solução aquosa; b) elemento sem proteção

Os efeitos do envelhecimento em situação de exposição natural foram avaliados aos 4, 6, 9 e 18 meses. Encontra-se ainda prevista a análise aos 24 e aos 36 meses. Por cada período de envelhecimento considerado foram retirados do exterior 6 elementos (3 elementos MP_{env} - 1 por cada tipo de cola e 3 elementos TMP_{env} - 1 por cada tipo de cola). Após a pesagem de cada elemento, foi verificada a ocorrência de delaminação em todas as linhas de cola em ambas as faces e em ambos os topos. Foram primeiramente assinaladas todas as delaminações registrando-se o comprimento, abertura máxima e profundidade.

Após 9 meses de envelhecimento foram retirados de exposição os elementos nº 88, 87 e 76 do grupo MP_{env} e os elementos nº 23, 42 e 33 do grupo TMP_{env} . Os 9 meses coincidiram com o mês de janeiro de 2018, pelo que os elementos apresentavam teor de água estimado próximo de 20%, bastante superior ao teor de água estimado dos elementos retirados de serviço aos 4 e 6 meses (próximo de 10%). Por este motivo, os elementos retirados de exposição aos 9 meses foram alvo de medição e posteriormente colocados em espaço climatizado para reduzir o teor de água para valores bastante inferiores. A análise externa foi conduzida novamente quando o teor de água dos elementos tomou valores inferiores a 13%. A Figura 4.10 e a Figura 4.11 apresentam os valores registados de delaminação externa pelas linhas de cola, nomeadamente o comprimento.

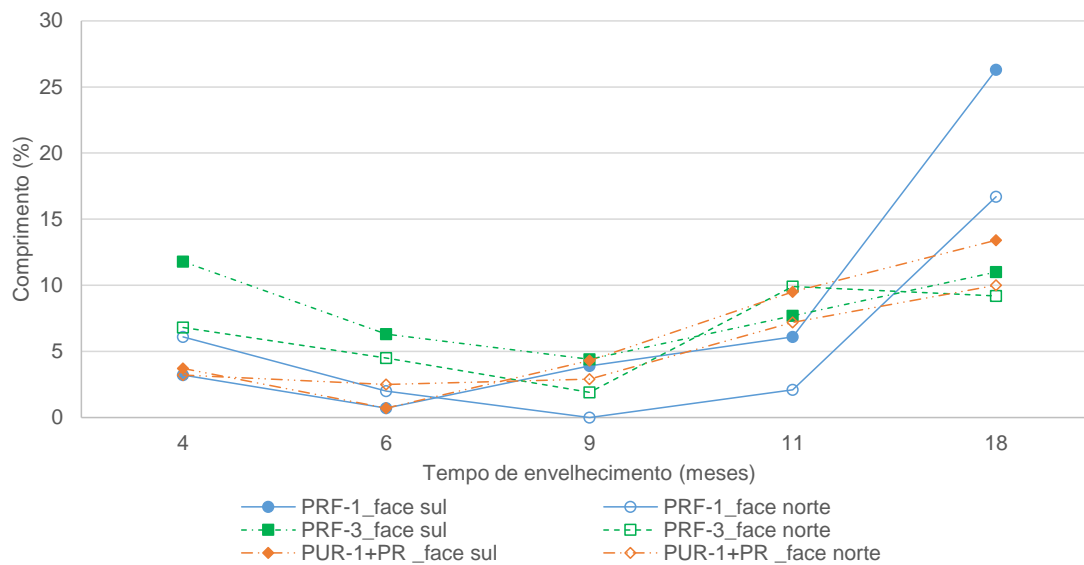


Figura 4.10 – Comprimento de delaminação registada nas faces sul e norte (percentagem do comprimento total) para os 3 tipos de cola – elementos MP_{env}

Da análise dos resultados verifica-se que, regra geral, a delaminação ocorrida na face sul foi superior à registada na face norte. Verifica-se também uma tendência para diminuição da delaminação entre os 4 e os 6 meses. Os valores mais baixos foram registados aos 9 meses. Contudo, os 9 meses coincidiram com o período de inverno, no final do qual o teor de água dos elementos se encontrava próximo de 20%, pelo que algumas delaminações não eram visíveis. Após 2 meses de secagem dos elementos em espaço climatizado mediram-se valores bastante superiores, apesar de alguns serem aparentemente inferiores aos registados após 4 meses de envelhecimento. Aos 4 e 6 meses de envelhecimento a cola PRF-3 apresentou valores de delaminação bastante superiores às restantes colas, verificando-se a após 9 meses de envelhecimento foi bastante idêntico nas 3 colas consideradas. A análise dos elementos aos 18 meses de envelhecimento demonstrou um comportamento idêntico entre as colas PUR-1+PR e PRF-3 (13,4% e 11,0% nas faces sul, respetivamente), e valores bastante superiores no elemento colado com PRF-1 (26,3% na face sul).

Não é possível fazer uma comparação direta com os resultados obtidos por Gaspar (2010), tendo em consideração os períodos de análise distintos, bem como as variáveis iniciais foram diferentes, nomeadamente o facto de os elementos da análise conduzida por Gaspar (2010) terem sido pintados após 1 mês de exposição. No entanto, aos 9 meses de envelhecimento (período de inverno), Gaspar (2010) registou o valor máximo de percentagem de comprimento de delaminação foi de aproximadamente 5% para provetes sem tratamento (Z20), ligeiramente superior aos valores máximos registados no presente trabalho, 4,4% para a cola PRF-3 (valores medidos no elemento com teor de água aproximado de 20%). A comparação dos valores obtidos por Gaspar (2010) após 15 meses

(aproximadamente 13%) com os valores do presente trabalho aos 18 meses revelou um desempenho melhor por parte dos elementos do presente trabalho, uma vez que apresenta percentagem de delaminação semelhante ou inferior nas colas PUR-1+PR (13,4%) e PRF-3 (11,0%) sem qualquer pintura. Contudo na cola PRF-1 registou-se um valor de 26,3%, bastante acima do apresentado por Gaspar (2010).

Foi também registada a abertura e profundidade máxima de cada delaminação, tendo-se registado valores máximos de abertura na ordem de 1 mm, excetuando o elemento PRF-1-80 (4M) que apresentou várias delaminações com abertura máxima média de 3,3 mm e valor máximo de 8,1 mm. A abertura máxima nos elementos PUR-1+PR não excedeu o valor de 1 mm.

Em relação à profundidade de delaminação, os valores máximos registados em geral não excederam os 11 mm nos elementos colados com PUR-1+PR. Nas restantes colas ocorreram situações isoladas em que a profundidade máxima atingiu os 18 mm (PRF-1 aos 9 meses após secagem do elemento) e os 30,2 mm (PRF-3 aos 4 meses).

Os resultados de percentagem de delaminação em relação ao comprimento total de linhas de cola dos elementos TMP_{env} são ilustrados na Figura 4.11.

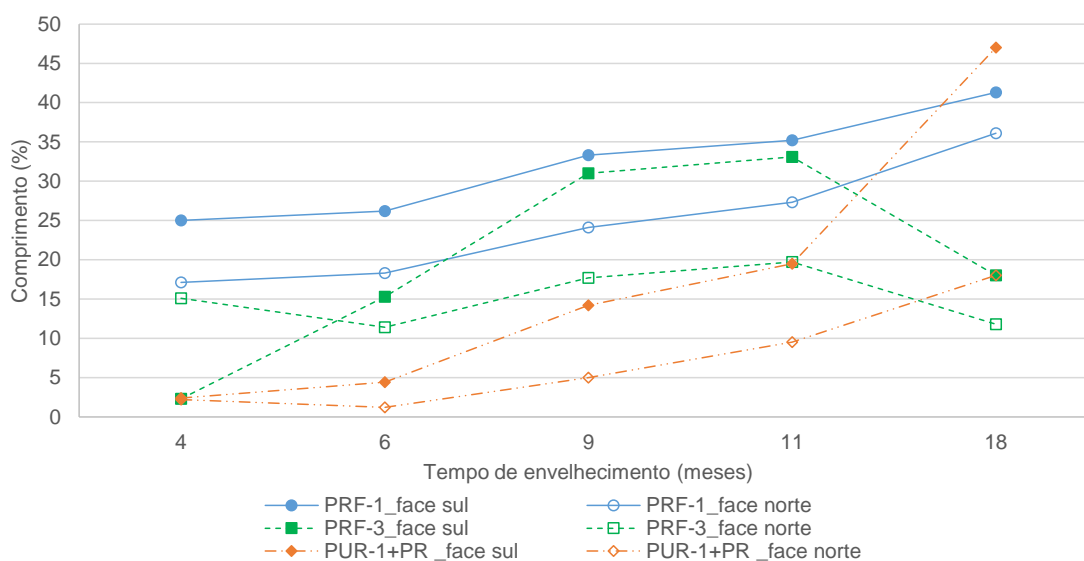


Figura 4.11 – Comprimento de delaminação registada nas faces sul e norte (percentagem do comprimento total) para os 3 tipos de cola – elementos TMP_{env}

Verifica-se da análise da delaminação ocorrida nos elementos de Pinho bravo com tratamento preservador que o desempenho das diferentes colas apresentava diferenças significativas ao longo de todo o período em análise. Note-se também a clara tendência para aumento dos valores com o aumento do período de envelhecimento. Como seria de

esperar, a delaminação ocorreu maioritariamente na face sul dos elementos, com exceção do elemento PRF-3_91 aos 4 meses de envelhecimento. É de realçar o excelente desempenho demonstrado pela cola PUR-1+PR durante os 6 meses de envelhecimento iniciais, apresentado ainda cerca de metade do comprimento de delaminação após 9 meses em relação às colas do tipo PRF em ambas as faces. No entanto, após 18 meses de exposição verificou-se um aumento significativo do comprimento de delaminação para valores de 47,0% na face sul, ligeiramente superior ao registado no elemento colado com a cola PRF-1. No elemento colado com cola PRF-3 registou-se um valor bastante inferior comparativamente às restantes colas em ambas as faces (18,0% e 11,8% na face sul e face norte, respetivamente). Verificou-se portanto uma inversão da tendência de aumento do comprimento da delaminação com o aumento do período de exposição.

A análise da secção transversal dos 3 elementos analisados aos 18 meses (Figura 4.12) permitiu concluir que o elemento colado com a cola PRF-3 apresentava menor área de secção transversal com retenção de produto preservador. Por outro lado, os elementos colados com as restantes colas apresentavam quase a totalidade da secção com retenção de produto preservador. Esta diferença terá sido certamente o principal motivo pelo qual ocorreu menor delaminação superficial no elemento nº 32 (PRF-3).

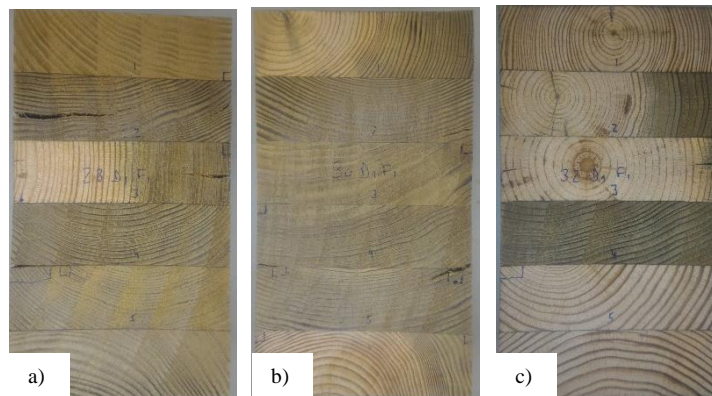


Figura 4.12 – Secção transversal dos provetes D1 recolhidos dos elementos TMP_{env} em exposição natural e retirados após 18 meses de envelhecimento: a) nº 28 – cola PRF-1, b) nº 30 – cola PUR-1 + PR e c) nº 32 – cola PRF-3

Os resultados do presente trabalho revelaram um desempenho melhor se comparados com os obtidos por Gaspar (2010). Em termos de percentagem de comprimento de delaminação os valores registados no presente trabalho após 18 meses de exposição (máximo de 47%) foram próximos aos obtidos por Gaspar (2010) (aproximadamente 50%). No entanto, os elementos do presente trabalho não foram alvo de pintura superficial.

Em relação à abertura das delaminações, não se registaram diferenças evidentes entre os elementos de diferentes colas apesar do ligeiro aumento geral para valores não superiores a 2,2 mm. A profundidade máxima registada foi, regra geral, superior à observada nos

elementos MP_{env} , não excedendo os 15 mm no caso das colas PUR-1+PR e PRF-3 (18 meses), salvo algumas situações de delaminação ocorrida nos topos. Nos elementos colados com cola PRF-1 a profundidade registada foi superior, tomando valor máximo de 30 mm (face norte).

4.5.2 Ensaios de delaminação

Após a avaliação externa dos elementos, foram extraídos de cada elemento provetes para avaliar a resistência e integridade da colagem, tal como descrito anteriormente no capítulo 3. Os provetes obtidos para ensaio de delaminação possuíam dimensões correspondentes à totalidade da seção transversal, de aproximadamente 104 mm x 180 mm x 75 mm (largura x altura x comprimento). Previamente ao ensaio foram contabilizadas as delaminações já existentes nas linhas de cola (resultantes do processo de envelhecimento natural) o que se traduziu na determinação da delaminação inicial. A exemplo do que foi realizado anteriormente, foi seguido o Método A, tendo-se avaliado a delaminação ocorrida após o 2º e 3º ciclos. No Quadro 4.4 e no Quadro 4.5 são apresentados os resultados relativos aos ensaios dos provetes obtidos dos elementos MP_{env} e TMP_{env} , respetivamente. São apresentados os valores de delaminação inicial, de delaminação total média de cada elemento e máxima para o conjunto de provetes de cada elemento e ainda os valores de massa volúmica média dos provetes e teor de água. No Anexo D do presente documento (Quadro D.1 a Quadro D.14) são apresentados os valores de delaminação de cada provete (inicial e após o 2º e 3º ciclos do Método A). São também apresentados os valores de teor de água e massa volúmica das lamelas constituintes de cada elemento.

Quadro 4.4 – Resumo da delaminação total média e máxima após envelhecimento natural – MP_{env}

Cola	Tempo de exposição (meses)	Massa volúmica (kg/m^3)	Teor de água (%)	Nº de provetes	Delaminação inicial (valor máximo)	Delaminação total média (valor máximo)	
						2º ciclo (%)	3º ciclo (%)
PRF-1	4	628	11,1	9	0,6 (1,9)	1,0 (2,5)	1,3 (2,5)
	6	638	11,0	9	0,0 (0,3)	0,4 (1,1)	0,5 (1,2)
	9	633	14,0	9	0,2 (0,5)	1,3 (2,1)	2,1 (4,0)
	18	643	10,8	9	3,7 (<u>5,8</u>)	1,1 (2,4)	1,8 (3,5)
PRF-3	4	656	10,7	9	0,9 (2,4)	1,9 (4,0)	3,0 (4,8)
	6	643	10,8	9	1,3 (2,9)	1,8 (3,3)	2,0 (4,3)
	9	637	13,4	9	1,1 (2,6)	1,7 (4,4)	2,0 (4,9)
	18	641	10,9	9	2,8 (<u>6,3</u>)	1,1 (3,0)	1,5 (3,2)
PUR-1+PR	4	617	10,5	9	0,2 (0,6)	2,3 (4,3)	2,5 (4,4)
	6	631	10,4	9	0,1 (0,3)	0,5 (1,2)	0,6 (1,3)
	9	657	13,4	9	0,2 (0,7)	1,3 (2,7)	1,6 (3,4)
	18	649	11,2	9	2,7 (<u>5,5</u>)	1,1 (1,9)	1,5 (2,2)

Nota: Valores sublinhados correspondem a situações em que se verificou apenas 1 provete com delaminação total inicial superior a 5%.

A análise dos valores de delaminação inicial apresenta valores residuais nos primeiros 9 meses de exposição seguindo-se de um aumento significativo aos 18 meses para valores médios inferiores a 5%. O valor médio superior foi registado no elemento colado com a cola PRF-1 em consonância com o valor superior de comprimento de delaminação superficial registado. Ainda assim, aos 18 meses de exposição 1 provete por elemento apresentou delaminação total ligeiramente acima de 5%. De referir que o limite de 5% foi adotado com base no limite estabelecido como máximo após o 2º ciclo de delaminação pelo Método A, não sendo do conhecimento do autor do presente trabalho a existência de um limite estabelecido pelo acervo normativo para valores de delaminação inicial após envelhecimento natural.

A análise dos resultados dos ensaios de delaminação realizados em provetes após envelhecimento demonstram que a qualidade de colagem dos elementos de Pinho bravo sem tratamento não foi afetada no interior dos elementos. Verificou-se no entanto, um ligeiro aumento dos valores médios em relação aos resultados apresentados no capítulo 3 (Quadro 3.10). Contudo, não se observou delaminação excessiva após ambos os ciclos de ensaio na totalidade dos provetes. A análise comparativa do desempenho das 3 colas demonstra que a cola PRF-3 apresenta tendencialmente valores médios superiores às restantes colas (análise até aos 9 meses de envelhecimento), o que corresponde ao apurado na apreciação das superfícies externas, registado na Figura 4.10.

Quadro 4.5 – Resumo da delaminação total média e máxima após envelhecimento natural – TMP_{env}

Cola	Tempo de exposição (meses)	Massa volúmica (kg/m^3)	Teor de água (%)	Nº de provetes	Delaminação inicial (valor máximo)	Delaminação total média (valor máximo)	
						2º ciclo (%)	3º ciclo (%)
PRF-1	4	648	9,9	9	5,4 (6,9)	6,9 (9,8)	7,9 (12,1)
	6	639	9,4	9	6,0 (8,3)	4,9 (8,2)	5,1 (8,7)
	9	639	12,6	9	4,9 (6,2)	3,5 (7,0)	5,1 (7,7)
	18	685	10,3	9	9,8 (14,2)	5,4 (9,7)	7,0 (12,3)
PRF-3	4	654	10,2	9	0,5 (1,4)	3,9 (7,6)	5,1 (8,5)
	6	656	10,0	9	2,0 (5,4)	4,1 (8,5)	5,6 (9,6)
	9	654	13,1	9	5,2 (7,7)	5,7 (12,2)	6,7 (12,6)
	18	679	9,8	9	2,0 (2,9)	4,1 (7,4)	5,3 (8,9)
PUR-1+PR	4	619	10,1	9	0,3 (1,3)	1,0 (3,6)	1,2 (4,1)
	6	639	9,9	9	0,3 (1,4)	1,6 (3,1)	1,9 (3,7)
	9	632	12,9	9	2,2 (3,2)	4,2 (7,4)	5,8 (9,8)
	18	658	11,1	9	8,1 (10,4)	4,3 (7,6)	6,2 (9,7)

Nota: Valores a vermelho correspondem a situações cuja média dos provetes excedeu o limite estabelecido pela EN 14080 (2013). Valores sublinhados correspondem a situações em que se verificou apenas 1 provete com delaminação total excessiva. Valores a negrito correspondem a situações em que se verificaram 2 ou mais provetes com delaminação total excessiva.

Da análise dos resultados do Quadro 4.5 é notório um desempenho menos adequado da cola PRF-1 em termos de delaminação inicial, o que vai de encontro ao comprimento de delaminação registada da análise superficial que foi superior na referida cola principalmente nos primeiros meses de envelhecimento. Os valores mais elevados de delaminação total inicial foram registados nos provetes recolhidos dos elementos após 18 meses, ocorrendo em alguns delaminação total superior a 10% (limite considerado para o 3º ciclo de delaminação pelo Método A).

A delaminação registada nos provetes obtidos dos elementos TMP_{env} após ensaio de delaminação foi superior à registada nos elementos MP_{env} , excetuando para o elemento colado com PUR-1+PR após 4 meses de envelhecimento. Registou-se delaminação total média superior a 5% após o 2º ciclo em três elementos (PRF-1 aos 4 e 18 meses e PRF-3 aos 9 meses) em diversos elementos houve mais que um provete com delaminação total superior a 5%. Contudo, após o 3º ciclo não se observou qualquer elemento com delaminação total média superior a 10%. Ainda assim, os três elementos que não cumpriram a delaminação total média após o 2º ciclo apresentaram 1 provete com delaminação superior a 10%. A tendência espectável de aumento de delaminação com o aumento do tempo de exposição não se verificou nos elementos colados com PRF-1 até aos 9 meses de envelhecimento, cuja tendência foi de decréscimo de delaminação. Em geral, os valores obtidos foram superiores quando comparados com os apresentados no capítulo 3 (Quadro 3.12).

4.5.3 Ensaios de resistência ao corte

Para além dos provetes para ensaio de delaminação foram também retirados dos elementos após envelhecimento, provetes para ensaio de resistência ao corte. De cada elemento foram recolhidas 9 seções com aproximadamente 50 mm de comprimento. As seções obtidas dos elementos após 4 e 6 meses de envelhecimento natural foram cortadas obtendo-se 18 provetes (13 provetes para ensaio de resistência ao corte pela linha de cola e 5 provetes para ensaio de resistência ao corte pela madeira). O mesmo processo foi aplicado às seções dos elementos colados com as colas PUR-1+PR e PRF-3 (MP_{env}) retirado após 9 meses de envelhecimento natural. No entanto, os restantes elementos retirados após 9 e 18 meses de envelhecimento natural apresentavam delaminação com maior profundidade, pelo que se optou pela obtenção de apenas 1 provete por secção. No total foram ensaiados 9 provetes (6 para ensaio de resistência ao corte pela linha de cola e 3 para ensaio de resistência ao corte pela madeira). Estes provetes foram recolhidos da parte central de cada seção, de modo a evitar a presença de linhas de cola reduzidas por efeito da delaminação ocorrida durante o envelhecimento.

Os resultados obtidos dos ensaios de resistência ao corte pela linha de cola e pela madeira são apresentados no Quadro 4.6 e Quadro 4.7 para os elementos MP_{env} e TMP_{env} , respetivamente. São apresentados os valores médios e desvio padrão de cada elemento e respetiva percentagem de rotura pela madeira no ensaio de resistência ao corte pela linha de cola, bem como a eficiência da linha de cola traduzida pela razão entre a resistência ao corte da linha de cola e a resistência ao corte da madeira.

Quadro 4.6 – Resumo da resistência ao corte e WFP das linhas de cola e resistência ao corte da pela madeira – MP_{env}

Quantidade de cola (g/m ²)	Tempo de exposição (meses)	Massa volúmica (kg/m ³)	Linha de cola			Madeira		Eficiência da linha de cola
			Nº de provetes	Resist. Corte (Desv. padrão) (MPa)	WFP (%)	Nº de provetes	Resist. Corte (Desv. padrão) (MPa)	
PRF-1	4	628	46	13,2 (2,1)	99	26	13,6 (1,6)	0,97
	6	638	61	14,3 (1,9)	97	29	14,3 (1,8)	1,00
	9	633	25	13,1 (1,0)	98	17	13,3 (1,5)	0,98
	18	643	30	13,0 (2,0)	95	18	15,2 (2,1)	0,86
PRF-3	4	656	57	13,7 (1,7)	95	30	13,9 (1,5)	0,98
	6	643	50	13,9 (1,7)	95	28	14,0 (1,2)	0,99
	9	637	54	13,1 (2,3)	94	24	13,3 (1,1)	0,99
	18	641	23	13,3 (2,7)	92	12	15,3 (2,7)	0,87
PUR-1+PR	4	617	47	13,0 (1,9)	99	25	14,8 (2,1)	0,88
	6	631	49	13,6 (2,3)	98	27	13,8 (1,9)	0,98
	9	657	49	14,1 (1,9)	96	26	15,7 (1,6)	0,90
	18	649	27	14,5 (1,4)	99	17	15,5 (2,0)	0,94

Quadro 4.7 – Resumo da resistência ao corte e WFP das linhas de cola e resistência ao corte da pela madeira – TMP_{env}

Quantidade de cola (g/m ²)	Tempo de exposição (meses)	Massa volúmica (kg/m ³)	Linha de cola			Madeira		Eficiência da linha de cola
			Nº de provetes	Resist. Corte (Desv. padrão) (MPa)	WFP (%)	Nº de provetes	Resist. Corte (Desv. padrão) (MPa)	
PRF-1	4	648	45	12,8 (1,9)	92	26	13,3 (2,0)	0,96
	6	639	54	12,6 (1,7)	92	22	12,9 (1,1)	0,98
	9	639	23	12,6 (2,5)	97	17	13,5 (2,5)	0,94
	18	685	30	13,0 (2,0)	95	18	15,2 (2,1)	0,86
PRF-3	4	654	49	13,0 (1,6)	97	25	14,0 (1,7)	0,93
	6	656	50	13,7 (1,8)	95	25	14,0 (1,7)	0,98
	9	654	20	13,2 (1,0)	89	17	12,9 (0,9)	1,03
	18	679	23	13,3 (2,7)	92	12	15,3 (2,7)	0,87
PUR-1+PR	4	619	46	11,7 (0,9)	99	23	12,0 (1,1)	0,97
	6	639	53	12,7 (1,6)	97	23	13,6 (1,8)	0,93
	9	632	29	11,7 (0,9)	97	15	12,1 (0,9)	0,97
	18	658	30	12,2 (1,4)	99	17	13,9 (2,7)	0,88

Dos resultados de resistência ao corte dos elementos MP_{env} (linha de cola e madeira) não se verifica uma tendência para decréscimo de valores com o incremento do número de meses de envelhecimento. Os valores obtidos são inclusive semelhantes aos registados no capítulo 3 em provetes sem envelhecimento (Quadro 3.8 e Quadro 3.9).

A análise dos resultados dos elementos TMP_{env} revela uma proximidade significativa com os valores registados nos elementos sem envelhecimento (Quadro 3.14). A análise comparativa do desempenho das diferentes colas não permite tirar conclusões absolutas no caso dos elementos MP_{env} . Para os elementos TMP_{env} os valores de resistência ao corte mais elevados foram obtidos para a cola PRF-3.

Os valores de WFP foram bastante elevados, entre 89% e 99%, verificando-se uma relação clara entre os valores mais baixos e a delaminação excessiva. Nos elementos MP_{env} a delaminação foi superior nos elementos colados com cola PRF-3 os quais apresentaram valores de WFP iguais ou inferiores 95%. Por sua vez, nos elementos TMP_{env} , registaram-se valores bastante inferiores de WFP, coincidentes com os elementos que apresentaram delaminação excessiva em mais do que 1 provete.

Os valores de eficiência da linha de cola (superiores a 0,88) indicam o bom desempenho da mesma em relação à resistência ao corte da madeira. De entre 950 ensaios realizados de resistência ao corte pela linha de cola, apenas 1 ensaio não cumpriu os limites individuais mínimos estabelecidos pela EN 14080 (2013) no que diz respeito ao valor de WFP.

4.6 Conclusões

No presente capítulo foi avaliado o desempenho da colagem de elementos de Pinho bravo sem tratamento (MP_{env}) e com tratamento preservador (TMP_{env}) após envelhecimento natural, ou seja, sujeitos à ação dos agentes atmosféricos (sol, chuva e vento). Para atingir o objetivo proposto foram colados 42 elementos com dimensões aproximadas de 105 mm x 180 mm x 1450 mm, com 3 referências de cola (PRF-1, PRF-3 e PUR-1+PR). O ensaio encontra-se ainda a decorrer, tendo sido avaliado o efeito do envelhecimento após 4, 6, 9 e 18 meses de exposição. Foram conduzidas duas análises distintas: i) avaliação da superfície dos elementos e ii) avaliação da qualidade de colagem através de ensaios de delaminação (Método A – EN 14080 (2013)) e ensaios de resistência ao corte.

Da análise do comportamento das linhas de cola ao longo do período de envelhecimento, verificou-se que nos elementos de Pinho bravo sem tratamento (MP_{env}) o desempenho até aos 9 meses é semelhante para todas as colas utilizadas. Aos 18 meses registou-se um aumento significativo do comprimento de delaminação superficial no elemento colado com cola PRF-1 em relação aos restantes elementos das colas PUR-1+PR e PRF-3.

O desempenho das linhas de cola foi menos eficiente nos elementos de Pinho bravo tratado (TMP_{env}) atingindo percentagem de comprimento total de delaminação de 41% na cola PRF-1 (face sul) e de 47% na cola PUR-1+PR (face sul). Ainda assim, foi evidente a menor ocorrência de delaminação na face norte em relação à face sul. Verificou-se também o melhor desempenho por parte da cola PUR-1+PR que apresentou percentagem de delaminação bastante inferior em relação às restantes colas (até aos 9 meses de envelhecimento), sendo que a profundidade das mesmas também foi bastante menor.

O desempenho dos elementos MP_{env} avaliado em termos da resistência à delaminação pelo Método A foi bastante positivo, uma vez que não foram registados provetes com delaminação excessiva. A cola PRF-3 apresentou valores ligeiramente superiores às restantes colas. Nos elementos MP_{env} não foi verificada qualquer tendência de evolução da delaminação com o aumento do tempo de envelhecimento até aos 9 meses, registando-se um aumento significativo aos 18 meses.

No que diz respeito aos elementos TMP_{env} registaram-se valores médios de delaminação total superiores a 5% após o 2º ciclo, com diversos provetes isolados a apresentarem também delaminação excessiva, mesmo nos elementos cuja delaminação média foi inferior a 5%. Após o 3º ciclo não se registaram valores médios com delaminação total superior a 10%. Foi evidente o melhor desempenho obtido até aos 9 meses por parte das colas PUR-1+PR, tal como a tendência para aumento da delaminação total com o incremento do tempo de envelhecimento. Aos 18 meses os valores médios de delaminação total após o 3º ciclo não diferiram significativamente entre as 3 colas.

Em relação aos resultados dos ensaios de resistência ao corte, não se registaram diferenças significativas em relação aos valores obtidos no capítulo 3 (provetes sem envelhecimento). No entanto, foi clara a relação entre a ocorrência de delaminação excessiva e os valores inferiores de percentagem de rotura pela madeira.

Em suma, a aplicação de elementos de Pinho bravo sem tratamento preservador em condições exteriores apresentou um desempenho bastante aceitável, sendo recomendada a utilização de colas PUR-1+PR ou PRF-3. Por outro lado, a utilização de Pinho bravo com tratamento preservador por impregnação revelou um desempenho de certo modo inadequado tendo em conta o comprimento de delaminação externa ocorrida. Ainda assim, é recomendável a aplicação de pintura superficial em ambas as condições pois melhora o desempenho em termos de delaminação e também ao nível estético, evitando mudança de cor da madeira.

5 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE MADEIRA LAMELADA COLADA

5.1 Introdução

O dimensionamento de estruturas de madeira deve obedecer aos critérios estabelecidos no Eurocódigo 5, Parte 1-1 (2003), tendo como base as propriedades mecânicas das respectivas classes de resistência definidas na EN 338 (2003) e EN 14080 (2013) para madeira serrada maciça e madeira lamelada colada, respetivamente. Contudo, uma das debilidades do uso de produtos de madeira está associada à elevada variabilidade das propriedades mecânicas, relacionadas com as características de crescimento. A caracterização de elementos estruturais requer a definição de várias propriedades, de entre as quais se destacam a massa volúmica, o módulo de elasticidade e a resistência à flexão.

Contudo, a determinação das propriedades referidas, em particular a resistência à flexão, requer a rotura do elemento eliminando a possibilidade de ser utilizado para a finalidade pretendida. Nas últimas décadas têm surgido vários métodos não destrutivos que permitem estimar algumas propriedades mecânicas com elevado rigor e precisão, através de correlações entre propriedades.

No presente capítulo é descrito o processo de caracterização mecânica à flexão de vigas de madeira lamelada colada. É igualmente descrito o processo de caracterização não destrutiva da matéria-prima (tábuas) e das vigas fabricadas, sendo ainda apresentados métodos analíticos disponíveis na literatura para predição do módulo de elasticidade estático. Após a caracterização experimental é descrito o processo de avaliação da qualidade de colagem de cada viga, bem como a análise estatística dos resultados obtidos sendo ainda apresentado o resumo das principais conclusões.

De seguida são apresentados estudos anteriores relacionados com o tema em análise, os quais tiveram como objetivo sustentar o potencial dos processos adotados adiante e a necessidade de implementar os mesmos às espécies predominantes da floresta nacional, nomeadamente o Pinheiro bravo, o Eucalipto e também ao Choupo cuja disponibilidade em serração é cada vez mais frequente.

5.2 Estado da Arte

5.2.1 Uso de métodos não destrutivos na predição de propriedades mecânicas

A caracterização não destrutiva consiste na identificação de propriedades físicas e mecânicas de um elemento, sem que a sua condição de uso seja alterada. Segundo Ross e Pellerin (1994) a hipótese fundamental da caracterização não destrutiva foi desenvolvida por Jayne em 1959, com o pressuposto de que a energia armazenada e as propriedades de dissipação da madeira podem ser medidas por meios não destrutivos. Ainda segundo Ross e Pellerin (1994), o desenvolvimento de métodos não destrutivos teve como objetivo a triagem e caracterização de elementos estruturais após produção. Tendo em conta os excelentes resultados, registou-se posteriormente a crescente utilização na avaliação de elementos estruturais *in situ*.

A diversidade de métodos de caracterização não destrutiva é vasta, diferenciando-se pelo processo de determinação das propriedades que posteriormente são correlacionadas com as propriedades mecânicas. A caracterização visual surgiu com a necessidade de impor classes de qualidade na produção de elementos estruturais de madeira. Tem como âmbito de aplicação a avaliação de características físicas, tais como: i) nós, ii) taxa de crescimento, iii) empenos, e iv) fissuras. Contudo, a caracterização visual apresenta diversas limitações, desde logo, o facto de depender da experiência do técnico que a realiza, podendo gerar ambiguidade nos resultados. É igualmente um processo moroso e que não permite a determinação quantitativa de parâmetros com elevado rigor e capazes de gerar coeficientes de correlação elevados com as propriedades mecânicas como é o caso da massa volúmica e módulo de elasticidade. Para além de que regra geral, os valores de coeficientes de correlação obtidos via caracterização visual com as propriedades mecânicas são reduzidos (0,4 a 0,5) como constatou Vries (1998).

Nas últimas décadas surgiram com o avanço da tecnologia diversos métodos de avaliação não destrutiva, com base na indução de esforços mecânicos nos elementos sem afetar a sua integridade estrutural, conduzindo assim à obtenção de coeficientes de variação bastante mais reduzidos que os obtidos da caracterização visual. Machado (2000) reporta valores na ordem dos 11% para a espécie Pinho bravo. Do conjunto de métodos de caracterização não destrutiva destacam-se os ultrassons e a vibração (transversal e longitudinal). Os métodos com base nos ultrassons consistem na medição das propriedades de ondas emitidas por um equipamento externo e que se propagam na madeira, podendo ser divididos em campo ultrassónico e campo sonoro. No campo ultrassónico, é registado o tempo que a onda leva a percorrer entre o transdutor emissor e o transdutor recetor, que podem ser colocados em faces opostas (método direto) ou na mesma face do elemento (método indireto). Pela razão entre a distância entre transdutores e o tempo que a onda leva a percorrer é determinada a

velocidade de propagação da onda. A determinação do módulo de elasticidade dinâmico por via de ultrassons (E_{dyn_us}) segue a Equação 5.1.

$$E_{dyn_us} = C^2 \rho \quad (5.1)$$

Onde C é a velocidade de propagação da onda obtida da razão entre o tempo de propagação e a distância percorrida e ρ é a massa volúmica do elemento.

O método de ultrassons com base no campo ultrassónico foi aplicado por vários autores para estabelecer correlações entre os parâmetros medidos (velocidade e/ou módulo de elasticidade dinâmico) e as propriedades mecânicas mais relevantes (módulo de elasticidade estático e resistência à flexão). Machado (2000) refere para o Pinho bravo coeficientes de correlação de 0,59 e 0,62 entre o quadrado da velocidade (C^2) e o módulo de elasticidade consoante a frequência do transdutor utilizada. Por sua vez, Morgado et al. (2016) apresentam coeficientes de correlação para o Pinho bravo (toros) de 0,61 e 0,82 para módulo de elasticidade e 0,74 e 0,80 para resistência à flexão. Candian e Sales (2009) e Srpcic et al. (2010) obtiveram coeficientes de correlação de 0,87 entre módulo de elasticidade dinâmico e estático para madeira serrada das espécies Eucalipto (*Eucalyptus citriodora*) e Espruce (*Picea abies*), respetivamente. Por sua vez, Srpcic et al. (2010) obteve coeficiente de correlação de 0,64 para com a resistência à flexão. Este método foi também utilizado na predição de propriedades de toros e postes em diversas espécies e por vários autores que reportaram valores de coeficiente de correlação entre 0,76 e 0,82 para o módulo de elasticidade (Grippa et al., 2010 e Prieto et al., 2007) e 0,54 a 0,62 para a resistência à flexão (Ranta-Maunus, 1999 e Carreira et al., 2006).

O emprego do método de ultrassons no campo sonoro difere do campo ultrassónico pela gama de frequências que são mais baixas no campo sonoro. Difere também no modo de aplicação das ondas que, regra geral, são emitidas através de um impacto exterior (tipicamente através de um martelo) num topo da peça, propagando-se à velocidade do som através do material até atingir a extremidade oposta, sendo refletida regressando à extremidade onde foi emitida. Wang et al. (2001) adotaram o método em amostras de toros e obtiveram coeficientes de correlação de 0,77 e 0,87 entre módulo de elasticidade dinâmico e estático para as espécies Red pine (*Pinus resinosa* Ait.) e Jack pine (*Pinus banksiana* Lamb.), respetivamente.

Os métodos associados à aplicação de vibração a um elemento permitem determinar a frequência natural de vibração do mesmo, que por sua vez se encontra relacionada com a rigidez do material. A vibração pode ser induzida através de um impacto transversal e longitudinal com recurso a um martelo ou equipamento semelhante. A escolha pela direção em que o impacto é induzido encontra-se relacionada com limitações ao nível da

acessibilidade aos topos do elemento a caracterizar. Wang et al. (2008) obtiveram coeficientes de correlação por via de vibração transversal entre 0,86 e 0,90 para diversas espécies.

A vibração longitudinal consiste na reprodução da vibração induzida na direção longitudinal do elemento. A determinação do módulo de elasticidade dinâmico por via da vibração longitudinal (E_{dyn_vl}) segue a Equação 5.2, obtida a partir da equação de vibração livre definida em Clough e Penzien (1993), que considera o elemento com extremidades livres e com massa volúmica e módulo de elasticidade constantes.

$$E_{dyn_vl} = 4L^2 f_r^2 \rho \quad (5.2)$$

Em que L é o comprimento, f_r é a frequência de vibração e ρ é a massa volúmica do elemento.

A aplicação deste método encontra-se bem difundida, existindo diversos estudos que relatam coeficientes de correlação elevados para madeira serrada e toros. Srpčić et al. (2010) referem coeficiente de correlação de 0,90 para o módulo de elasticidade e 0,72 para a resistência à flexão, com base numa amostra de madeira serrada de Espruce. Morgado et al., (2009, 2016) referem valores entre 0,60 e 0,82 para o módulo de elasticidade estático e entre 0,72 e 0,77 para a resistência à flexão de toros de Pinho bravo.

A aplicação do método de vibração longitudinal foi igualmente considerada por Hodousek et al. (2017) em madeira serrada de Choupo ($78 \times 77 \times 2494 \text{ mm}^3$), tendo obtido o valor de 0,90 para o coeficiente de correlação entre módulo de elasticidade dinâmico e estático. O mesmo método foi adotado por Martins (2015) em madeira serrada de Eucalipto (*Eucalyptus globulus*), tendo registado o valor de 0,94 para coeficiente de correlação com o módulo de elasticidade estático e 0,59 com a resistência à flexão.

Casado et al. (2012) realizaram um estudo com Choupo (*Populus x euramericana*), mais precisamente o clone I 214. Foram realizados ensaios por método de ultrassons e vibração longitudinal e posterior determinação das propriedades mecânicas (módulo de elasticidade e resistência à flexão) por via de ensaios de flexão estática de acordo com a EN 408 (2012). Dos resultados obtidos os autores obtiveram valores médios idênticos de módulo de elasticidade para o método de vibração longitudinal (7363 MPa) e flexão estática (7044 MPa). Por via de ultrassons o valor médio de módulo de elasticidade dinâmico foi 44,5% superior ao obtido por via de ensaio de flexão estática. Da relação entre módulo de elasticidade estático e determinado por via de métodos não destrutivos os autores obtiveram coeficientes de correlação entre 0,71 e 0,74.

A utilização de métodos não destrutivos tem sido também considerada em estudos relativos às propriedades de madeira lamelada colada. Kandler et al. (2015) realizaram um estudo em que o método da vibração longitudinal foi aplicado em 350 lamelas de Espruce norueguês. O método foi também aplicado nas 50 vigas produzidas (5 tipologias diferentes) antes de realizados os ensaios de flexão estática de 4 pontos para determinação do módulo de elasticidade. Os autores obtiveram um coeficiente de correlação entre propriedades de 0,95 considerando a globalidade das 50 vigas. Contudo, individualizando os resultados por tipologia de viga, os valores variaram entre 0,55 e 0,95 com valor médio de 0,78. Do estudo conduzido, os autores registaram também que o coeficiente de variação diminuiu com o aumento do número de lamelas e que o valor médio de módulo de elasticidade dinâmico das lamelas não diferiu significativamente do valor obtido pelas vigas.

Em Kandler et al. (2018) são apresentados os dados relativos à resistência à flexão das 50 vigas descritas em Kandler et al. (2015). De entre as várias correlações estabelecidas entre a resistência à flexão e outras propriedades determinadas experimentalmente, o melhor resultado foi obtido considerando o valor de módulo de elasticidade dinâmico aplicado às vigas, com coeficiente de correlação de 0,69.

5.2.2 Métodos analíticos para predição de propriedades mecânicas de vigas de madeira lamelada colada

A predição das propriedades mecânicas (módulo de elasticidade e resistência à flexão) desempenham um papel importante na caracterização de madeira para uso estrutural, como é o caso da MLC. Apesar do bom desempenho demonstrado pelos métodos não destrutivos na caracterização de madeira serrada, o seu uso em MLC não tem sido usual. Por outro lado, no processo de predição das propriedades mecânicas de MLC, vários autores têm considerado outras alternativas como são o caso de métodos analíticos. Na literatura, existem diversos métodos analíticos disponíveis, tais como: i) método empírico I_K/I_G (ITM); ii) método baseado na teoria da viga de Timoshenko (TIMO); iii) método gama (anexo B do EC5 (2003)); iv) método da secção transformada (TSM), entre outros que se estabelecem com base nas relações entre propriedades experimentais de estudos específicos.

O método ITM foi desenvolvido em 1954 e permite a determinação das tensões de flexão de MLC através da aplicação de fatores de redução de propriedades para cada classe de madeira. Segundo Williamson e Yeh (2007) a norma ASTM D 3737 (2005) é ela própria um modelo analítico baseado no método “ I_K/I_G ”. Além da determinação da resistência à flexão, outras propriedades mecânicas como o módulo de elasticidade, corte e compressão paralela e perpendicular às fibras, podem ser determinadas quando a distribuição das classes das lamelas está definida. De acordo com Lee et al. (2005) o método “ I_K/I_G ”

contempla a redução da resistência devido à presença de nós como função dos seus momentos de inércia.

A aplicação deste método empírico em contexto europeu, nomeadamente em Portugal, não se antevê de fácil aplicação devido à ausência de valores tabelados das características dos nós para as principais espécies resinosas europeias como é exemplo o Pinho bravo.

O método baseado na teoria da viga de Timoshenko é um método com aplicação usual na análise de tensões e rigidez de elementos de madeira lamelada cruzada (Santos, 2012). O método requer para predição do módulo de elasticidade (E_{dyn_TIMO}) dos elementos o conhecimento das características associadas à matéria-prima, nomeadamente a secção transversal e o módulo de elasticidade das tábuas. A sua aplicação segue as Equações 5.3, 5.4 e 5.5.

$$n = \frac{\sum_{i=1}^n Sx'_i E_i}{\sum_{i=1}^n A_i E_i} \quad (5.3)$$

$$J_x = \sum_{i=1}^n E_i \int_{A_i} y^2 dA_i = \sum_{i=1}^n E_i I_{xi} \quad (5.4)$$

$$E_{dyn_TIMO} = J_x / \sum_{i=1}^n I_{xi} \quad (5.5)$$

Onde, n é o eixo neutro da secção, Sx'_i é o momento estático da secção transversal da lamela i segundo o eixo x , E_i é o módulo de elasticidade da lamela i , A_i é o módulo de elasticidade da lamela i , J_x é o momento de inércia ponderado em relação ao eixo x , y é a distância do eixo da lamela i ao eixo neutro da secção, I_{xi} é o momento de inércia da secção transversal da lamela i em relação ao eixo x .

Outro método disponível é o método gama, descrito no EC5 (2003) como um método de dimensionamento de estruturas com combinação de materiais de diferentes propriedades, de entre as quais se destacam a combinação madeira-betão. Ambos os métodos (Timoshenko e Gama) permitem através de algumas simplificações determinar com alguma confiança o módulo de elasticidade de vigas de madeira lamelada colada. Santos (2017) realizou um estudo em 9 vigas de MLC de Choupo em que constatou a semelhança de valores obtidos entre ambos os métodos e também a excelente correlação obtida com o módulo de elasticidade estático, através de coeficiente de correlação de 0,98.

O método da secção transformada (TSM) é referido por Lee et al. (2005), e consiste na transformação da secção transversal compósita de uma viga de MLC numa secção transversal com propriedades homogêneas, de modo que as fórmulas da teoria elástica para vigas possam ser utilizadas. A aplicação do método TSM é descrita no Anexo 4 da norma ASTM D 3737 (2005) e a determinação do módulo de elasticidade (E_{dyn_TSM}) da seção de MLC segue as Equações 5.6 e 5.7. À semelhança do método “ I_K/I_G ”, a previsão da resistência à flexão de vigas de MLC requer a existência de dados relativos aos nós, rigidez e resistência das lamelas constituintes de cada viga. No estudo conduzido por Lee et al. (2005) foram ensaiadas 60 vigas produzidas a partir de Larício do Japão. Os autores reportaram coeficientes de correlação de 0,91 para o módulo de elasticidade e 0,71 para a resistência à flexão.

$$T_i = \frac{(E_1 d_1^3 - d_2^3(E_1 - E_2) - d_3^3(E_2 - E_3))}{E_1 d_1^3} \quad (5.6)$$

$$E_{dyn_TSM} = E_1 T_i \quad (5.7)$$

Onde T_i é o fator de transformação da seção, E_1 , E_2 e E_3 são a média do módulo de elasticidade dinâmico das lamelas de cada zona de rigidez, d_1 , d_2 e d_3 são a profundidade de cada zona de rigidez.

Nas últimas décadas, diversos estudos têm sido realizados com vista a avaliar o uso de relações empíricas para previsão da resistência à flexão dos elementos de MLC, nomeadamente a partir da resistência à tração das lamelas e *finger-joints* (Frese e Blass, 2009).

Como exemplo pode ser referido o estudo conduzido por Gao et al. (2015) que realizaram a análise numérica das propriedades de flexão de 10 vigas de MLC produzidas com Choupo chinês com dimensões 60 x 120 x 3000 mm³ (largura x altura x comprimento) e 10 vigas de Douglas fir. Para a predição do módulo de elasticidade das vigas, Gao et al. (2015) consideraram o teorema dos eixos paralelos da mecânica dos materiais, tendo obtido valores significativos de erro absoluto (2,9% a 24,4%). Para a predição da resistência à flexão os autores consideraram 3 equações. A Equação 5.8 apresentada na EN 1194 (1999) foi obtida a partir de um vasto conjunto de ensaios para determinação da resistência à flexão das vigas de MLC e a resistência à tração das lamelas usadas. A Equação 5.9 reflete a relação obtida por Gao et al. (2015) com base na resistência à flexão das vigas e tração das lamelas usadas no estudo. É indicado um coeficiente de correlação de 0,77 entre propriedades. Por último os autores referem uma equação desenvolvida com base na equação derivada do teorema dos eixos paralelos (Equação 5.10). Neste caso, é necessário o conhecimento da extensão de rotura das classes resistentes usadas no fabrico das vigas.

$$f_{b,gl,k} = 7,35 + 1,12f_{t,lam,k} \quad (5.8)$$

$$f_{b,gl,k} = 2,22f_{t,lam,k} - 13,68 \quad (5.9)$$

$$\sigma = \varepsilon \times \frac{1}{I} \sum_{j=1}^n E_j [I_j + A_j(d_j)^2] \quad (5.10)$$

Onde $f_{b,gl,k}$ é o valor característico da resistência à flexão da viga de MLC, $f_{t,lam,k}$ é o valor característico da resistência à tração da madeira, σ é a tensão resistente à flexão, ε é a extensão do material, E_j é o módulo de elasticidade da lamela j , I_j é o momento de inércia da lamela j , A_j é a área da secção da lamela j , d_j é a distância entre a lamela j e o eixo da secção transversal.

Das 3 equações apresentadas, Gao et al. (2015) obtiveram erros médios de -28,0% pela Equação 5.8, melhorando os resultados para valores entre -23,0% e 7,7% pela Equação 5.10. O erro na determinação da resistência à flexão das vigas através da Equação 5.9 variou entre -1,8% e 1,5%, refletindo um excelente desempenho da mesma e demonstrando a importância de estabelecer relações específicas para cada espécie.

Nakamura e Fujita (2011) realizaram um estudo com o objetivo de desenvolver um método de simulação capaz de gerar a resistência de madeira lamelada colada através de propriedades aleatórias correlacionadas. Para tal realizaram ensaios experimentais em lamelas só com um finger-joint, de modo a obter os valores de módulo de elasticidade e resistência à compressão, resistência à tração e resistência à flexão. Posteriormente determinaram os coeficientes de correlação entre as propriedades determinadas. O método de simulação consistiu em 4 passos, tendo no início aplicado uma simulação gerada pelo método *Mersenne twister* e terminando com a aplicação da transformação *Rosenblatt*. Os valores de coeficientes de correlação obtidos pela simulação foram muito próximos aos obtidos experimentalmente. Por fim, os autores efetuaram a validação do método através do ensaio experimental de 24 vigas subdivididas em 4 configurações, combinando as espécies Douglas-fir e Sugi, tendo realizado ensaios de flexão, compressão e tração. Foi realizada também por via do método de simulação a geração de 500 vigas virtuais, tendo concluído os autores que os valores experimentais se situaram na mesma faixa da simulação realizada, exceto para os valores de resistência à compressão em 2 das configurações de viga.

5.3 Caracterização da matéria-prima

Nesta fase do trabalho cada amostra foi caracterizada tal como descrito anteriormente em 3.2.2 (Capítulo 3). As medições realizadas permitiram determinar os valores médios das seguintes grandezas: i) largura, ii) espessura, iii) comprimento, iv) massa e v) teor de água. Seguidamente foram realizados os ensaios de caracterização não destrutiva através do método de vibração longitudinal com recurso ao *Machine Timber Grader* (MTG) como se pode visualizar na Figura 5.1. Os ensaios foram realizados com os topos das tábuas/lamelas apoiados em chapas de aço, com uma lâmina de neoprene entre a viga e a chapa de aço para minimizar o atenuar das ondas de vibração atuantes.

O método de vibração longitudinal foi escolhido tendo em conta a disponibilidade do equipamento para realização de ensaios e tendo em consideração os excelentes resultados demonstrados pelo equipamento na predição das propriedades mecânicas de madeira serrada, em particular no Pinho bravo (Balsa, 2013), Choupo (Hodousek et al., 2017) e Eucalipto (Martins, 2015).



Figura 5.1 – Utilização do *Timber Grader* MTG na caracterização mecânica não destrutiva

5.3.1 Pinheiro bravo sem tratamento

A amostra de Pinho bravo compreendeu um total de 52 tábuas. No momento da receção da amostra foram realizadas as medições tendo-se registado as dimensões médias de 40 x 123 x 2945 mm³ (espessura x largura x comprimento). Em relação à massa volúmica foi registado um valor médio e desvio padrão de 630,4±63,1 kg/m³ com os valores a variarem entre 525,9 kg/m³ e 805,5 kg/m³.

A medição dos teores de água através de higrómetro de agulhas resultou num valor médio de 16,0%, com o valor mínimo e máximo de 13,8% e 18,2%. Após as medições para caracterização da amostra, esta foi mantida em espaço climatizado (20±2°C de temperatura e 65±5% de humidade relativa) até ser utilizada no fabrico das respetivas vigas, permitindo uma ligeira redução do teor de água da amostra para valores médios de 15,6% com valor

máximo de 17,5%. De referir no entanto que 31% da amostra apresentava teor de água entre 15% e 16% e 40% da amostra apresentava teor de água acima de 16%. Adiante será analisada a influência do teor de água na qualidade de colagem das vigas de madeira lamelada colada.

A caracterização não destrutiva da amostra consistiu na determinação do módulo de elasticidade dinâmico de cada tábuas ($E_{dyn,t}$). Como dados de entrada no equipamento foram consideradas as características físicas previamente medidas para cada tábuas: i) espessura, ii) largura, iii) comprimento, iv) massa e v) teor de água. Das 52 tábuas da amostra obteve-se um valor médio de 12032 MPa. Os valores mínimo e máximo foram de 7821 MPa e 16091 MPa. Imediatamente antes da realização das colagens e já com as dimensões finais (100 mm de largura e 24 mm de espessura), cada lamela foi novamente alvo de medições e ensaios de caracterização não destrutiva ($E_{dyn,l}$). Da caracterização não destrutiva das lamelas resultou um valor médio de 11894 MPa (6678 MPa – 16091 MPa).

A Figura 5.2 ilustra a distribuição de frequências de módulo de elasticidade dinâmico medido na amostra de Pinho bravo sem tratamento.

5.3.2 Choupo

A amostra de Choupo considerada nesta fase do trabalho consistiu em 132 tábuas, com as seguintes dimensões médias: 39 x 117 x 2575 mm³ (espessura x largura x comprimento). A massa volúmica média e desvio padrão foram de 427,0±49,3 kg/m³ com valor mínimo e máximo de 313,1 kg/m³ e 548,4 kg/m³. O teor de água médio da amostra foi de 17,3% com valor mínimo e máximo de 11,0% e 60,6%. A exemplo do que sucedeu com a amostra de Pinho bravo sem tratamento, também a amostra de Choupo foi mantida em espaço climatizado até ser utilizada para as colagens das vigas. O teor de água médio das lamelas aquando da produção das vigas foi de 15,8% (10,3% - 26,8%). Adiante será analisada a influência do teor de água na qualidade de colagem das vigas.

A caracterização não destrutiva da amostra decorreu, numa primeira fase, com as dimensões de cada tábuas, e posteriormente com as dimensões finais de cada lamela. O valor médio de $E_{dyn,t}$ foi de 10361 MPa, com valor mínimo e máximo de 7079 MPa e 15454 MPa. Relativamente aos valores de $E_{dyn,l}$, o valor médio foi de 9907 MPa com valor mínimo e máximo de 7000 MPa e 14657 MPa. A distribuição de frequências dos valores de módulo de elasticidade dinâmicos ($E_{dyn,t}$ e $E_{dyn,l}$) é apresentada na Figura 5.2.

De referir que o *software* considerado na caracterização não destrutiva (*Timber Grader MTG*) apresenta limitações ao nível das massas volúmicas, sendo o limite de massa volúmica compreendido entre 400 kg/m³ e 1600 kg/m³ para espécies folhosas, como é o

caso do Choupo. Tendo em conta esta limitação do equipamento, para as massas volúmicas das tábuas/lamelas inferiores a 400 kg/m^3 , foi adotado o valor de massa correspondente à massa volúmica de 410 kg/m^3 . Posteriormente o valor de módulo de elasticidade dinâmico obtido foi corrigido de acordo com a Equação 5.11.

$$E_{dyn_t} = \frac{\rho}{410} \times E_{dyn_410} \quad (5.11)$$

Em que E_{dyn_t} é o módulo de elasticidade dinâmico da tábua, ρ , é a massa volúmica obtida das medições realizadas em cada tábua/lamela e E_{dyn_410} , é o módulo de elasticidade obtido para a massa volúmica adoptada de 410 kg/m^3 .

5.3.3 Eucalipto

A amostra de Eucalipto era constituída por 26 tábuas, tendo-se repetido o processo anteriormente descrito para as amostras de Pinho bravo e Choupo. As dimensões médias da amostra eram $36 \times 124 \times 2481 \text{ mm}^3$ (espessura x largura x comprimento). A massa volúmica média e desvio padrão foi de $924,8 \pm 74,6 \text{ kg/m}^3$ com valor mínimo e máximo de $823,5 \text{ kg/m}^3$ e $1099,0 \text{ kg/m}^3$. O teor de água das tábuas aquando da receção das mesmas em laboratório variou entre 12,9% e 16,2%, com valor médio de 14,2%. Mais tarde aquando do fabrico das vigas o teor de água registado variou entre 13,7 e 15,6% com valor médio de 14,4%. 3 das 26 tábuas apresentaram teor de água medido pelo higrómetro acima de 15%.

Da caracterização não destrutiva nas tábuas resultou um valor médio de módulo de elasticidade dinâmico (E_{dyn_t}) de 20456 MPa com valor mínimo e máximo de 14257 MPa e 24178 MPa. Por outro lado, o valor médio registado de E_{dyn_1} foi de 21793 MPa (14965 MPa – 26536 MPa). A Figura 5.2 apresenta a distribuição de frequências do módulo de elasticidade dinâmico para a amostra de Eucalipto.

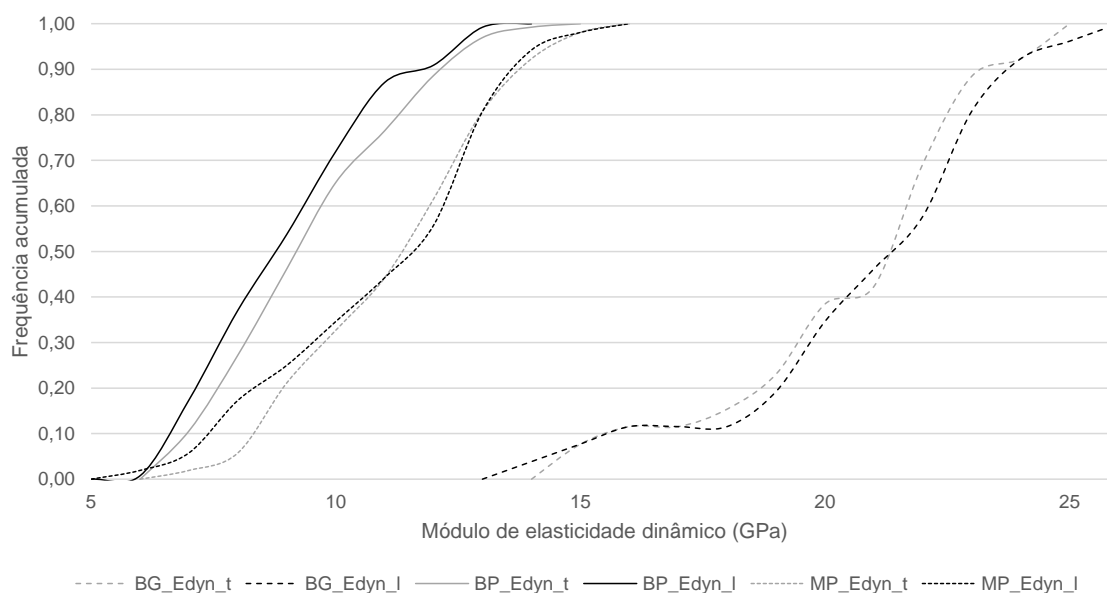


Figura 5.2 – Distribuição cumulativa para o módulo de elasticidade dinâmico (tábuas e lamelas) do Pinho bravo, Choupo e Eucalipto

5.4 Fabrico das vigas de madeira lamelada colada

5.4.1 Definição da amostra e secção transversal dos elementos

No presente trabalho procurou-se avaliar o desempenho mecânico de vigas coladas com uma só espécie, bem como a combinação de duas espécies na mesma viga, nomeadamente: i) combinação de Pinheiro bravo com Choupo, e ii) Eucalipto com Choupo.

As dimensões das vigas foram definidas tendo em conta os aspetos relacionados com a espessura adequada para colagem de face e o comprimento mínimo das tábuas. Tendo em consideração os bons resultados obtidos previamente na colagem de face de Choupo (ver 3.4.5), foi considerada a espessura de 24 mm. Relativamente ao comprimento das vigas foi adotado o valor mínimo de 2290 mm, limitado pelo comprimento mínimo das tábuas de Choupo.

Tendo em conta o comprimento e espessura das lamelas referidos e tendo em vista a determinação das propriedades mecânicas à flexão segundo a EN 408 (2012), foram usadas 5 lamelas na composição de cada viga (altura total da secção de 120 mm). Deste modo, foi possível cumprir o requisito da referida norma no que respeita ao comprimento mínimo do elemento estrutural a caracterizar (19 vezes a altura).

No presente trabalho foram produzidas em laboratório 42 vigas de madeira lamelada colada, distribuídas do seguinte modo: i) 7 vigas de Pinho bravo sem tratamento (MP); ii)

21 vigas de Choupo (BP); iii) 4 vigas de Eucalipto (BG); iv) 7 vigas mistas de Pinho bravo e Choupo (HMPBP-1 e HMPBP-2), e v) 3 vigas mistas de Eucalipto e Choupo (HBGBP). A Figura 5.3 ilustra a distribuição das espécies nas várias tipologias de vigas definidas.

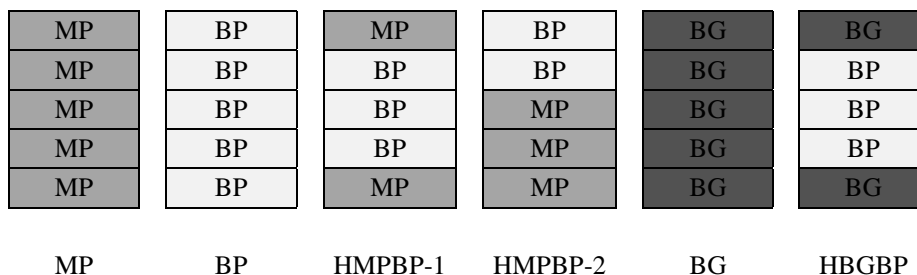


Figura 5.3 – Configurações de vigas adotadas no presente trabalho

5.4.2 Processo de montagem das vigas

5.4.2.1 Distribuição das lamelas

O processo de montagem decorreu em laboratório, nomeadamente num espaço climatizado com $20\pm 2^\circ\text{C}$ de temperatura e $65\pm 5\%$ de humidade relativa. Tendo em conta a caracterização da matéria-prima realizada anteriormente, foi decidido distribuir as lamelas na viga com base no módulo de elasticidade dinâmico de cada tábuas. Tendo em conta a elevada variabilidade de módulo de elasticidade dinâmico de cada espécie, foi decidido produzir vigas com uma gama ampla de valores médios de módulo de elasticidade dinâmicos ($E_{\text{dyn}_1_{\text{av}}}$).

Após a seleção preliminar das tábuas constituintes de cada viga foi realizado o aparelhamento das mesmas de modo a reduzir a espessura da tábuas para a espessura final de 24 mm. Foi também realizado o corte da tábuas na sua largura para valores próximos de 100 mm, bem como o comprimento das tábuas foi regularizado para um comprimento igual entre as 5 tábuas a colar. Posteriormente foi realizada nova medição de cada lamela (dimensões finais após aparelhamento) e a caracterização não destrutiva em cada lamela.

A distribuição das lamelas foi então reorganizada, quando necessário, tendo em conta o módulo de elasticidade dinâmico das lamelas (E_{dyn_1}). A distribuição das 5 lamelas foi realizada de modo a obter uma distribuição semelhante de módulo de elasticidade dinâmico entre as lamelas do lado da compressão e da tração. As lamelas com menor valor de módulo de elasticidade dinâmico foram dispostas na lamela interior, aumentando o valor para as camadas externas. A distribuição gráfica dos valores de módulo de elasticidade para cada viga é apresentada na Figura 5.4 e Figura 5.5 para o Choupo (BP), na Figura 5.6 para o Pinho bravo (MP) e Pinho bravo com Choupo (HMPBP) e na Figura 5.7 para o Eucalipto (BG) e Eucalipto com Choupo (HBGBP). De cada conjunto de 5 barras a da esquerda

corresponde à lamela posicionada à compressão e a mais à direita à lamela posicionada à tração. As referidas figuras apresentam igualmente a massa volúmica de cada viga, obtida da média das massas volúmicas das lamelas que compõem cada viga.

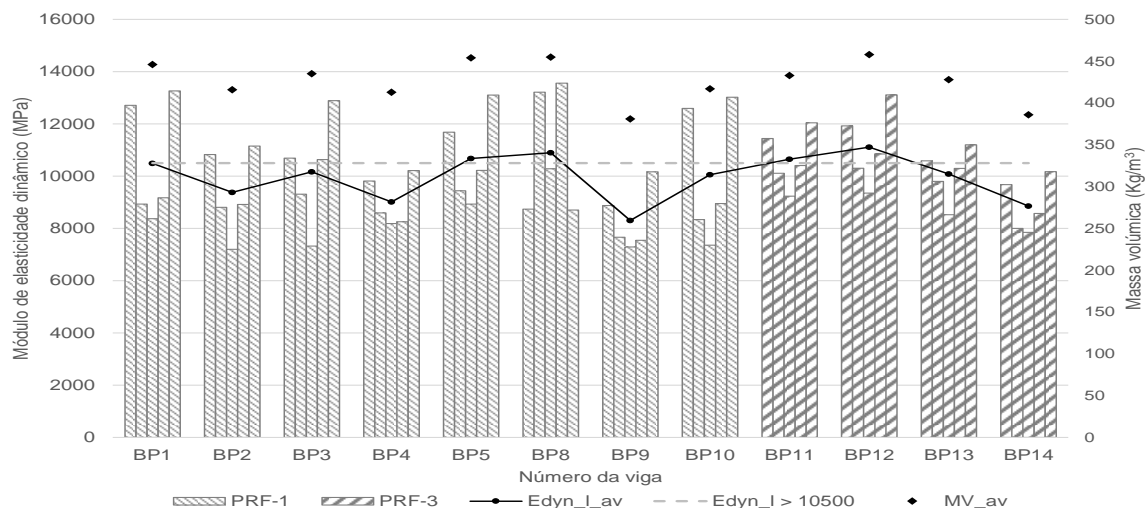


Figura 5.4 – Distribuição de módulo de elasticidade dinâmico para as vigas de Choupo (BP) – cola PRF-1 e PRF-3

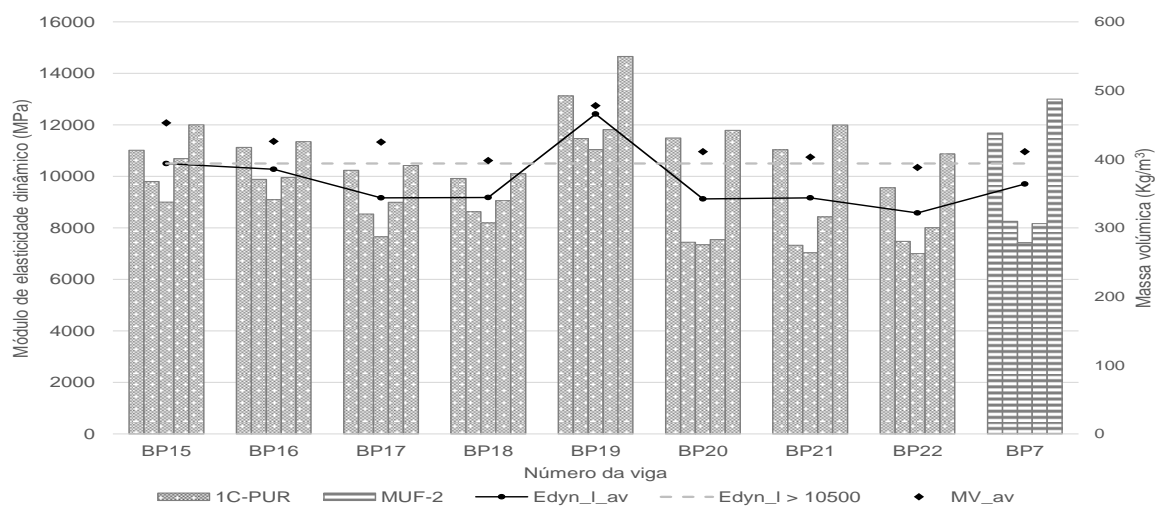


Figura 5.5 – Distribuição de módulo de elasticidade dinâmico para as vigas de Choupo (BP) – cola PUR-1+PR e MUF-2

No que se refere às vigas produzidas com Pinho bravo e Choupo, optou-se por 2 configurações diferentes. Numa primeira fase, foram produzidas as vigas HMPBP-1 constituídas por 2 lamelas de Pinho bravo dispostas nas camadas externas (1 à compressão e 1 à tração) e 3 lamelas de Choupo no interior. Com a configuração HMPBP-1 pretendia-se avaliar o desempenho mecânico da combinação de 2 espécies num só elemento maximizando o volume de madeira de Choupo (propriedades mecânicas inferiores),

permitindo também a redução da massa volúmica do elemento. Adicionalmente, foi considerada também a configuração HMPBP-2 com o Pinho bravo nas 3 lamelas inferiores e o Choupo nas 2 lamelas superiores. Na configuração HMPBP-2 a redução na massa volúmica foi inferior à da configuração HMPBP-1. No entanto, essa mesma diferença reflete-se também no módulo de elasticidade dinâmico médio das vigas (Figura 5.6).

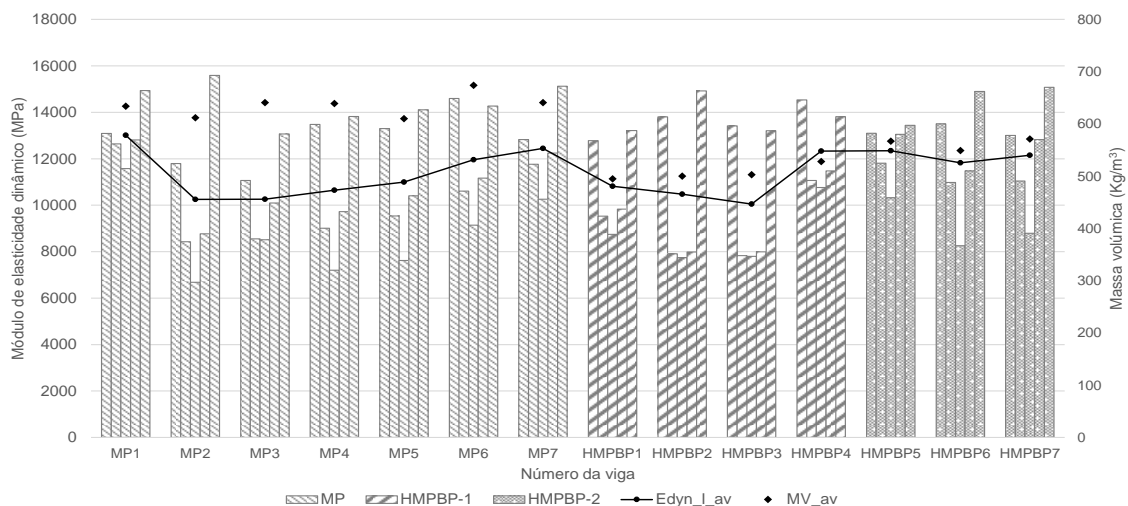


Figura 5.6 – Distribuição de módulo de elasticidade dinâmico para as vigas de Pinho bravo (MP) e Pinho bravo com Choupo (HMPBP) – cola PUR-1+PR

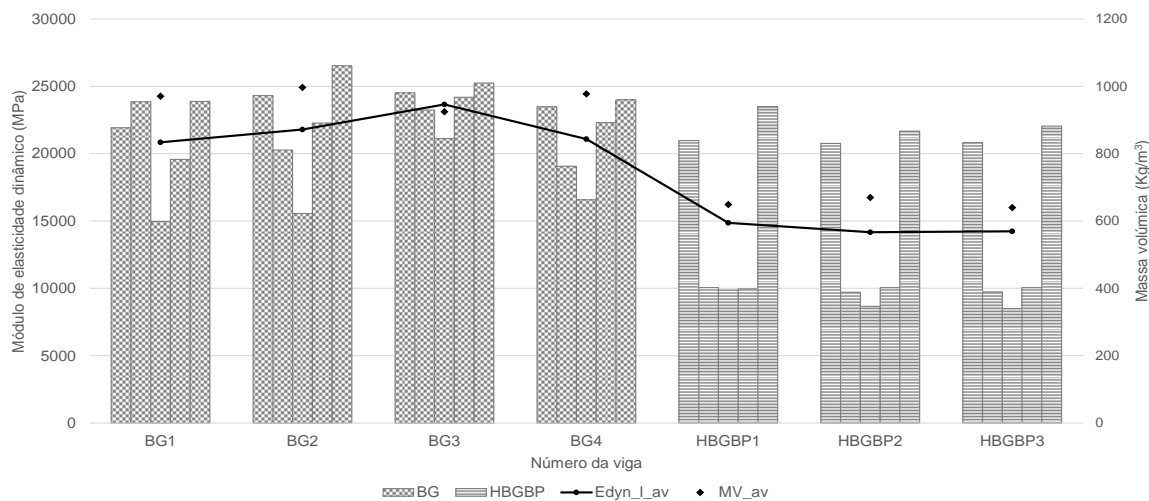


Figura 5.7 – Distribuição de módulo de elasticidade dinâmico para as vigas de Eucalipto (BG) e Eucalipto com Choupo (HBGBP) – cola PUR-1+PR

5.4.2.2 Colas utilizadas

Para a produção das vigas foram consideradas quatro colas diferentes previamente validadas para o Pinho bravo e Choupo: i) PRF-1, ii) PRF-3, iii) PUR-1+PR e iv) MUF-2. Os parâmetros de colagem considerados no processo de montagem (quantidade de cola

e pressão de aperto) tiveram em conta os valores que melhores resultados proporcionaram na qualidade de colagem de face analisada no Capítulo 3. Apesar de o desempenho da colagem de face de Eucalipto não ter sido favorável, existia todo o interesse em avaliar o comportamento mecânico enquanto viga.

De referir que as vigas MP, HMPBP, BG e HBGBP foram coladas apenas com a cola PUR - 1+PR. Em relação às vigas de Choupo foi considerada a cola MUF-2 em apenas 1 viga (BP7), a cola PUR-1+PR em 8 vigas (BP15 a BP22), a cola PRF-1 em 8 vigas (BP1 a BP5 e BP8 a BP10) e a cola PRF-3 em 4 vigas (BP11 a BP14). O uso de diferentes colas permite avaliar se o comportamento à flexão, nomeadamente se o modo de rotura diverge. A disponibilidade das colas foi também um fator que limitou o uso de colas do tipo PRF e MUF nas restantes vigas das restantes espécies.

O Quadro 5.1 apresenta o resumo dos parâmetros considerados para cada cola considerada no processo de assemblagem das vigas. De referir que as diferenças na pressão de aperto da cola PUR-1+PR estão relacionadas com a espécie a colar, ou seja, 0,8 MPa para colagens com Pinho bravo (MP e HMPBP), 1,0 MPa para o Choupo (BP) e 1,2 MPa para colagens com Eucalipto (BG e HBGBP).

Quadro 5.1 – Resumo dos parâmetros de colagem considerados para as diversas colas

Cola	PRF – 1	PRF – 3	MUF – 2	PUR-1+PR
Quantidade de cola (g/m ²)	450	450	350	180 (20*)
Resina / Endurecedor	100/20	100/20	100/20	-
Pressão de aperto (MPa)	1	0,8	1	0,8/1,0/1,2
Tempo de prensagem (h)	4	4	8	7
Temperatura ambiente (°C)	20	20	20	20

Nota: * quantidade de primário (g/m²) aplicado previamente à cola.

5.4.2.3 Assemblagem das vigas

O processo de assemblagem decorreu num período de tempo inferior a 2h após a redução da espessura da tábua para a espessura final de 24 mm. Deste modo, foi reduzido o risco de contaminação da superfície e da acumulação de poeiras em ambas as faces.

A cola foi aplicada em apenas uma das faces de cada lamela, tendo a quantidade aplicada sido controlada por pesagem. De modo a garantir uma distribuição uniforme da cola pela superfície, a mesma foi espalhada através de uma espátula denteada. A mistura das colas PRF-1, PRF-3 e MUF-2 foi realizada imediatamente antes da sua aplicação, tendo sido adotada a razão resina/endurecedor de 100/20. No caso da cola PUR-1+PR, o primário PR 3105 foi aplicado em ambas as faces, tendo sido assegurado o período de ativação mínimo

de 10 minutos. A quantidade de primário aplicado foi de 20 g/m^2 . O processo de prensagem foi realizado nos mesmos moldes da caracterização do desempenho da colagem de face (ver 3.2.4) (Figura 5.8).

As dimensões das vigas após o processo de fabrico foram aproximadamente 100 mm de largura, 120 mm de altura e 2300-2500 mm de comprimento. Após o término do processo de fabrico as vigas foram mantidas em ambiente controlado ($20 \pm 2^\circ\text{C}$ de temperatura e $65 \pm 5\%$ de humidade relativa) durante 7 dias antes de serem realizados os ensaios mecânicos.



Figura 5.8 – Viga de Choupo sob o processo de pressão – cola PRF-1

5.5 Determinação das propriedades mecânicas

5.5.1 Caracterização não destrutiva experimental das vigas de madeira lamelada colada

Após o processo de cura das colas, os topos das vigas foram cortados de modo a obter superfícies limpas de excessos de cola, reduzindo o comprimento no máximo em 5 cm em cada topo. Foi assegurado que o comprimento após o corte dos topos de cada viga seria igual ou superior a 2280 mm, cumprindo o requisito da EN 408 (2012) relativo ao comprimento mínimo de 19 vezes a altura.

A caracterização não destrutiva das vigas foi feita em duas fases: i) secção transversal com dimensões de $100 \times 120 \text{ mm}^2$ (após processo de colagem e cura) e ii) secção transversal final de $92 \times 120 \text{ mm}^2$ (após aparelhamento lateral). Como *input* de dados foi considerada a largura, altura e comprimento de cada viga para além do teor de água e da respetiva massa. Nos ensaios realizados com a secção $100 \times 120 \text{ mm}^2$ foi considerada a média das larguras médias das lamelas constituintes da respetiva viga. Os ensaios foram realizados seguindo o processo referido na caracterização não destrutiva das tábuas/lamelas. Foram registados os valores de módulo de elasticidade dinâmico da viga, $E_{\text{dyn_v_100}}$ e $E_{\text{dyn_v_92}}$, consoante a largura da viga, 100 mm ou 92 mm, respetivamente. No Quadro 5.2 encontra-se o resumo

de valores obtidos dos ensaios de caracterização não destrutiva realizados nas vigas, para as várias etapas do presente estudo.

Quadro 5.2 – Módulo de elasticidade dinâmico das vigas determinado por vibração longitudinal (MPa)

	Média das lamelas ($E_{dyn_l_av}$)					Antes de aparelhar (100 x 120 mm ²) ($E_{dyn_v_100}$)					Depois de aparelhar (92 x 120 mm ²) ($E_{dyn_v_92}$)				
	BP	MP	HMPBP	BG	HBGBP	BP	MP	HMPBP	BG	HBGBP	BP	MP	HMPBP	BG	HBGBP
Média	9919	11366	11428	21845	14423	10080	11861	11747	22030	14604	10013	11812	11668	22294	14717
Mínimo	8305	10251	10050	20840	14172	8511	10722	10584	21076	14311	8337	10595	10406	21400	14409
Máximo	12423	13011	12345	23661	14867	12562	13689	12635	23771	15166	12617	13804	12663	24062	15304
COV (%)	10,3	9,7	8,4	5,8	2,7	9,8	9,4	7,3	5,6	3,3	9,8	10,1	7,5	5,5	3,5
Nº vigas	21	7	7	4	3	21	7	7	4	3	21	7	7	4	3

Da aplicação do método de vibração longitudinal às vigas de madeira lamelada colada verifica-se que das várias fases resultaram valores médios semelhantes. Ainda assim a assemblagem das lamelas por via da colagem de face resultou no incremento ligeiro dos valores de módulo de elasticidade dinâmico das vigas determinados com base na média das lamelas. O processo de redução da largura das vigas de aproximadamente 100 mm para 92 mm conduziu a uma ligeira redução dos valores médios (-0,4% a -0,7%), com exceção das vigas BG e HBGBP (+1,2% e +0,8%).

5.5.2 Métodos analíticos de previsão das propriedades mecânicas

De seguida são apresentados os resultados obtidos pelos vários métodos analíticos considerados para estimar as propriedades de flexão das vigas, em particular o módulo de elasticidade estático a partir do módulo de elasticidade dinâmico das lamelas.

Método da Secção Transformada (E_{dyn_TSM})

O método da Secção Transformada consiste na aplicação da Equação 5.6 e Equação 5.7 anteriormente apresentadas em 5.2.2. Como dados de entrada do TSM foram considerados: i) o módulo de elasticidade dinâmico de cada lamela, ii) a respetiva espessura e iii) a distribuição das lamelas na respetiva viga. Da aplicação das referidas equações resultaram os valores individuais de módulo de elasticidade dinâmico previstos para as respetivas vigas (E_{dyn_TSM}), que se encontram resumidos no Quadro 5.3.

Método baseado na teoria de vigas de Timoshenko (E_{dyn_TIMO})

Tendo em consideração as Equações 5.4 e 5.5 apresentadas em 5.2.2, foram estimados os valores de módulo de elasticidade de cada viga de madeira lamelada colada produzida. Em relação ao TSM foi ainda considerado nos dados de entrada do método de Timoshenko a largura de cada lamela. Os resultados obtidos de módulo de elasticidade dinâmico como

base na teoria de viga de Timoshenko (E_{dyn_TIMO}) são apresentados no Quadro 5.3 para as combinações de espécies consideradas no presente trabalho.

Quadro 5.3 – Módulo de elasticidade dinâmico das vigas determinado através de métodos analíticos (MPa)

	Método da Secção Transformada (E_{dyn_TSM})					Timoshenko (E_{dyn_TIMO})				
	BP	MP	HMPBP	BG	HBGBP	BP	MP	HMPBP	BG	HBGBP
Média	10851	12937	13022	23680	19101	10828	12858	12993	23652	19057
Mínimo	9098	11468	12160	22593	18754	9069	11346	12160	22592	18725
Máximo	13401	13725	13562	24605	19615	13365	13678	13544	24596	19543
COV (%)	10,0	6,2	4,6	4,3	2,4	10,0	6,6	4,4	4,2	2,3
Nº vigas	21	7	7	4	3	21	7	7	4	3

Os resultados obtidos por ambos os métodos analíticos considerados foram semelhantes em todas as combinações de espécies estudadas, com variações inferiores a 1% entre valores médios. Ambos os métodos apresentaram desempenho idêntico, contudo o TSM é de aplicação mais simples, comparativamente ao método baseado na teoria da viga de Timoshenko. Por outro lado, o princípio de utilização do TSM está relacionado com vigas de madeira lamelada colada constituídas por 3 zonas de rigidez. O método da teoria da viga de Timoshenko permite realizar a previsão do módulo de elasticidade da viga com um número indeterminado de zonas de rigidez e sem que seja necessária a disposição simétrica de módulo de elasticidade.

Em comparação com os resultados obtidos por via de vibração longitudinal, os valores médios dos métodos analíticos foram superiores entre 7,5% (BG) e 30,8% (HBGBP).

5.5.3 Ensaio estáticos de flexão

Os ensaios estáticos conduzidos no presente trabalho tinham como objetivo a determinação das principais propriedades mecânicas de flexão, nomeadamente: i) módulo de elasticidade à flexão (local, $E_{m,l}$ e global, $E_{m,g}$) e ii) resistência à flexão paralela às fibras (f_m). A determinação das referidas propriedades seguiu os pressupostos descritos na EN 408 (2012), no que diz respeito aos procedimentos de ensaio, instrumentação, distâncias entre apoios e expressões de cálculo.

5.5.3.1 Módulo de elasticidade à flexão

A determinação do módulo de elasticidade à flexão foi conduzida em cada viga antes e depois de aparelhada lateralmente, ou seja, com largura de aproximadamente 100 mm e 92 mm (largura final). Foi adotado um vão entre apoios de 2160 mm (18 h) com distância entre pontos de carga de 720 mm (6 h), tal como entre pontos de carga e apoios.

O mesmo ensaio permitiu a determinação do módulo de elasticidade local e global, tendo-se usado transdutores de deslocamento de 25 e 50 mm de capacidade máxima para a medição da deformação, e uma célula de carga de capacidade máxima de 200 kN para a medição da carga aplicada (Figura 5.9).

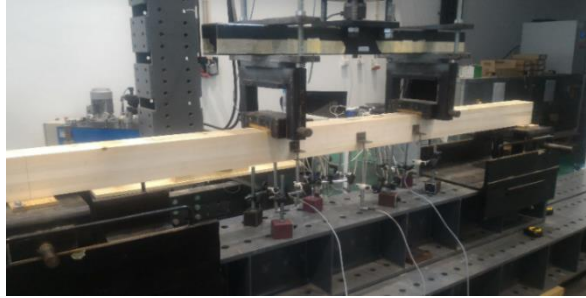


Figura 5.9 – *Layout* de ensaios de módulo de elasticidade e resistência à flexão

A aquisição de dados foi realizada em intervalos de 1s. A carga máxima aplicada foi de 40% da carga de rotura prevista com base em ensaios de caracterização da espécie à flexão. A carga foi aplicada em controlo de deslocamento a uma velocidade constante de 0,36 mm/s. Nos apoios e pontos de carga foi disposta 1 peça de madeira (Pinho bravo) entre a viga e a chapa de aço, de modo a minimizar a compressão localizada nas vigas de madeira lamelada colada. Os valores de módulo de elasticidade local ($E_{m,l}$) e global ($E_{m,g}$) foram determinados de acordo com a Equação 5.12 e Equação 5.13, respetivamente. Os resultados obtidos para as vigas BP, MP e HMPBP são apresentados no Quadro 5.4 e para as vigas BG e HBGBP no Quadro 5.5.

$$E_{m,l} = \frac{al_1^2(F_2 - F_1)}{16I(w_2 - w_1)} \quad (5.12)$$

$$E_{m,g} = \frac{3al^2 - 4a^3}{2bh^3 \left(2 \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} - \frac{6a}{5Gbh} \right)} \quad (5.13)$$

em que a é a distância entre ponto de aplicação de carga e apoio, l_1 é a distância entre pontos de medição de deformação (5xh), l é o vão de ensaio (18xh), I é a inércia da viga e $(F_2 - F_1)/(w_2 - w_1)$ é a relação entre a força aplicada e a deformação da viga, b e h são a largura e altura de cada viga, respetivamente e G é o módulo de distorção que foi considerado como infinito.

5.5.3.2 Resistência à flexão

O ensaio de determinação da resistência à flexão foi conduzido apenas para a largura final de cada viga (aproximadamente 92 mm). Assim, após o ensaio de módulo de elasticidade à flexão ($E_{m,gl_{92}}$), foi retirada a carga e iniciado um novo procedimento de carga de modo a atingir a carga de rotura prevista num período de aproximadamente 300 ± 120 s. A carga foi aplicada novamente em controlo de deslocamento a uma velocidade constante de 0,167 mm/s.

Para o cálculo da resistência à flexão é apenas necessário o valor da força máxima atuante durante o ensaio. Ainda assim, durante o ensaio procedeu-se à aquisição dos dados de força e deslocamento do êmbolo do atuador hidráulico que controlou o ensaio (com capacidade máxima de 100 kN). A resistência à flexão (f_m) foi determinada de acordo com a Equação 5.14.

$$f_m = \frac{3Fa}{bh^2} \quad (5.14)$$

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

O resumo dos resultados obtidos dos ensaios de flexão, nomeadamente módulo de elasticidade local (largura de 100 mm e 92 mm), global (largura de 100 mm e 92 mm) e resistência à flexão (92mm) são apresentados no Quadro 5.4 e Quadro 5.5.

Quadro 5.4 – Resumo dos ensaios estáticos de flexão das vigas BP, MP e HMPBP (antes e depois de aparelhamento lateral) (MPa)

	Choupo (BP)					Pinho bravo (MP)					Pinho bravo e Choupo (HMPBP)				
	$E_{m,l_{100}}$	$E_{m,g_{100}}$	$E_{m,l_{92}}$	$E_{m,g_{92}}$	f_m	$E_{m,l_{100}}$	$E_{m,g_{100}}$	$E_{m,l_{92}}$	$E_{m,g_{92}}$	f_m	$E_{m,l_{100}}$	$E_{m,g_{100}}$	$E_{m,l_{92}}$	$E_{m,g_{92}}$	f_m
Média	12931	10396	12607	10533	55,6	14391	13012	13726	12915	62,0	15367	12783	15575	12918	63,8
Mínimo	9004	7956	9461	8610	36,4	11305	10908	11675	10995	37,1	12175	11684	13002	12091	53,9
Máximo	17465	13215	17786	13401	73,1	17140	14609	15050	14553	82,7	18788	13702	18798	13805	74,5
COV (%)	18,0	12,5	18,0	11,6	17,5	12,9	9,5	8,5	9,0	25,6	16,0	5,4	13,9	5,2	12,7
Nº vigas	21					7					7				

Dos resultados apresentados, verificou-se que a redução da largura do elemento de aproximadamente 100 mm para a largura final e homogénea de 92 mm produziu efeitos muito reduzidos nas vigas BP, MP e HMPBP, tendo-se registado variações entre -4,6% (MP) e 1,4% (HMPBP) para os valores de $E_{m,l}$ e entre -0,7% (MP) e 1,3% (BP) para os valores de $E_{m,g}$. Por outro lado, nas vigas BG e HBGBP a tendência foi de aumento do

módulo de elasticidade estático (local e global). Foi registado um aumento mínimo de 2,9% para $E_{m,g}$ (HBGBP) e máximo de 11,9% para $E_{m,l}$ (HBGBP).

Quadro 5.5 – Resumo dos ensaios estáticos de flexão das vigas BG e HBGBP (antes e depois de aparelhamento lateral) (MPa)

	Eucalipto (BG)					Eucalipto e Choupo (HBGBP)				
	$E_{m,l_{100}}$	$E_{m,g_{100}}$	$E_{m,l_{92}}$	$E_{m,g_{92}}$	f_m	$E_{m,l_{100}}$	$E_{m,g_{100}}$	$E_{m,l_{92}}$	$E_{m,g_{92}}$	f_m
Média	26222	22952	27226	23713	129,0	23925	18592	26763	19126	96,5
Mínimo	24392	21541	24577	21885	125,8	21631	17976	22638	18601	88,9
Máximo	27431	24101	28803	24829	131,9	25467	19543	29815	20010	107,0
COV (%)	4,9	5,4	7,0	5,9	2,2	8,5	4,5	13,9	4,0	9,7
Nº vigas	4					3				

A análise das propriedades mecânicas das vigas de Pinho bravo revelaram um desempenho superior às vigas de Choupo com valores 22,6% e 11,4% superiores para o módulo de elasticidade e resistência à flexão, respetivamente. Situação idêntica foi observada nas vigas híbridas de Pinho bravo e Choupo cujos resultados foram 22,6% e 14,7% superiores aos resultados das vigas de Choupo, para o módulo de elasticidade e resistência à flexão, respetivamente. A comparação dos resultados das vigas MP com as vigas HMPBP demonstrou uma semelhança de resultados para ambas as propriedades mecânicas (módulo de elasticidade e resistência à flexão). Ainda assim, de referir que esta semelhança de resultados, nomeadamente no que à resistência à flexão diz respeito ocorreu devido à rotura prematura de 2 das 7 vigas de Pinho bravo, condicionada pela forte presença de nós na lamela inferior.

No entanto, se for tida em consideração a eficiência estrutural das vigas (relação entre propriedade mecânica e massa volúmica), verifica-se que o Choupo apresenta melhor eficiência estrutural, tanto para o módulo de elasticidade (24,8) como para a resistência à flexão (0,13), seguido das vigas HMPBP (24,4 e 0,12 para módulo de elasticidade e resistência à flexão, respetivamente) e por fim das vigas MP (20,3 e 0,10 para módulo de elasticidade e resistência à flexão, respetivamente) (Figura 5.10 e Figura 5.11). O emprego do Choupo no fabrico de madeira lamelada colada em vigas integralmente de Choupo e em vigas híbridas revelou assim, um grande potencial de aplicação. De referir ainda que as vigas híbridas apresentaram os melhores resultados ao nível de coeficientes de variação, com valores de 5,2% e 12,7%, respetivamente para o módulo de elasticidade e resistência à flexão.

Os resultados das vigas de Eucalipto demonstram o seu potencial de aplicação enquanto material para fins estruturais, com valores bastante superiores às restantes espécies consideradas. Em relação, ao nível da eficiência estrutural as vigas BG apresentam um

desempenho semelhante às vigas BP e HMPBP para ambas as propriedades mecânicas (24,5 e 0,13 para módulo de elasticidade e resistência à flexão respectivamente). Contudo, a combinação de Eucalipto e Choupo (HBGBP) na mesma viga deu origem a propriedades mecânicas interessantes, tendo-se registado módulo de elasticidade médio 81,6% superior ao valor médio das vigas de Choupo e 48,1% superior ao das vigas MP e HMPBP. Em relação à resistência à flexão, os valores obtidos foram 73,6%, 55,8% e 51,3% superiores aos obtidos das vigas BP, MP e HMPBP, respetivamente. A vantagem das vigas HBGBP em relação às vigas BP, MP e HMPBP foi também evidente pela análise da eficiência estrutural, visto que apresentaram os melhores resultados de entre todos os conjuntos de vigas analisados (29,3 e 0,15 para módulo de elasticidade e resistência à flexão respectivamente). No entanto, deve ser tido em conta o número reduzido de vigas ensaiadas, em especial das configurações BG e HBGBP.

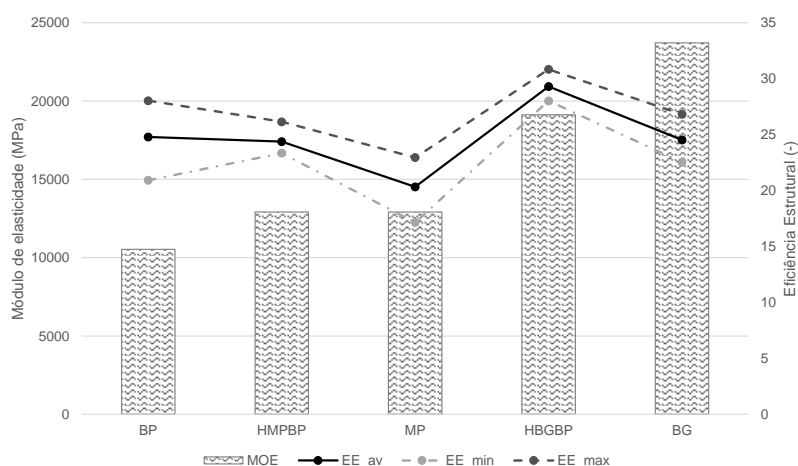


Figura 5.10 – Módulo de elasticidade médio à flexão e eficiência estrutural

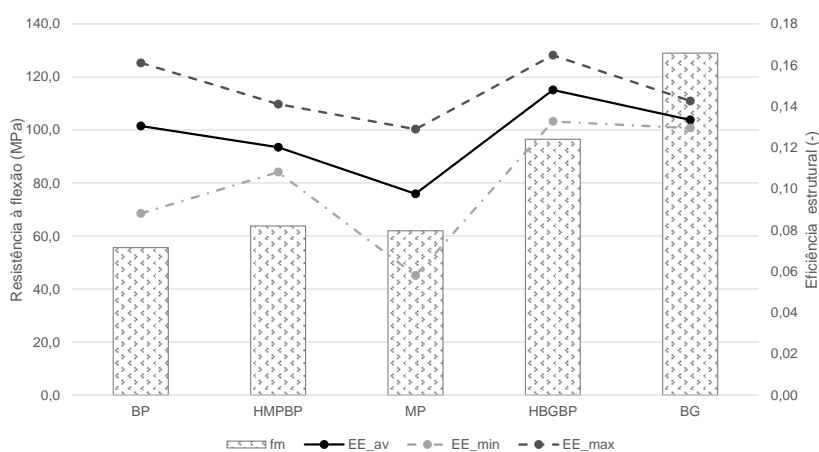


Figura 5.11 – Resistência à flexão média e eficiência estrutural

5.5.4 Determinação da massa volúmica e do teor de água

Após o ensaio de determinação da resistência à flexão que resultou na rotura de cada viga, foi obtido pelo menos um provete para determinação da massa volúmica e do teor de água da respetiva viga. A obtenção dos provetes seguiu o preconizado na EN 14080 (2013), ou seja, foi obtido o mais próximo possível da zona de rotura, e sempre que possível isento de defeitos, tais como, nós e ou linhas de rotura. Cada provete foi medido nas 3 dimensões (largura, altura e comprimento) e registada a respetiva massa.

A determinação da massa volúmica foi realizada através da relação entre a massa e o volume do provete. Por sua vez, o teor de água (w) foi determinado pelo método de secagem em estufa, seguindo o protocolo indicado pela EN 13183-1 (2002), tendo sido determinado o respetivo valor pela Equação 5.15. O provete foi considerado seco no momento em que a variação entre pesagens consecutivas foi inferior a 0,1%. Os resultados obtidos para as vigas das diferentes espécies e combinações de espécies encontram-se listados nos Quadros 5.6 a 5.10.

$$w = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100 \quad (5.15)$$

em que m_1 corresponde à massa inicial do provete e m_0 corresponde à massa seca do provete.

5.5.5 Análise estatística das propriedades mecânicas

As propriedades físicas e mecânicas descritas anteriormente devem ser ajustadas para condições de referência tal como indicado pela EN 384 (2004), nomeadamente os valores médios e o percentil de 5%.

Os valores de massa volúmica e do módulo de elasticidade estático global devem ser corrigidos para o valor de referência de 12% de teor de água através da Equação 5.16 e Equação 5.17, respetivamente.

$$\rho_{12\%} = \rho_w (1 - 0.005(w - 12)) \quad (5.16)$$

$$E_{12\%} = E_w (1 + 0.02(w - 12)) \quad (5.17)$$

Onde, $\rho_{12\%}$ é a massa volúmica ajustada para teor de água de 12%, ρ_w é a massa volúmica determinada nas condições do ensaio de flexão, w é o teor de água do provete obtido da viga após ensaio, $E_{12\%}$ é o módulo de elasticidade estático global ajustado ao teor de água

de 12%, E_w é o módulo de elasticidade estático global determinado nas condições do ensaio de flexão.

O percentil de 5% da massa volúmica, ρ_{05} , deve ser calculado pela Equação 5.18 como indicado na EN 384 (2004).

$$\rho_{05} = (\bar{\rho} - 1,65s) \quad (5.18)$$

Onde $\bar{\rho}$ é a média da massa volúmica da amostra e s é o desvio padrão da amostra.

Relativamente à resistência à flexão, o valor do percentil de 5% deve ser multiplicado por, k_h , fator que tem em consideração a altura da secção da viga (Equação 5.19), tal como indicado pelo Anexo F da EN 14080 (2013) e multiplicado pelo fator k_{th} , que tem em conta a espessura das lamelas (Equação 5.20) como indicado pela EN 14080 (2013).

$$k_h = \max \left\{ \left(\frac{h}{600} \right)^{0.1} ; 0.9 \right\} \quad (5.19)$$

$$k_{th} = \min \left\{ \left(\frac{40}{t} \right)^{0.1} ; 1.05 \right\} \quad (5.20)$$

Onde, h representa a altura da viga correspondente a aproximadamente 120 mm nas vigas fabricadas no presente estudo e t corresponde à espessura das lamelas, com o valor aproximado de 24 mm no presente estudo.

O resumo das diversas propriedades medidas ao longo do presente capítulo é apresentado seguidamente para cada espécie e combinação de espécies. Assim, são apresentados os valores médios, mínimos, máximos e coeficientes de variação das seguintes propriedades: i) módulo de elasticidade dinâmico obtido através de ensaios de vibração longitudinal ($E_{dyn_l_av}$ e $E_{dyn_v_92}$), através de métodos analíticos (E_{dyn_TSM} e E_{dyn_TIMO}) e através de ensaios estáticos (E_{m,l_92} , E_{m,g_92}); ii) resistência à flexão através de ensaios estáticos (f_m) e iii) massa volúmica (ρ) e teor de água (w). No Quadro 5.6 são apresentados os resultados relativos às vigas BP, no Quadro 5.7 as vigas MP, no Quadro 5.8 as vigas HMPBP, e no Quadro 5.9 e Quadro 5.10 as vigas HBGBP, respetivamente. De referir ainda, que os valores de módulo de elasticidade estático global e massa volúmica já têm em consideração os ajustes devidos ao teor de água ($E_{12\%}$ e $\rho_{12\%}$), tal como a resistência à flexão tem em conta a correção relativa à altura do elemento e da espessura das lamelas (f_{m_adj}). No Anexo E (Quadro E.1 a Quadro E.5) são apresentados os valores individuais para cada tipologia de viga.

Quadro 5.6 – Propriedades mecânicas e físicas determinadas nas vigas de choupo (BP)

	$E_{dyn_l_av}$ (MPa)	$E_{dyn_v_92}$ (MPa)	E_{dyn_TSM} (MPa)	E_{dyn_TIMO} (MPa)	E_{m,l_92} (MPa)	E_{m,g_92} (MPa)	f_m (MPa)	ρ (kg/m ³)	w (%)	$\rho_{12\%}$ (kg/m ³)	$E_{12\%}$ (MPa)	f_{m_adj} (MPa)
Média	9919	10013	10851	10828	12607	10533	55,6	428,6	14,1	424,1	10975	52,5
Valor característico	-	-	-	-	-	-	-	-	-	384,1	9265	35,8
Mínimo	8305	8337	9098	9069	9461	8610	36,4	386,2	13,2	382,0	8987	34,4
Máximo	12423	12617	13401	13365	17786	13401	73,1	474,3	14,9	471,4	13733	69,1
COV (%)	10,3	9,8	10,0	10,0	18,0	11,6	17,5	5,8	1,7	5,7	11,8	17,5
Nº vigas	21											

Quadro 5.7 – Propriedades mecânicas e físicas determinadas nas vigas de Pinho bravo (MP)

	$E_{dyn_l_av}$ (MPa)	$E_{dyn_v_92}$ (MPa)	E_{dyn_TSM} (MPa)	E_{dyn_TIMO} (MPa)	E_{m,l_92} (MPa)	E_{m,g_92} (MPa)	f_m (MPa)	ρ (kg/m ³)	w (%)	$\rho_{12\%}$ (kg/m ³)	$E_{12\%}$ (MPa)	f_{m_adj} (MPa)
Média	11366	11812	12937	12858	13726	12915	62,0	638,6	15,0	629,2	13680	58,5
Valor característico	-	-	-	-	-	-	-	-	-	595,4	12134	36,9
Mínimo	10251	10595	11468	11346	11675	10995	37,1	609,4	14,1	600,8	11718	35,0
Máximo	13011	13804	13725	13678	15050	14553	82,7	665,0	15,5	658,1	15574	78,1
COV (%)	9,7	10,1	6,2	6,6	8,5	9,0	25,6	3,1	3,3	3,2	8,9	25,6
Nº vigas	7											

Os resultados obtidos das vigas BP enquadram-se no intervalo de valores obtidos por Gao et al. (2015) em relação ao módulo de elasticidade (mínimo de 8930 MPa e máximo de 11119 MPa), apesar de no presente estudo a massa volúmica apresentar valores inferiores aos mencionados por Gao et al. (2015) de 536 kg/m³. Em relação à resistência à flexão os valores do presente trabalho são em média 24,5% inferiores. Esta diferença estará certamente relacionada com a amplitude de valores de massa volúmica do presente estudo. Em comparação com os resultados obtidos por Castro e Paganini (2003) foram obtidos no presente estudo valores significativamente superiores, nomeadamente 13,9% e 19,0% para módulo de elasticidade e resistência à flexão, respetivamente. Os valores mais elevados estarão certamente influenciados pela massa volúmica que foi 10,2% superior no presente estudo.

Quadro 5.8 – Propriedades mecânicas e físicas determinadas nas vigas de Pinho bravo e Choupo (HMPBP)

	$E_{dyn_l_av}$ (MPa)	$E_{dyn_v_92}$ (MPa)	E_{dyn_TSM} (MPa)	E_{dyn_TIMO} (MPa)	E_{m,l_92} (MPa)	E_{m,g_92} (MPa)	f_m (MPa)	ρ (kg/m ³)	w (%)	$\rho_{12\%}$ (kg/m ³)	$E_{12\%}$ (MPa)	f_{m_adj} (MPa)
Média	11428	11668	13022	12993	15575	12918	63,8	537,4	14,4	531,0	13538	60,3
Valor característico	-	-	-	-	-	-	-	-	-	473,5	12644	51,0
Mínimo	10050	10406	12160	12160	13002	12091	53,9	495,6	13,6	487,7	12553	50,9
Máximo	12345	12663	13562	13544	18798	13805	74,5	583,7	15,2	576,4	14557	70,4
COV (%)	8,4	7,5	4,6	4,4	13,9	5,2	12,7	6,5	3,9	6,6	5,1	12,7
Nº vigas	7											

Quadro 5.9 – Propriedades mecânicas e físicas determinadas nas vigas de Eucalipto (BG)

	$E_{dyn_l_av}$ (MPa)	$E_{dyn_v_92}$ (MPa)	E_{dyn_TSM} (MPa)	E_{dyn_TIMO} (MPa)	$E_{m_l_92}$ (MPa)	$E_{m_g_92}$ (MPa)	f_m (MPa)	ρ (kg/m ³)	w (%)	$\rho_{12\%}$ (kg/m ³)	$E_{12\%}$ (MPa)	f_{m_adj} (MPa)
Média	21845	22294	23680	23652	27226	23713	129,0	972,9	13,0	968,2	24174	121,4
Valor característico	-	-	-	-	-	-	-	-	-	927,3	22594	118,9
Mínimo	20840	21400	22593	22592	24577	21885	125,8	938,4	12,6	933,1	22417	118,8
Máximo	23661	24062	24605	24596	28803	24829	131,9	995,8	13,2	991,0	25367	124,0
COV (%)	5,8	5,5	4,3	4,2	7,0	5,9	2,2	2,5	2,2	2,6	5,9	2,1
Nº vigas	4											

O desempenho das vigas de Eucalipto foi superior em relação às restantes tipologias de viga. Alvite et al. (2002) obtiveram para Eucalipto (*Eucalyptus globulus*) valores médios inferiores para o módulo de elasticidade (20339 MPa) e ligeiramente superiores para resistência à flexão (125,3 MPa). Em comparação com os resultados obtidos por Castro e Paganini (2003) para diferentes clones de *Eucalyptus grandis*, os valores obtidos no presente trabalho foram 33,5%, 38,7% e 30,3% superiores aos obtidos pelo clone “330”, cuja massa volúmica foi a mais elevada (725 kg/m³) de entre os vários clones estudados.

Quadro 5.10 – Propriedades mecânicas e físicas determinadas nas vigas de Eucalipto e Choupo (HBGBP)

	$E_{dyn_l_av}$ (MPa)	$E_{dyn_v_92}$ (MPa)	E_{dyn_TSM} (MPa)	E_{dyn_TIMO} (MPa)	$E_{m_l_92}$ (MPa)	$E_{m_g_92}$ (MPa)	f_m (MPa)	ρ (kg/m ³)	w (%)	$\rho_{12\%}$ (kg/m ³)	$E_{12\%}$ (MPa)	f_{m_adj} (MPa)
Média	14423	14717	19101	19057	26763	19126	96,5	662,9	13,2	659,1	19578	91,0
Valor característico	-	-	-	-	-	-	-	-	-	635,4	19012	84,3
Mínimo	14172	14409	18754	18725	22638	18601	88,9	654,0	12,8	648,6	19006	83,9
Máximo	14867	15304	19615	19543	29815	20010	107,0	678,1	13,6	675,4	20663	101,1
COV (%)	2,7	3,5	2,4	2,3	13,9	4,0	9,7	2,0	3,3	2,2	4,8	9,9
Nº vigas	3											

A comparação dos valores entre as vigas mistas de Eucalipto e Choupo (HBGBP) com os apresentados por Castro e Paganini (2003) para a combinação de Choupo com Eucalipto (clone “330”) revelaram diferenças significativas, provavelmente devidas à diferença de massas volúmicas de ambas as espécies. Os valores do presente estudo eram 34,8%, 34,5% e 52,4% superiores para a massa volúmica, módulo de elasticidade e resistência à flexão, respetivamente.

5.5.6 Análise do comportamento mecânico das vigas

Após o ensaio de rotura foi registado o modo de rotura de cada viga, nomeadamente a sua localização e se a mesma ocorreu numa seção com presença de nós. No decorrer de alguns ensaios verificou-se a formação de pregas de compressão, que foi igualmente registada.

Tendo em conta a configuração do ensaio de flexão de 4 pontos (2 apoios e 2 pontos de carga) era espectável que a rotura ocorresse no terço central da viga. Do total de 42 vigas ensaiadas à rotura, apenas 2 apresentaram rotura fora do terço central, 1 constituída inteiramente por Choupo e 1 constituída inteiramente por Pinho bravo. No caso da viga de Choupo, a lamela inferior apresentava defeitos significativos, associados ao crescimento da árvore (Figura 5.12a). Por outro lado, na viga de Pinho bravo a rotura deveu-se à presença de um nó de grandes dimensões que atravessa a largura total da lamela (Figura 5.12b).

Em relação ao modo de rotura, verificou-se que as roturas das vigas BG e HBGBP não apresentavam sinais de ter sido causada pela presença de nós na lamela inferior. Por outro lado, verificou-se a presença de nós na zona da rotura da lamela inferior em 57% das vigas BP. Verificou-se também a presença de nós em 57% das roturas das vigas MP e 43% das vigas HMPBP.

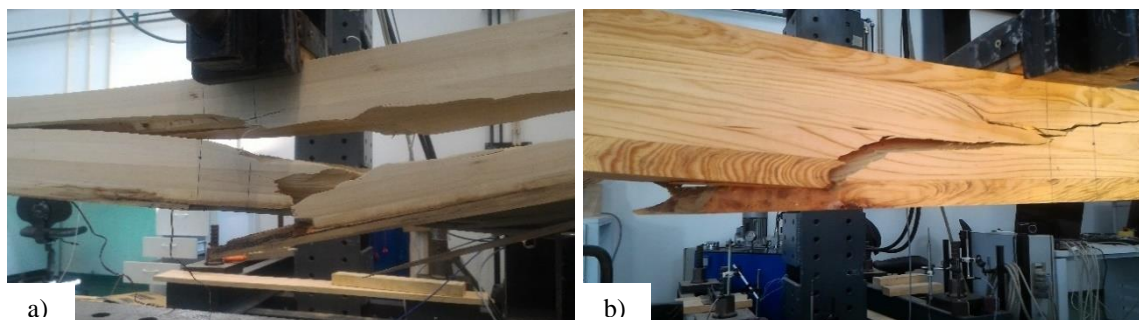


Figura 5.12 – a) Defeito visível na lamela inferior da viga BP22, b) Nó oblíquo na lamela inferior da viga de MP4

Em 67% das vigas BP verificou-se a ocorrência de pregas na lamela mais comprimida, sendo que em alguns casos as pregas prolongaram-se para a segunda lamela à compressão. Foi igualmente verificada a ocorrência das referidas pregas nas vigas com lamelas de Eucalipto (BG e HBGBP) e nas vigas HMPBP-2, ou seja na configuração cujas lamelas de Choupo foram dispostas nas lamelas superiores (à compressão).

Da análise dos registos força vs deslocamento recolhidos do êmbolo do atuador hidráulico verificou-se que algumas das vigas apresentaram valores elevados de deformação no momento da rotura. Regra geral, a madeira é caracterizada por apresentar comportamento elástico-linear até à rotura, tal como foi verificado na generalidade das vigas de Pinho bravo (Figura 5.13) e em algumas vigas BP (Figura 5.14). Contudo, nas vigas de Choupo (BP) foi possível verificar a ocorrência de deformações claramente fora do domínio do comportamento elástico linear em 71% das vigas (15 das 21 vigas) (Figura 5.15). O mesmo comportamento foi observado nas vigas HMPBP (Figura 5.16), na configuração HMPBP-

2 (2 lamelas de Choupo posicionadas na parte superior da viga), assim como nas vigas BG e HBGBP (Figura 5.17).

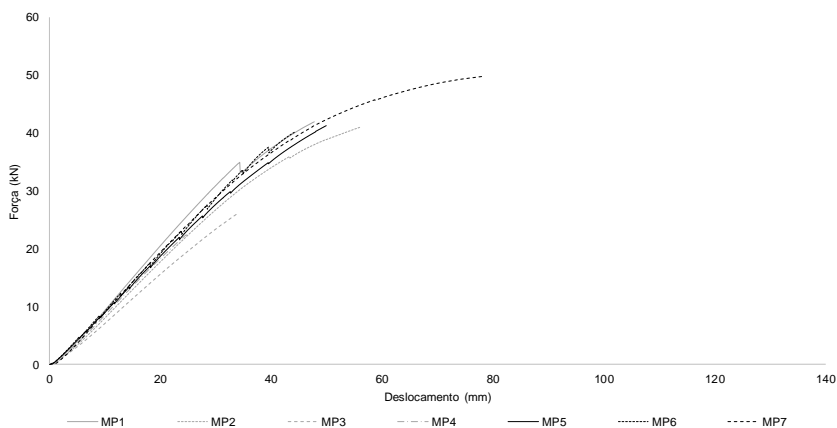


Figura 5.13 – Curvas força vs deslocamento obtidas dos ensaios de flexão das vigas MP

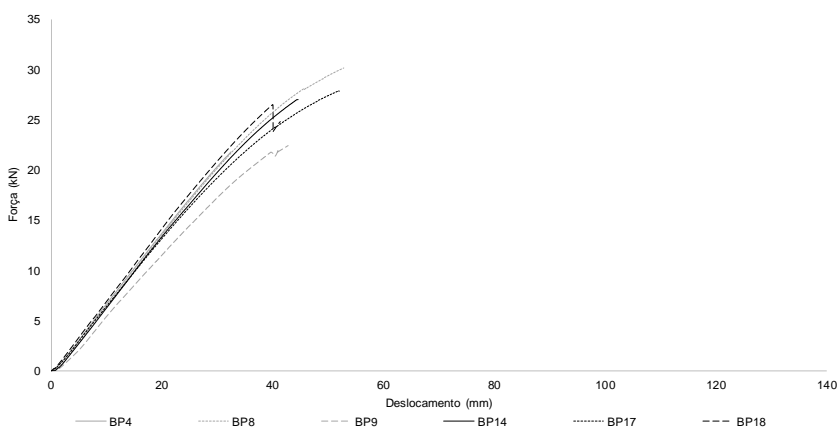


Figura 5.14 – Curvas força vs deslocamento obtidas dos ensaios de flexão das vigas BP – comportamento elástico linear

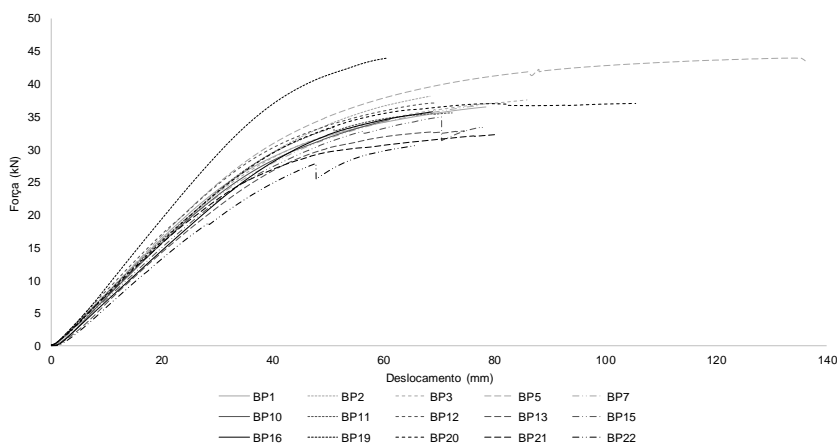


Figura 5.15 – Curvas força vs deslocamento obtidas dos ensaios de flexão das vigas BP – comportamento não linear até à rotura

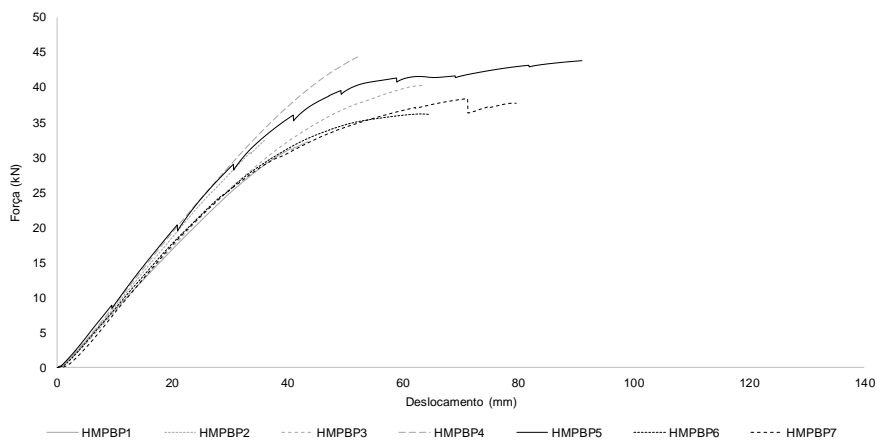


Figura 5.16 – Curvas força vs deslocamento obtidas dos ensaios de flexão das vigas HMPBP

Dos gráficos força vs deslocamento, é possível verificar que as vigas que apresentaram comportamento elástico linear até à rotura se caracterizam por uma deformação última inferior às restantes vigas. As vigas BP com comportamento elástico linear até à rotura e as vigas MP apresentaram deslocamento último médio de aproximadamente 44,3 mm e 47,9 mm, respetivamente. Por outro lado, foram obtidos deslocamentos últimos médios de 78,7 mm, 61,5 mm, 73,9 mm e 63,2 mm para as vigas BP (com comportamento não linear), HMPBP, BG e HBGBP, respetivamente.

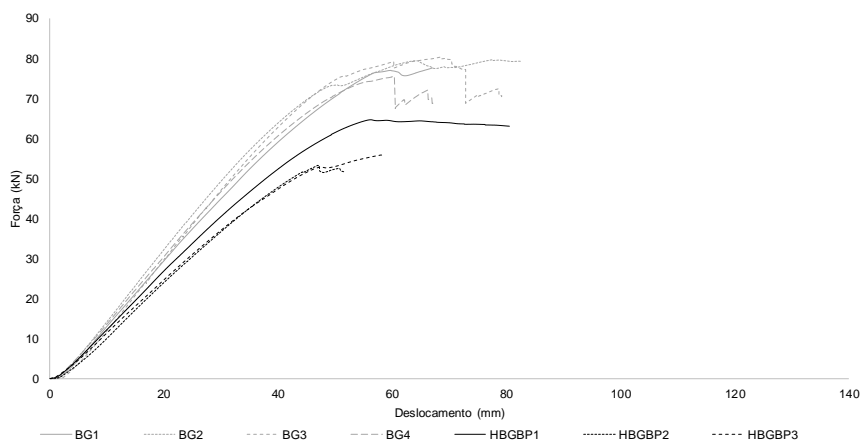


Figura 5.17 – Curvas força vs deslocamento obtidas dos ensaios de flexão das vigas BG e HBGBP

5.5.7 Análise de regressão linear simples

Um dos objetivos do presente capítulo, para além da determinação das propriedades mecânicas das vigas constituídas por diferentes espécies (de uma só espécie e híbridas: de duas espécies), era estudar a fiabilidade do uso de métodos não destrutivos para a previsão das propriedades mecânicas. Assim, foi realizada uma análise de regressão linear simples

para avaliar a correlação entre os resultados obtidos pelos métodos não destrutivos e pelos métodos analíticos e as propriedades mecânicas mais importantes, nomeadamente o módulo de elasticidade e a resistência à flexão determinados por meio de ensaios de flexão estática. Das 5 amostras consideradas, o número de vigas ensaiadas foi distinto, pelo que as correlações obtidas da amostra BG e HBGBP serão meramente indicativas do potencial da metodologia, dado que o número de vigas ensaiadas foi de 4 e 3, respetivamente. No que diz respeito às amostras MP e HMPBP, só foi possível ensaiar 7 vigas em cada amostra, pelo que os resultados deverão ser considerados como indicadores de uma tendência. Os coeficientes de correlação obtidos são apresentados no Quadro 5.11 para as diferentes amostras. No Anexo E (Figura E.1 a Figura E.15) são apresentadas graficamente as correlações obtidas entre propriedades para as 5 tipologias de vigas.

Os coeficientes de correlação obtidos da amostra BP indicam, como seria de esperar, resultados bastante idênticos entre o E_{dyn_TSM} e E_{dyn_TIMO} , tanto para a previsão do módulo de elasticidade como para a resistência à flexão. Esta observação foi válida também para as restantes amostras em estudo.

Quadro 5.11 – Coeficientes de correlação entre massa volúmica e propriedades mecânicas obtidas por ensaios de flexão estática e por métodos não destrutivos

Amostra	Propriedade	$\rho_{12\%}$	E_{dyn_TSM}	E_{dyn_TIMO}	$E_{dyn_v_92}$	$E_{12\%}$
BP	$E_{12\%}$	0,68 (0,76)	0,93 (0,93)	0,93 (0,93)	0,71 (0,79)	-
	f_{m_adj}	0,65 (0,73)	0,86 (0,85)	0,85 (0,85)	0,70 (0,76)	0,87 (0,87)
MP	$E_{12\%}$	0,21	0,91	0,90	0,94	-
	f_{m_adj}	0,15	0,67	0,62	0,60	0,59
HMPBP	$E_{12\%}$	0,57	0,89	0,90	0,94	-
	f_{m_adj}	0,57	0,33	0,35	0,60	0,59
BG	$E_{12\%}$	-0,25	0,99	0,98	0,72	-
	f_{m_adj}	-0,38	0,99	1,00	0,83	0,97
HBGBP	$E_{12\%}$	-0,61	0,97	0,97	1,00	-
	f_{m_adj}	-0,79	1,00	1,00	0,98	0,97

Nota: Os valores em parêntesis referem-se aos coeficientes de correlação determinados para a amostra BP de apenas 20 vigas (sem considerar a viga nº 8)

Os coeficientes de correlação (r) determinados entre $E_{dyn_v_92}$ e as propriedades mecânicas ($E_{12\%}$ e f_{m_adj}) foram bastante inferiores quando comparados com os obtidos pelos métodos analíticos, tendo apresentado valores de 0,71 para $E_{12\%}$ e 0,70 para f_{m_adj} . Contudo, a amostra BP contém uma viga (nº8) cujo fabrico não cumpriu os critérios de disposição das lamelas, uma vez que os maiores valores de E_{dyn_1} não foram dispostos nas lamelas externas (ver Figura 5.4). Assim, considerando a amostra BP apenas com 20 vigas (excluindo a viga nº8 da análise), os coeficientes de correlação aumentam significativamente para 0,79 e 0,76 para o módulo de elasticidade e resistência à flexão respetivamente.

Assim, é evidente que nos casos em que a disposição das lamelas não segue as recomendações da EN 14080 (2013), o método da vibração longitudinal não é eficaz na predição dos respetivos valores de $E_{m,g}$ e f_m . A menor ineficácia demonstrada está relacionada com a diferença registada entre valores de $E_{dyn_v_92}$ (11075 MPa) e $E_{12\%}$ (9597 MPa) na viga nº8 conduzida pelo posicionamento de uma lamela com menor E_{dyn_1} na lamela mais tracionada que condicionou as deformações da viga e por consequência a sua capacidade resistente à flexão. A comparação dos valores da viga BP8 com a viga BP12 (QUADRO E.1 do Anexo E) demonstra a diferença de desempenho observado entre 2 vigas com valor de $E_{dyn_v_92}$ idêntico e propriedades mecânicas distintas.

Relativamente à previsão da resistência à flexão, o valor de coeficiente de correlação mais elevado foi obtido pelo módulo de elasticidade estático (0,87), tendo os métodos analíticos demonstrado excelentes resultados, nomeadamente 0,86 e 0,85 para E_{dyn_TSM} e E_{dyn_TIMO} . A determinação do módulo de elasticidade estático envolve custos significativos relacionados com o tempo de ensaio e equipamento específico necessário à sua determinação, pelo que os métodos analíticos se apresentam como alternativas fiáveis à determinação das propriedades mecânicas à flexão das vigas de Choupo. De referir ainda os bons resultados obtidos das correlações estabelecidas com base na massa volúmica (corrigida para 12% de teor de água).

Os coeficientes de correlação obtidos das amostras MP e HMPBP demonstraram desempenho idêntico entre os diversos métodos na previsão do módulo de elasticidade estático. Os melhores resultados foram obtidos pela metodologia de vibração longitudinal (0,94), ligeiramente superiores aos obtidos pelos métodos analíticos (0,90). A análise das correlações estabelecidas com a resistência à flexão das vigas MP revelou coeficientes de correlação bastante inferiores aos obtidos pelas vigas BP. Tal facto pode estar relacionado com a rotura precoce de 2 vigas que conduziram a valores de resistência à flexão bastante díspares da restante amostra. Em relação às vigas HMPBP, os coeficientes de correlação foram idênticos, contudo há que referir a menor dimensão das amostras quando comparados com a amostra BP.

5.6 Avaliação da qualidade de colagem

Após a determinação das propriedades mecânicas à flexão por via de ensaios estáticos que conduziram à rotura de cada viga, foi verificada a qualidade da colagem de cada viga. Assim, de cada viga procurou-se obter pelo menos 1 provete para ensaio de delaminação e 1 provete para ensaio de resistência ao corte segundo a EN 14080 (2013).

5.6.1 Ensaios de delaminação

Os ensaios de delaminação foram realizados seguindo o protocolo de ensaio considerado aquando do estudo da viabilidade de colagem de face (ver Capítulo 3) das espécies consideradas no presente capítulo (Método A – Anexo C da EN 14080). Os resultados obtidos dos ensaios de delaminação encontram-se listados no Quadro 5.12, para cada amostra estudada e individualizados para cada cola utilizada.

Os resultados confirmaram o bom desempenho de colagem das vigas produzidas e testadas à rotura. No caso das vigas BP, apenas as colas PRF-3 e PUR-1+PR apresentaram provetes com delaminação excessiva (superior a 5%) após o 2º ciclo de ensaio de delaminação. Após o 3º ciclo, não se verificou qualquer provete com valores acima de 10% para a generalidade das colas, cumprindo com os limites máximos estabelecidos na EN 14080 (2013).

Quadro 5.12 – Resumo dos resultados dos ensaios de delaminação e resistência ao corte das vigas ensaiadas à flexão

Amostra	Cola	Delaminação total (máximo individual) (%)			Resistência ao corte		
		Número de provetes	2º ciclo	3º ciclo	Número de provetes	Resistência ao corte (MPa)	WFP (%)
BP	PRF-1	14	1,0 (2,8)	1,5 (4,3)	53	9,5 (1,3)	99
	PRF-3	8	2,2 (6,3)	2,7 (6,9)	28	9,8 (1,2)	100
	MUF-1	1	0,0 (0,0)	0,0 (0,0)	4	9,3 (0,7)	96
	PUR-1+PR	13	3,0 (9,0)	3,6 (9,7)	47	9,8 (1,1)	98
MP		11	0,8 (2,1)	0,9 (2,3)	38	12,0 (1,5)	97
HMPBP	PUR-1+PR	12	1,0 (2,9)	1,2 (3,0)	42	10,6 (1,4)	98
BG		8	82,6 (92,6)	86,2 (93,7)	32	16,1 (2,0)	73
HBGBP		4	17,7 (34,5)	18,4 (34,7)	14	10,1 (1,8)	90

Nota: Os valores apresentados a vermelho correspondem a valores médios acima dos limites estabelecidos pela EN 14080 (2013). Valores a negrito correspondem a situações em que se verificaram 2 ou mais provetes com delaminação total excessiva.

Relativamente à cola PRF-3, verificou-se que dos 3 provetes com delaminação excessiva, 2 deles pertenciam à mesma viga (BP13). A análise do modo de rotura da referida viga demonstra ainda assim que o desempenho da colagem não influenciou a rotura da viga, que ocorreu numa zona com nós na lamela inferior e não teve propagação pela linha de cola (Figura 5.18). Todos os restantes elementos com delaminação excessiva após o 2º ciclo pertenciam a vigas de onde se obteve outro provete com desempenho adequado no ensaio de delaminação (inferior a 5% após o 2º ciclo). De referir também que as vigas onde se registaram provetes com delaminação excessiva após o 2º ciclo, apresentaram teor de água inferior a 15% apesar do teor de água das lamelas se situar entre 10,3% e 17,9%.

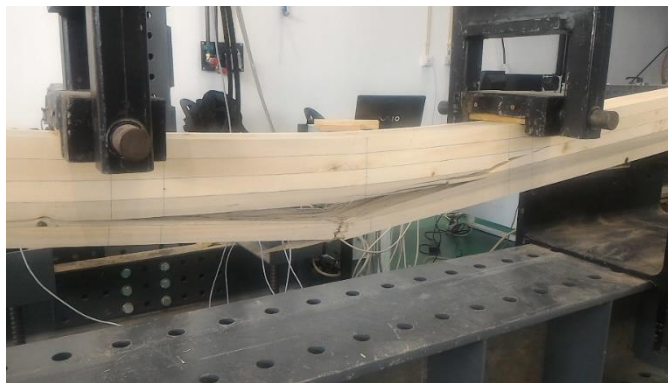


Figura 5.18 – Rotura da viga BP13 não condicionada pela qualidade de colagem

Nas vigas MP e HMPBP não foram verificados quaisquer problemas de delaminação excessiva, como seria de esperar na colagem de face Pinho bravo – Pinho bravo (ver Quadro 3.5). Relativamente à colagem de face entre Pinho bravo e Choupo, não se verificaram problemas de delaminação excessiva, tendo-se registado apenas algumas delaminações pontuais que conduziram a uma delaminação máxima por linha de cola de 11,1%, bastante inferior ao limite máximo estabelecido de 30%.

No que diz respeito à colagem de face nas vigas BG e HBGBP, não foram cumpridos os limites estipulados para resinosas e Choupo, pela norma EN 14080 (2013). Os valores obtidos foram bastante elevados, confirmando a necessidade de desenvolvimentos futuros ao nível dos parâmetros de colagem, nomeadamente através da aplicação de outras formulações de primários, como por exemplo os primários HMR e n-HMR considerados no estudo de Lampreia (2010) para a colagem de Pinho bravo e Lopez-Suevos e Richter (2009) para colagem de Eucalipto (*Eucalyptus globulus* Labill.). Note-se que nas colagens realizadas no presente estudo com Eucalipto, foi aplicado previamente à cola, um primário desenvolvido especificamente para colagem de Eucalipto (PR 3105), seguindo os processos descritos pela ficha técnica do primário.

Apesar do inadequado desempenho observado na colagem de face de Eucalipto, as roturas das vigas à flexão não demonstraram terem sido influenciadas pelo mesmo. Verificou-se, ainda assim, a propagação pontual das linhas de rotura ao longo das linhas de cola intermédias (Figura 5.19). De referir que nos ensaios de delaminação, foram registados valores de delaminação máxima por linha de cola de aproximadamente 100%, bastante superior ao limite máximo de 30% estabelecido na EN 14080 (2013).



Figura 5.19 – Rotura da viga BG2 – propagação pontual da rotura ao longo da linha de cola 2

No caso das vigas HBGBP verificou-se um decréscimo acentuado dos valores médios da delaminação total média quando comparado com as vigas BG. Este decréscimo é devido em grande parte ao bom desempenho garantido na colagem de face entre lamelas de Choupo, pois nas linhas de cola de interação do Eucalipto com Choupo verificou-se igualmente um inadequado desempenho.

5.6.2 Ensaios de resistência ao corte

Os ensaios de corte seguiram o procedimento descrito no Capítulo 3, aquando da verificação da viabilidade de colagem de face das espécies em estudo. De cada viga foram obtidos 1 ou 2 provetes para ensaio, consoante o modo de rotura da viga. Os resultados obtidos encontram-se listados no Quadro 5.12.

Os resultados confirmam o bom desempenho das diferentes colas na colagem de face de Choupo, apesar de serem ligeiramente inferiores aos registados na análise de viabilidade de colagem (Capítulo 3). Igualmente os valores de percentagem de rotura pela madeira encontram-se muito próximos de 100%, o que é um indicador claro da qualidade de colagem, como se verificou também pelos resultados dos ensaios de delaminação.

Os resultados obtidos das vigas MP confirmam também os registados no estudo de viabilidade de colagem de face de Pinho bravo com a cola PUR-1+PR apesar de uma ligeira redução ao nível da resistência ao corte. Quanto aos resultados dos provetes obtidos das vigas HMPBP, verificou-se um valor de resistência ao corte intermédio comparativamente às vigas MP e BP. A análise individual das linhas de cola das vigas HMPBP corroborou a constatação anterior, uma vez que a resistência ao corte média das linhas de cola (MP-MP) foi de 12,3 MPa, ao passo que na interação MP-BP se obteve o valor de 10,3 MPa e nas linhas de cola BP-BP foi de 10,0 MPa.

O desempenho das linhas de cola das vigas BG foi significativamente diferente, apresentando um valor de resistência ao corte médio de 16,1 MPa. Contudo, e como constatado anteriormente, a percentagem de rotura pela madeira corroborou o inadequado desempenho à delaminação, tendo-se medido um valor médio de 73%. Verificou-se inclusive 2 linhas de cola com valores inferiores a 20%.

Nas vigas HBGBP, o valor de WFP foi de 90%, tendo-se verificado um excelente desempenho das linhas de cola 2 e 3 (interação BP-BP) e um desempenho menos bom, resultante da interação BG-BP (WFP médio de 80%). Uma análise detalhada das linhas de cola BP-BP e BG-BP demonstrou ainda assim resultados ligeiramente superiores na interação BG-BP (10,4 MPa) em relação à interação BP-BP (9,7 MPa). A Figura 5.20 apresenta a dispersão de resultados registados para as diferentes amostras consideradas em termos de resistência ao corte e WFP.

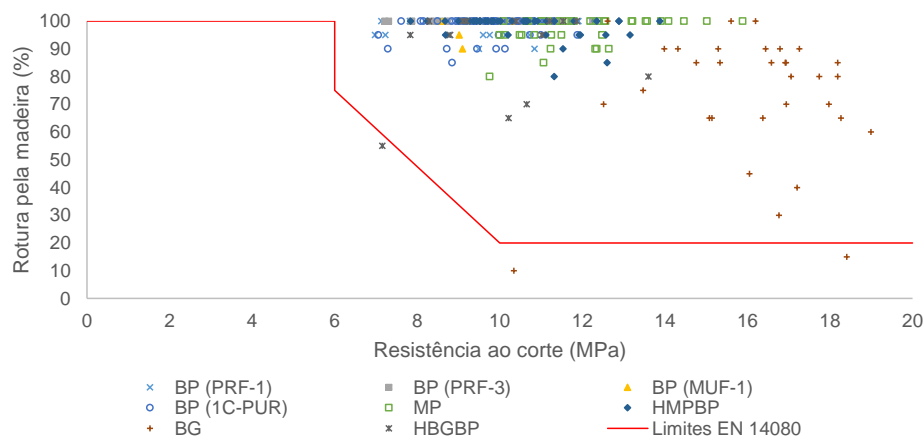


Figura 5.20 – Resultados da resistência ao corte e percentagem de rotura pela madeira

Da análise da Figura 5.20 é possível verificar que não foram cumpridos os limites mínimos definidos pela EN 14080 (2013) apenas em 3 linhas de cola. As referidas linhas de cola pertencem a provetes obtidos das vigas BG (2 linhas de cola) e HBGBP (1 linha de cola), sendo que a da viga HBGBP a linha de cola que não cumpriu com os requisitos estabelecidos diz respeito à interação BG-BP.

5.7 Conclusões

O presente capítulo teve como principal objetivo a avaliação das propriedades mecânicas de vigas de MLC constituídas por uma só espécie e/ou por duas espécies combinadas entre si. Para tal foram consideradas amostras das espécies Choupo, Pinheiro bravo e Eucalipto sob a forma de tábuas, perfazendo um total de 210 tábuas. Cada tábua foi alvo de caracterização não destrutiva através do método de vibração longitudinal, de modo a aferir

o seu módulo de elasticidade dinâmico. A partir do referido parâmetro foi definida a composição de cada viga seguindo o princípio da distribuição das lamelas com maior E_{dyn_1} nas camadas externas procurando a simetria de valores na secção transversal.

No total foram produzidas em laboratório 42 vigas (21 BP, 7 MP, 7 HMPBP, 4 BG e 3 HBGBP) de dimensões finais aproximadas $92 \times 120 \times 2400 \text{ mm}^3$ (largura x altura x comprimento). Os valores individuais de E_{dyn_1} obtidos para cada lamela foram utilizados em dois métodos analíticos para previsão das propriedades mecânicas à flexão mais relevantes (módulo de elasticidade e resistência à flexão), nomeadamente o método da secção transformada (E_{dyn_TSM}) e o método baseado na teoria da viga de Timoshenko (E_{dyn_TIMO}). Anteriormente aos ensaios de flexão estática, foi novamente aplicado o método de vibração longitudinal a cada viga (E_{dyn_v}).

Os métodos analíticos produziram resultados semelhantes entre si e ligeiramente superiores aos valores obtidos nos ensaios de flexão estática. É de referir que para situações como a considerada, em que ocorrem três zonas de rigidez distintas, o processo de cálculo é mais simples no método da secção transformada. Por outro lado, no caso de se procurar o fabrico de vigas com diferentes configurações e com assimetria de secção transversal, o método baseado na teoria da viga de Timoshenko poderá ser mais apurado. Verificou-se igualmente que o método da vibração longitudinal não prevê de forma adequada o módulo de elasticidade aquando da disposição inadequada das lamelas na secção transversal (menor rigidez nas lamelas exteriores da secção transversal), como foi exemplo a viga BP8. Através da análise de regressão linear simples foi possível atestar o potencial de aplicação dos métodos analíticos, com coeficientes de correlação superiores a 0,9 para o módulo de elasticidade estático. O método de vibração longitudinal aplicado às vigas apresentou igualmente boa capacidade de previsão do módulo de elasticidade estático, apesar dos valores de coeficiente de correlação ligeiramente inferiores nas vigas BP e BG.

Dos resultados obtidos experimentalmente verificou-se um comportamento interessante nas vigas BP, cujo valor médio de resistência à flexão foi 52,5 MPa, foi próximo do obtido pela amostra MP (58,5 MPa). Este resultado é promissor tendo em conta que o módulo de elasticidade estático da amostra BP apresentou valores bastante inferiores (cerca de 2,7 GPa), tal como a massa volúmica média (corrigida para 12% de teor de água) que foi de 424 kg/m^3 para as vigas BP e 629 kg/m^3 para as vigas MP.

O comportamento mecânico das vigas de Eucalipto foi surpreendente, tendo-se obtido valores bastante superiores aos apresentados geralmente por espécies resinosas e até mesmo por espécies folhosas emergentes no fabrico de lamelado colado europeu, como é o caso da Faia. No entanto, é de referir a inadequada qualidade de colagem de face. Este

deverá ser um campo de desenvolvimento futuro, de modo a aproveitar todo o potencial que a espécie apresenta para este tipo de produto.

A combinação de duas ou mais espécies no mesmo elemento tem vindo a ser considerada em alguns trabalhos de investigação da área, pelo que no presente trabalho se procurou avaliar o desempenho de duas combinações de espécies: Pinheiro bravo com Choupo (HMPBP) e Eucalipto com Choupo (HBGBP). Relativamente à combinação HMPBP foram consideradas 2 configurações: i) HMPBP-1 – 2 lamelas de Pinho bravo nas camadas externas e 3 lamelas de Choupo nas camadas interiores e ii) HMPBP-2 – 2 camadas de Choupo posicionadas nas camadas superiores (compressão) e 3 lamelas de Pinho nas camadas inferiores (tração). Os resultados obtidos foram interessantes do ponto de vista do comportamento mecânico devido à obtenção de elementos com menor massa volúmica (em relação às vigas MP), mas com ganhos significativos em termos de propriedades mecânicas quando comparado com as vigas BP, nomeadamente até 23,3% para o módulo de elasticidade e até 14,8% para a resistência à flexão. De realçar também a significativa redução dos coeficientes de variação associados a ambas as propriedades.

Das 2 configurações consideradas, a HMPBP-2 apresentou um desempenho interessante ao nível da deformação, apresentando deformações fora do comportamento elástico linear tipicamente associado à rotura da madeira. Este desempenho foi igualmente verificado nas vigas BP em que o valor de E_{dyn_1} da lamela superior (posicionada à compressão) era superior a 10500 MPa. A análise visual das vigas nas lamelas em compressão permitiu detetar a ocorrência de pregas de compressão maioritariamente localizadas no terço central da viga.

A combinação HBGBP (2 lamelas de Eucalipto nas camadas exteriores e 3 lamelas de Choupo no interior) apresentou propriedades mecânicas bastante interessantes para um patamar de massa volúmica média ligeiramente superior às vigas MP (4,8%). Por comparação com as vigas MP, os valores obtidos foram 43,1% superiores no que se refere ao módulo de elasticidade estático e 55,6% superiores na resistência à flexão. Em comparação com as vigas BP, a massa volúmica média das vigas HBGBP foi 55,4% superior, refletindo-se em valores 78,4% e 73,3% superiores, respetivamente, para o módulo de elasticidade e resistência à flexão. Foram igualmente registadas deformações significativas fora do comportamento elástico linear, bem como a ocorrência de pregas na lamela superior. O desempenho da colagem de face Eucalipto – Choupo não cumpriu os requisitos normativos para as espécies resinosas, pelo que trabalhos futuros deverão ser realizados de modo a potenciar a utilização deste tipo de solução de viga de madeira lamelada colada.

6 MODELAÇÃO NUMÉRICA DE VIGAS DE MADEIRA LAMELADA COLADA

6.1 Introdução

A análise com recurso a modelos de elementos finitos tornou-se popular na investigação do comportamento mecânico de elementos estruturais, uma vez que é globalmente, mais eficiente e menos dispendiosa em termos de tempo e recursos quando comparada com os ensaios experimentais. A utilização de modelos de elementos finitos tem como principal vantagem a realização de estudos paramétricos com base nos modelos definidos e validados por via de ensaios experimentais. Embora os modelos de elementos finitos não substituam os ensaios experimentais, podem no entanto conduzir a um decréscimo do número de ensaios experimentais necessários. De referir que o modelo descrito no presente capítulo teve como dados de entrada os resultados obtidos experimentalmente.

Tendo como objetivo uma mais clara perceção sobre o comportamento das vigas procurou-se no presente capítulo desenvolver um modelo de elementos finitos simples e capaz de representar o comportamento mecânico experimental das vigas das várias espécies.

Seguidamente é apresentado o estado da arte relativo a estudos anteriores de modelação em elementos finitos do comportamento mecânico de vigas de madeira lamelada colada. Posteriormente é descrito o modelo desenvolvido e as diversas considerações tidas no seu desenvolvimento, bem como a caracterização do comportamento das espécies à compressão e à tração.

Finalmente são apresentados os resultados obtidos do modelo numérico, bem como a comparação com os resultados obtidos experimentalmente.

6.2 Estado da arte

Na bibliografia encontram-se disponíveis estudos cujo objetivo foi o desenvolvimento de modelos numéricos para descrever o comportamento de vigas de MLC perante a influência de diversos parâmetros relacionados com a produção de vigas e/ou estimar as respetivas propriedades mecânicas. Frese e Blass, (2005, 2006) realizaram estudos para determinação de classes de resistência de MLC de Faia, tendo para tal conduzido uma campanha experimental de caracterização de tábuas através da vibração longitudinal, caracterização mecânica de *finger joints* e modelação numérica em elementos finitos de vigas para

estabelecer equações que relacionem o valor característico da resistência à flexão com as restantes propriedades.

A determinação das propriedades mecânicas de vigas de MLC tem sido considerada também por outros autores, nomeadamente para análise da influência de defeitos de fabrico, tais como a deficiente colagem (Kessel e Guenther, 2006). Também a modelação da rotura dos *finger joints* em vigas de MLC foi avaliada por Serrano et al. (2001) que utilizaram simulações de Monte Carlo e a consequente modelação através de modelos de elementos finitos.

Gaspar et al. (2015) avaliaram o efeito da delaminação das linhas de cola no comportamento mecânico de vigas de MLC. Os autores verificaram através da modelação por via de elementos finitos que a delaminação não simétrica pode conduzir a problemas de instabilidade lateral, aumentando significativamente os esforços e deformações. Concluíram também que a ocorrência de delaminação não é relevante em elementos ou zonas do elemento cujos esforços de corte são reduzidos, em particular quando ocorre de forma simétrica na secção transversal. Por fim, concluíram que se a delaminação ocorrer em mais de 60% de profundidade do elemento pode ser considerado como um ponto de viragem colocando a integridade estrutural do elemento em risco.

O comportamento mecânico dos elementos estruturais de madeira é regra geral associado a comportamento linear até à rotura. Contudo, estudos recentes têm apresentado a análise experimental e numérica da ductilidade de vigas de MLC. No estudo conduzido por Cizmar et al. (2014) pretenderam analisar os modelos existentes para definição do nível de ductilidade para a madeira enquanto material estrutural à flexão. Para tal, os autores consideraram 3 vigas com 4,2 m, classificadas como GL24h. Foram inicialmente conduzidos ensaios de flexão com dois vãos de 2,0 m e carregamento pontual em cada vão, permitindo a análise do comportamento não só nos dois vãos como também no apoio central.

A análise numérica foi conduzida com recurso ao *software* Abaqus CAE, tendo-se definido lamelas separadas de 4 cm de espessura cada, perfazendo uma secção transversal de 20 cm x 12 cm (altura x largura). Das 3 vigas ensaiadas experimentalmente foi observado comportamento elástico linear até à rotura na parte tracionada. Na parte comprimida, só foi registada plastificação na viga GR3 (meio vão e apoio central). A análise comparativa entre os resultados experimentais e o modelo numérico demonstrou boa correspondência, contudo o modelo numérico inicial apontou para a ausência de ductilidade nos elementos. Os autores desenvolveram um novo modelo cujas propriedades mecânicas foram obtidas de ensaios experimentais em provetes de madeira limpa. No segundo modelo numérico registaram uma ductilidade mínima ($D=1,3$) relacionada com madeira de melhor qualidade

em que se verificou a resistência à tração paralela às fibras duas vezes superior à resistência à compressão paralela às fibras. De acordo com Cizmar et al. (2014) os modelos cuja ductilidade estava contemplada não são aplicáveis dado que a mesma foi insignificante.

Kandler et al. (2015) desenvolveram uma proposta de modelo numérico capaz de considerar a distribuição da rigidez longitudinal das lamelas, tendo comparado os resultados obtidos com resultados experimentais de flexão em 50 vigas de Espruce norueguês. A fiabilidade do modelo foi avaliada com base na correlação entre propriedades, tendo obtido coeficiente de correlação de 0,93 entre os valores de módulo de elasticidade do modelo numérico (baseado no modelo micromecânico da madeira) e os valores experimentais. A relação entre modelo numérico (rigidez dinâmica longitudinal das lamelas) e a rigidez dinâmica das vigas foi bem reproduzida segundo os autores ($r = 0,94$).

Em Kandler et al. (2018) são apresentados os resultados dos ensaios de resistência à flexão em 50 vigas e o consequente desenvolvimento de modelos simplificados para previsão da resistência à flexão. Os autores apresentam um modelo que consiste numa relação linear (Equação 6.1) que considera como dados de entrada o valor mínimo de módulo de elasticidade, $\min(E(x))$, registado entre pontos de aplicação de carga e a altura da secção transversal da viga (h).

$$\hat{f}_b = c_0 + c_1 \min(E(x)) - c_2 h \quad (6.1)$$

em que c_0 toma o valor de 29,2 MPa, c_1 é considerado o valor de 0,002 e c_2 toma o valor de -0,034 MPa.

Kandler et al. (2018) estabeleceram correlações simples entre a resistência à flexão e a previsão da mesma tendo por base o modelo simplificado ($r = 0,79$). A correlação com o modelo baseado no perfil de rigidez desenvolvido em Kandler et al. (2015) conduziu ao coeficiente de correlação de 0,71. Os autores referem por fim que para estabelecer uma previsão fiável é necessário o desenvolvimento de modelos mais sofisticados.

Com o objetivo de estabelecer relações eficientes entre os valores característicos de resistência à flexão de vigas de Espruce, Frese et al. (2010a) desenvolveram um modelo numérico considerando como dados de entrada os valores experimentais de resistência à tração de lamelas e de *finger joints*. A comparação dos valores característicos de resistência à flexão obtidos pelo modelo com os experimentais revelaram diferenças máximas de 6%, o que indica que o modelo desenvolvido permite determinar com segurança os valores característicos de resistência à flexão. Frese et al. (2010b) consideraram a análise da relação da resistência à flexão com a resistência à tração de viga de MLC, tendo obtido um coeficiente de correlação de 0,88.

No estudo realizado por Gao et al. (2015) desenvolveu-se um modelo numérico de elementos finitos para simular o comportamento mecânico de 10 vigas de Choupo chinês. As simulações conduzidas revelaram valores semelhantes aos valores experimentais. A sustentar a qualidade do modelo desenvolvido são os erros obtidos que variaram entre 2,8% e 9,0% para o módulo de elasticidade e entre -3,9% e -5,4% para a resistência à flexão.

6.3 Definição do modelo

6.3.1 Caracterização do modelo

Com o objetivo de descrever numericamente o comportamento mecânico das vigas foi desenvolvido neste trabalho um modelo de elementos finitos com recurso ao *software* comercial ABAQUS CAE. O modelo considerou uma secção transversal retangular com as dimensões nominais de 92 x 120 x 2300 mm (largura x altura x comprimento), dimensões aproximadas às reais das vigas ensaiadas à flexão e descritas no Capítulo 5. O modelo procurou descrever de forma simplificada a constituição de cada viga, contemplando 5 lamelas por viga de espessura igual a 24 mm cada (Figura 6.1).

6.3.1.1 Seleção do elemento finito

O elemento finito escolhido foi o elemento sólido (C3D8R). O C3D8R é definido como hexaedro contínuo de 8 nós por elemento com integração reduzida por controlo no sentido dos ponteiros do relógio e interpolação de primeira ordem. Este elemento possui três graus de liberdade por nó, que correspondem às translações nas três direções.

6.3.1.2 Definição da malha

A precisão dos modelos de elementos finitos é dependente do tamanho da malha definida. No presente modelo foi considerada uma malha de aproximadamente 12 mm, ilustrada na Figura 6.1. A dimensão da malha foi definida tendo como base a divisão da espessura da lamela em 2 elementos. Uma divisão superior (4 elementos) não permitia executar a análise por exceder o número de nós limite da versão do software disponível.

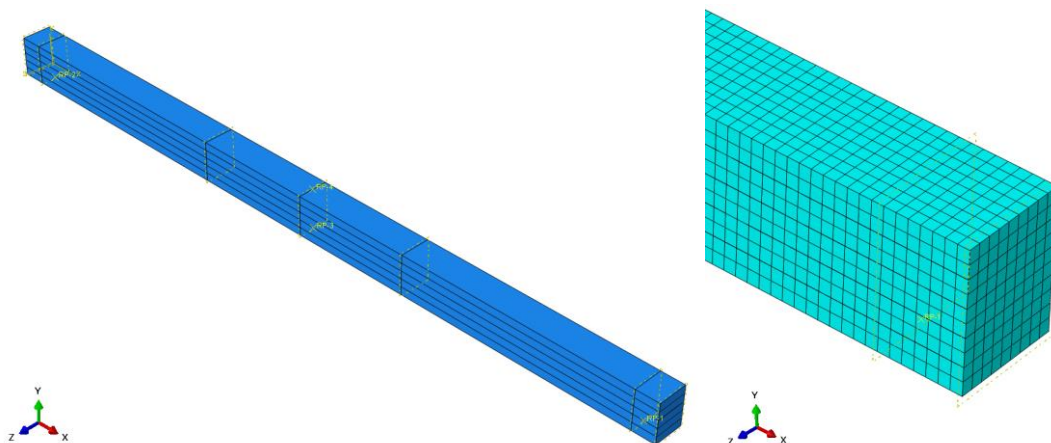


Figura 6.1 – Viga modelada em software Abaqus (à esquerda) e pormenor da malha (à direita)

6.3.1.3 Definição do carregamento, das condições de fronteira e de contacto entre lamelas

O modelo desenvolvido consistiu na conceção de viga simplesmente apoiada, representando o sistema de ensaio considerado no Capítulo 4 (2 apoios e 2 pontos de aplicação de carga). Os apoios foram considerados rotulados com bloqueio das 3 direções de translação num dos apoios e bloqueio de 2 direções (vertical e transversal ao eixo) no outro apoio.

A interação/contacto entre lamelas adjacentes foi considerada por simplificação como rígida, através da criação de nós de ligação entre as superfícies de ambas as lamelas. Na definição do contacto entre lamelas foi definida como superfície dominante a correspondente à lamela com E_{dyn_1} superior.

O carregamento definido no modelo seguiu o procedimento definido no ensaio experimental. Foi considerada uma análise incremental, por via de incrementos de um deslocamento de 0,333 mm/s, correspondente à aplicação de um deslocamento de 100 mm igual nos 2 pontos de carga definidos no modelo ao fim de 300 segundos. Nos modelos das vigas cuja deformação última excedeu os 100 mm foi considerado um deslocamento de 200 mm. Deste modo, foi possível replicar as condições de carregamento a que cada viga foi submetida experimentalmente, seguindo o esquema de ensaio definido na EN 408 (2012).

6.3.1.4 Definição das propriedades do material

A caracterização do material considerado no modelo teve em conta três parâmetros: i) massa volúmica; ii) comportamento elástico e iii) comportamento plástico do material.

A madeira é considerada um material anisotrópico, que por simplificação se considerou como ortotrópico com três planos de simetria, definidos através das três direções principais: longitudinal (L), radial (R) e tangencial (T). Para a definição do comportamento elástico do material consideraram-se três propriedades, nomeadamente: i) módulo de elasticidade (E); ii) módulo de distorção (G) e iii) coeficientes de Poisson (ν). Os valores de E e G podem ser obtidos da consulta da EN 14080 (2013), tanto para a direção paralela às fibras ($E_{0,mean}$ e $G_{0,mean}$), como para a direção perpendicular às fibras ($E_{90,mean}$ e $G_{90,mean}$). Nesta norma são listados os valores para as diferentes classes de resistência de madeira lamelada colada (combinada e homogénea) validada para espécies resinosas e Choupo, definindo os valores de 300 MPa para E_R e E_T , e 650 MPa para o módulo de distorção (G_{LR} e G_{LT}). A realização de simulações para as vigas MP e HMPBP resultou em valores de módulo de elasticidade bastante inferiores aos obtidos experimentalmente, traduzindo-se em erros absolutos médios de 20,8% para as vigas MP e 18,7% para as vigas HMPBP.

Considerou-se portanto a consulta de resultados de estudos disponíveis na literatura relativos a espécies resinosas (Bodig e Jayne, 1993) e em particular de Pinho bravo (Xavier et al., 2004) (Quadro 6.1). Verificou-se uma diferença significativa entre as percentagens apresentadas pela EN 14080 (2013) e os estudos relativos a resinosas, em particular em relação ao Pinho bravo. Em relação às constantes elásticas do Choupo, verificou-se a inexistência de valores de referência determinados em publicações cujo objeto de estudo tenha sido o Choupo com crescimento em países da Europa (condições climáticas mais aproximadas às de Portugal). Deste modo, foi consultado o WoodHandbook (Kretschmann, 2010) considerando-se as relações Propriedade/ E_L de referência para as espécies *Yellow-Poplar* e *Cottonwood (eastern)* (Quadro 6.1).

Quadro 6.1 – Relação entre módulo de elasticidade e entre módulo de distorção e módulo de elasticidade longitudinal

Espécie	Fonte	E_R/E_L (%)	E_T/E_L (%)	G_{LR}/E_L (%)	G_{LT}/E_L (%)	G_{RT}/E_L (%)
Resinosas	Bodig e Jayne (1993)	8,0	5,0	7,1	6,7	0,7
GL24c	EN 14080 (2013)	2,7	2,7	5,9	5,9	0,6
Pinho bravo	Xavier et al. (2004)	12,6	6,7	9,3	8,1	1,9
Cottonwood, eastern	Kretschmann, (2010)	8,3	4,7	7,6	5,2	-
Yellow-Poplar	Kretschmann, (2010)	9,2	4,3	7,5	6,9	1,1
Folhosas	Guitard (1987)	12,6	7,2	8,8	6,7	2,5
D40	EN 338 ()	6,8	6,8	6,4	6,4	-
Eucalipto	Crespo et al. (2017)	9,8	3,8	9,4	-	-

Em relação às espécies folhosas é de referir a ausência de normas relativas à produção de madeira lamelada colada. Nota-se assim a ausência de valores de referência ao nível de propriedades mecânicas, pelo que se apresentam os valores das constantes elásticas obtidas

para madeira serrada, nomeadamente para o Eucalipto (*Eucalyptus globulus* Labill.) obtidas por Crespo et al. (2017). No entanto, algumas das propriedades não foram consideradas naquele estudo, pelo que foram tidos em conta também os valores obtidos do estudo conduzido por Guitard (1987), que caracterizou mecanicamente diversas folhosas com massa volúmica média de 650 kg/m^3 (Quadro 6.1). Segundo Crespo et al. (2017) a madeira serrada de Eucalipto é considerada como D40 pela EN 1912 (2013), pelo que são igualmente apresentados os valores relativos às relações determinadas a partir da classe de resistência D40 obtidos da EN 338 (2003).

No Quadro 6.2 encontram-se listados diversos valores de coeficientes de Poisson obtidos para conjuntos de espécies resinosas (Bodig e Jayne, 1993 e Green et al., 1999), bem como valores específicos para o Pinho bravo (Xavier et al., 2004) e adoptados para modelação de elementos finitos por Gaspar (2010). São apresentados também valores de referência para duas espécies de Choupo comercializadas na América do Norte, nomeadamente o Cottonwood e o Yellow-Poplar (Kretschmann, 2010). Para o Eucalipto foram encontrados valores obtidos experimentalmente por Crespo et al. (2017). O estudo de Guitard (1987) abordou um conjunto de espécies folhosas com massa volúmica média de 650 kg/m^3 .

Quadro 6.2 – Coeficientes de Poisson disponíveis na literatura

Espécie	Fonte	ν_{LR}	ν_{LT}	ν_{RT}	ν_{TR}	ν_{RL}	ν_{TL}
Resinosas	Bodig e Jayne (1993)	0,370	0,420	0,470	0,350	0,041	0,033
	Green et al. (1999)	0,340	0,360	0,420	0,350	0,040	0,025
Pinho bravo	Xavier et al. (2004)	0,470	0,051	0,590	-	-	-
	Gaspar (2010)	0,400	0,400	0,400	0,400	0,035	0,035
Cottonwood, eastern	Kretschmann (2010)	0,344	0,420	0,875	0,292	0,043	0,018
Yellow-Poplar		0,318	0,392	0,703	0,329	0,030	0,019
Folhosas	Guitard (1987)	0,390	0,460	0,670	0,380	0,048	0,033
Eucalipto	Crespo et al. (2017)	0,424	0,599	0,688	-	0,036	-

Tendo como base os valores disponíveis na literatura e nas normas em vigor, foram adotados para as constantes elásticas das espécies Pinheiro bravo, Choupo e Eucalipto, os valores listados no Quadro 6.3.

Quadro 6.3 – Resumo das constantes elásticas (E, G, ν) consideradas como *input* ao modelo numérico de elementos finitos

Espécie	Módulo de elasticidade			Módulo de distorção			Coeficientes de Poisson					
	E_L	E_R/E_L (%)	E_T/E_L (%)	G_{LR}/E_L (%)	G_{LT}/E_L (%)	G_{RT}/E_L (%)	ν_{LR}	ν_{LT}	ν_{RT}	ν_{TR}	ν_{RL}	ν_{TL}
Pinheiro bravo	$E_{dyn,l}$	12,60	6,70	9,30	8,10	1,90	0,400	0,400	0,400	0,400	0,035	0,035
Choupo	$E_{dyn,l}$	8,75	4,50	7,55	6,05	1,10	0,331	0,406	0,789	0,311	0,037	0,019
Eucalipto	$E_{dyn,l}$	9,80	3,80	9,40	6,70	2,50	0,424	0,599	0,688	0,380	0,036	0,033

De referir que na definição dos valores a introduzir no modelo numérico relativos ao módulo de elasticidade longitudinal (E_L), foi considerado o valor E_{dyn_1} , determinado experimentalmente (ver 5.3). Esta opção foi transversal para todas as vigas modeladas, independentemente da espécie.

De referir também que os valores de coeficientes de Poisson adotados para o Choupo resultaram da média dos valores apresentados para as duas espécies de Choupo (*Cottonwood* e *Yellow-Poplar*) (Kretschmann, 2010). Em relação ao Eucalipto, consideraram-se os valores apresentados por Crespo et al. (2017), sendo que na ausência de valores no referido estudo se optou pelos valores obtidos por Guitard (1987).

6.3.2 Caracterização mecânica à tração – Tensão vs extensão

O comportamento experimental das vigas consideradas no Capítulo 5 revelou deformações fora do regime elástico linear, até atingir a carga de rutura. Assim, para melhor definição do comportamento do modelo em desenvolvimento foram realizados ensaios de caracterização mecânica das três espécies, de modo a obter curvas tensão vs extensão, em tração, em provetes de madeira limpa.

A caracterização da curva tensão vs extensão à tração foi realizada a partir de provetes isentos de defeitos, com origem no remanescente das vigas ensaiadas à rotura. Assim, de cada viga ensaiada separou-se a lamela inferior, posicionada à tração no ensaio de flexão, das restantes lamelas. Do conjunto das 42 vigas, algumas apresentaram roturas no ensaio de flexão que não permitiram a obtenção de lamela com comprimento útil para extrair provete para ensaio à tração.

De acordo com a literatura disponível, a configuração dos provetes não segue um critério rígido, seguindo regra geral a configuração apresentada na norma NBR-7190 (ABNT, 1997) cuja seção principal é de 20 mm x 50 mm com redução de espessura no trecho central para 7 mm. O comprimento do provete definido é de 450 mm com comprimento de amarração em ambos os topos de 120 mm. Feio et al. (2005) conduziram um estudo de caracterização de madeira limpa de Castanho em que adotou 2 configurações, considerando a configuração estabelecida pela NBR 7190 (ABNT, 1997) e uma outra com dimensões inferiores, no que ao comprimento de amarração diz respeito. Brites et al. (2012) realizaram um estudo de caracterização de elementos em serviço através de ensaios de tração em madeira limpa de Pinho bravo e Castanho. Também neste estudo foram adotadas duas configurações de provetes, sendo que uma seguiu as dimensões referidas na NBR 7190 (ABNT, 1997) e a outra configuração apresentou um perfil diferente com espessura constante e dimensões inferiores.

Das tábuas recolhidas das vigas ensaiadas à rotura verificaram-se algumas limitações na obtenção dos provetes, nomeadamente: i) comprimento máximo da tábua; ii) comprimento longitudinal isento de defeitos; iii) isenção de fissuras ou outros defeitos com origem na rotura da viga. Tendo em conta as limitações referidas, considerou-se uma configuração do provete idêntica à adotada por Brites et al. (2012), ou seja, espessura constante com redução da largura do elemento de modo a obter um trecho central de secção aproximada 10 mm x 5 mm (largura x espessura). Os provetes foram obtidos com recurso a maquinação em CNC (*Computer Numerical Control*). No total foram obtidos 35 provetes: 20 de Choupo, 11 de Pinho bravo e 4 de Eucalipto. As dimensões e configuração dos provetes são esquematizadas na Figura 6.2.

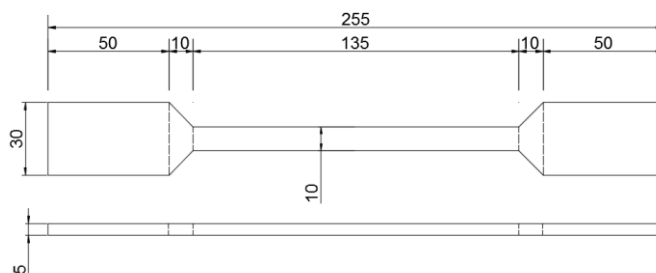


Figura 6.2 – Dimensões nominais (mm) dos provetes para ensaios de tração paralela às fibras

Os ensaios foram realizados em controlo de deslocamento com velocidade de 0,015mm/s. A força aplicada no provete foi medida através de célula de carga de 50 kN de capacidade máxima. As deformações ocorridas foram medidas com recurso a um extensómetro axial mecânico (Epsilon, modelo 4292) (Figura 6.3). A carga e a deformação ocorridas durante o ensaio foram registadas a cada 0,1s. Para melhor ajuste entre as garras de fixação e os provetes, na zona de fixação foram coladas folhas de lixa para madeira com dimensão igual à área de contacto.

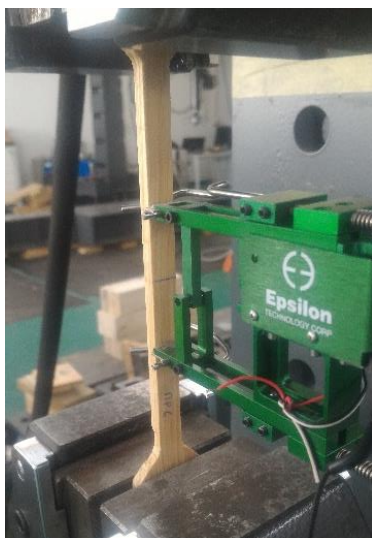


Figura 6.3 – Provete de madeira limpa instrumentado para ensaio de tração paralela às fibras

Das curvas tensão vs extensão foram determinados o módulo de elasticidade e a resistência à tração dos provetes, através da Equação 6.2 e Equação 6.3, respetivamente. Os resultados obtidos dos ensaios dos 35 provetes encontram-se resumidos no Quadro 6.4.

$$E_{t,0} = \frac{\sigma_{t,50\%} - \sigma_{t,10\%}}{\varepsilon_{t,50\%} - \varepsilon_{t,10\%}} \quad (6.2)$$

$$f_{t,0} = \frac{F_{t,max}}{A} \quad (6.3)$$

onde $E_{t,0}$ é o módulo de elasticidade à tração paralela às fibras, $\sigma_{10\%}$ e $\sigma_{50\%}$ são as tensões de tração correspondentes a 10% e 50% da resistência à tração, $\varepsilon_{10\%}$ e $\varepsilon_{50\%}$ são as extensões de tração correspondentes a 10% e 50% da resistência à tração, $f_{t,0}$ é a resistência à tração paralela às fibras, F_{max} é força máxima de tração e A é a área da seção transversal sujeita à tração.

Quadro 6.4 – Resultados dos ensaios de tração: módulo de elasticidade e resistência à tração

	Pinho bravo		Choupo		Eucalipto	
	$E_{t,0}$	$f_{t,0}$	$E_{t,0}$	$f_{t,0}$	$E_{t,0}$	$f_{t,0}$
Média (MPa)	13827,0	85,3	10388,1	69,2	21767,5	130,0
Mínimo (MPa)	10683,0	45,2	6944,0	31,6	18102,8	117,3
Máximo (MPa)	17120,7	128,2	15137,0	101,9	23976,8	148,8
COV (%)	15,8	28,0	22,7	25,9	12,0	10,3
Nº provetes	11		20		4	

Após o ensaio de tração foi identificado o modo de rotura de cada provete, tendo-se verificado 4 tipologias distintas de rotura (Figura 6.4), nomeadamente: a) rotura na zona de amarração, b) rotura por tração na zona central, c) rotura por tração junto à amarração e d) rotura por corte na zona central. Os resultados obtidos foram essencialmente do modo de rotura do tipo a) (68,6%), o que se reflete na obtenção de valores conservativos em relação à real capacidade resistente à tração. O modo de rotura do tipo b) foi observado em 8,6% e por sua vez os modos de rotura do tipo c) e d) foram registados em igual percentagem com 11,4% cada. Apesar dos diferentes modos de rotura, o comportamento foi aproximadamente linear até à rotura.



Figura 6.4 – Tipologias de rotura observadas nos ensaios de tração

Adicionalmente, foi analisado o diagrama tensão-extensão de cada ensaio, de modo a definir o comportamento de cada espécie em tração paralela às fibras. Foi considerada a tensão máxima e os respetivos patamares de tensão para os valores de 10%, 50%, 70%, 90% da tensão máxima de cada provete. No Quadro 6.5 são apresentados os valores obtidos e adotados no modelo de elementos finitos relativos ao comportamento mecânico da madeira à tração (tensão *vs* extensão) para Pinho bravo, Choupo e Eucalipto.

Quadro 6.5 – Valores considerados para definição do comportamento mecânico à tração no modelo de elementos finitos

% Tensão	Pinho bravo		Choupo		Eucalipto	
	Tensão (MPa)	Extensão (%)	Tensão (MPa)	Extensão (%)	Tensão (MPa)	Extensão (%)
10%	8,5	0,062	6,9	0,065	13,0	0,058
50%	42,6	0,311	34,6	0,333	65,0	0,300
70%	59,7	0,433	48,4	0,470	91,0	0,417
90%	76,8	0,556	62,2	0,609	117,0	0,535
100%	85,3	0,621	69,2	0,683	130,0	0,603
Nº provetes	11		20		4	

6.3.3 Caracterização mecânica à compressão – Tensão vs extensão

A ocorrência de deformações fora do comportamento elástico linear tradicional das vigas de madeira, foi evidente em 68% das vigas, tendo sido observadas pregas de compressão na primeira e segunda camada de lamelas dispostas à compressão. Assim, de forma a melhor caracterizar o comportamento do material à compressão para consideração no modelo de elementos finitos, foram realizados ensaios de compressão em madeira limpa (isenta de defeitos) para caracterização da curva tensão vs extensão.

De cada viga foi separada das restantes a lamela posicionada à compressão, obtendo régua com espessura aproximada de 23 mm. Posteriormente cada régua foi submetida ao processo de redução de espessura de modo a obter espessura constante de 20 mm ao longo da mesma.

De acordo com a EN 408 (2012) os provetes para obtenção das propriedades mecânicas à compressão paralela às fibras devem possuir a secção transversal completa e ter um comprimento mínimo de 6 vezes a menor dimensão da secção transversal. Por outro lado, a NBR 7190 (ABNT, 1997) indica as dimensões de 50 mm x 50 mm x 150 mm para provetes de madeira limpa. Refira-se que Feio et al. (2005) adotaram provetes com 50 mm x 50 mm x 100 mm para caracterização mecânica à compressão de madeira de Castanho.

Tendo em consideração as limitações de espessura das tábuas recolhidas, foram considerados provetes com secção transversal de 20 mm x 20 mm e 120 mm de comprimento. De cada tábua foi possível obter 3 provetes, tendo-se optado por ensaiar 1 provete apenas. A escolha do provete teve como critérios a isenção de defeitos e a semelhança entre a massa volúmica dos provetes e a massa volúmica da lamela da qual os provetes foram extraídos.

O ensaio foi realizado em controlo de deslocamento com velocidade de 0,006 mm/s. A força aplicada no provete foi medida através de célula de carga com 50 kN de capacidade máxima. Cada provete foi instrumentado em duas faces opostas/ paralelas com um extensómetro FLKB-6-11 na direção longitudinal (Figura 6.5). Durante o ensaio foi realizada a aquisição de dados, a cada 0,1s, da força e deslocamento do êmbolo do atuador hidráulico para além das extensões em cada face paralela.

Tal como nos ensaios de tração foram igualmente determinados o módulo de elasticidade e a resistência à compressão segundo a NBR 7190 (ABNT, 1997), através da equação 6.4 e 6.5, respetivamente. No total foram realizados 31 ensaios: 20 provetes de Choupo, 6 provetes de Pinho bravo e 5 provetes de Eucalipto. Os resultados obtidos dos ensaios dos 31 provetes encontram-se resumidos no Quadro 6.6.

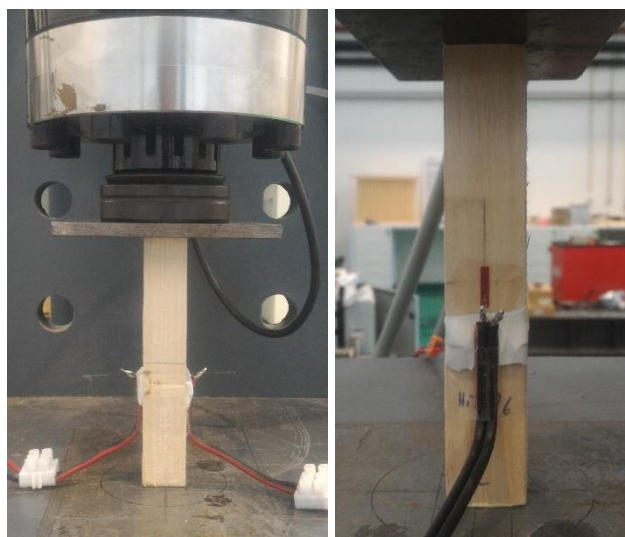


Figura 6.5 – Provede de madeira limpa instrumentado para ensaio de compressão paralela às fibras

$$E_{c,0} = \frac{\sigma_{c,50\%} - \sigma_{c,10\%}}{\varepsilon_{c,50\%} - \varepsilon_{c,10\%}} \quad (6.4)$$

$$f_{c,0} = \frac{F_{c,max}}{A} \quad (6.5)$$

onde $E_{c,0}$ é o módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras, $\sigma_{10\%}$ e $\sigma_{50\%}$ são as tensões de compressão correspondentes a 10% e 50% da resistência à compressão, $\varepsilon_{10\%}$ e $\varepsilon_{50\%}$ são as extensões de compressão correspondentes a 10% e 50% da resistência à compressão, $f_{c,0}$ é a resistência à compressão paralela às fibras, $F_{c,max}$ é força máxima de compressão e A é a área da seção transversal.

Quadro 6.6 – Resultados dos ensaios de compressão: módulo de elasticidade e resistência à compressão

	Pinho bravo		Choupo		Eucalipto	
	$E_{c,0}$	$f_{c,0}$	$E_{c,0}$	$f_{c,0}$	$E_{c,0}$	$f_{c,0}$
Média (MPa)	11888,9	39,8	10154,9	32,7	19201,1	61,5
Mínimo (MPa)	6985,9	28,6	7644,7	28,7	12214,0	57,4
Máximo (MPa)	12285,0	45,4	12285,0	38,3	24709,2	68,5
COV (%)	22,3	15,6	13,8	8,7	26,1	7,0
Nº provetes	6		20		5	

No conjunto de ensaios realizados, verificou-se a ocorrência de diferentes tipologias de rotura (Figura 6.6), nomeadamente: a) esmagamento dos topos, b) formação de cunha junto a um dos topos, c) formação de pregas horizontais na zona central. Verificou-se igualmente que, após atingir a força máxima, as extensões medidas se mantinham praticamente inalteradas, uma vez que as deformações ocorreram regra geral fora da zona de medição dos extensómetros, que abrangiam um pequeno comprimento na zona central do provete.

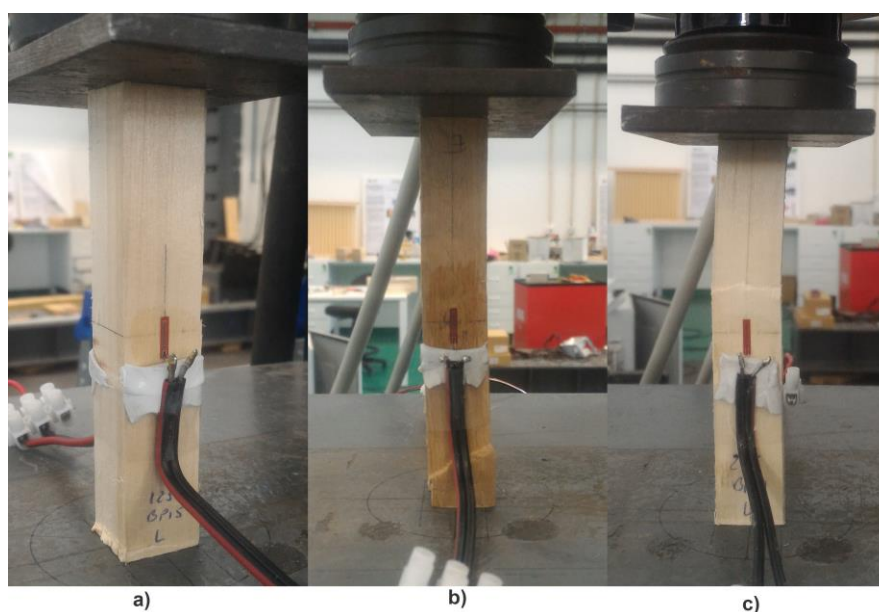


Figura 6.6 – Tipologias de rotura observadas nos ensaios de compressão

A Figura 6.7 ilustra as curvas tensão vs extensão obtidas por via da média dos dois extensómetros e com base no deslocamento do êmbolo do atuador hidráulico. Verifica-se uma diferença significativa no declive das duas curvas, em particular a curva relativa à extensão medida a partir do deslocamento do atuador apresenta um declive significativamente menor. Esta diferença pode em parte ser justificada por um conjunto de deformações adicionais à ocorrida no provete, tais como folgas existentes no dispositivo de aplicação de carga e esmagamento localizado no topo dos provetes. No entanto, é clara

a identificação da ocorrência de um patamar plástico após atingir a tensão máxima resistente à compressão.

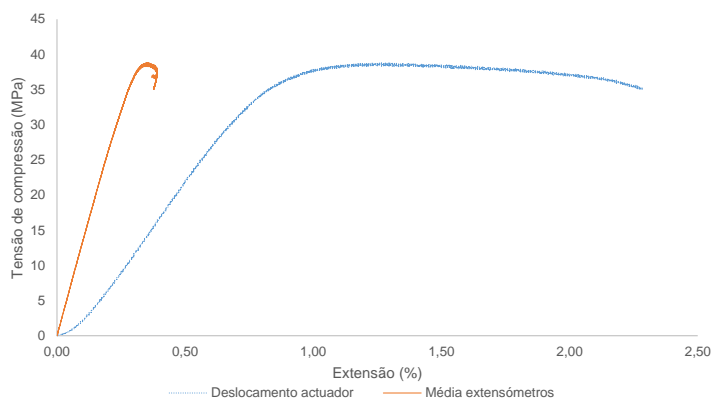


Figura 6.7 – Curva tensão vs extensão à compressão registada no provete MP7

No Quadro 6.7 são apresentados os valores de tensão e extensão para o Pinho bravo, o Choupo e o Eucalipto, considerados como *input* no modelo numérico de elementos finitos. Como referido anteriormente, dos valores obtidos da média dos extensómetros registou-se um comportamento linear até à tensão máxima. Contudo, contabilizando a deformação total ocorrida no provete (Figura 6.7) (incluindo a zona fora da influência do extensómetro) verifica-se que o comportamento da madeira à compressão se aproxima ao comportamento elástico-perfeitamente plástico. Deste modo, para caracterizar a fase plástica do material foram consideradas as extensões correspondentes a 90% da tensão máxima, na fase pós tensão máxima (90%_d)

Quadro 6.7 – Valores considerados para definição do comportamento mecânico à compressão no modelo numérico de elementos finitos

% Tensão	Pinho bravo		Choupo		Eucalipto	
	Tensão (MPa)	Extensão (%)	Tensão (MPa)	Extensão (%)	Tensão (MPa)	Extensão (%)
10%	4,0	0,030	3,3	0,030	6,2	0,028
50%	19,9	0,167	16,3	0,160	30,7	0,164
70%	27,9	0,250	22,9	0,248	43,1	0,250
90%	35,8	0,349	29,4	0,360	55,4	0,359
100%	39,8	0,483	32,7	0,456	61,5	0,456
90%_d	40,0	2,445	33,0	2,418	62,0	1,954
Nº provetes	6		20		5	

A Figura 6.8 mostra as curvas tensão vs extensão adotadas para caracterização mecânica da madeira à tração e à compressão. De referir que, das 5 lamelas de cada viga, as 2 lamelas

inferiores foram consideradas no modelo como sujeitas à tração e as 3 lamelas superiores à compressão.

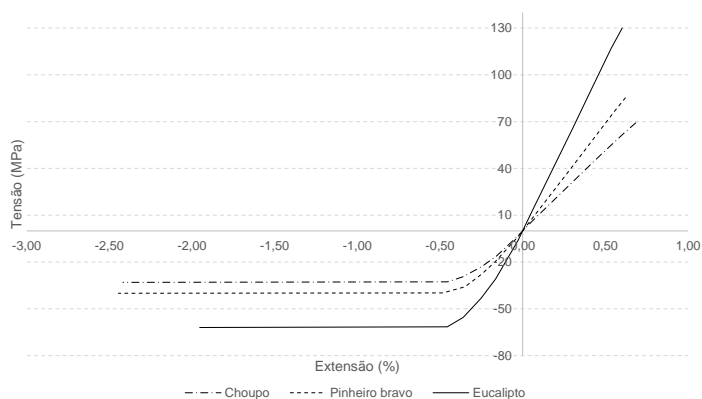


Figura 6.8 – Curva tensão vs extensão obtida dos ensaios experimentais de compressão e tração para caracterização do comportamento mecânico das espécies

6.4 Resultados

6.4.1 Análise do comportamento mecânico em fase elástica (módulo de elasticidade)

Cada viga de madeira lamelada colada foi modelada através de modelos de elementos finitos, tendo como base as constantes elásticas definidas no Quadro 6.3 (ver 6.3.1). As simulações realizadas com os modelos numéricos das vigas permitiram estimar as reações nos apoios e a deformação a meio vão de cada tipo de viga.

Com base nas simulações foram determinados os declives força vs deslocamento, posteriormente considerados na Equação 6.2. No Quadro 6.8 são listados os valores determinados para o módulo de elasticidade das vigas por via dos modelos numéricos (E_{MEF}), comparados com os valores obtidos experimentalmente ($E_{m,g_{92}}$). É igualmente apresentado o erro absoluto registado entre os valores E_{MEF} e $E_{m,g_{92}}$ (entre 5,5% e 8,1%).

Quadro 6.8 – Módulo de elasticidade determinado pela modelação numérica e experimentalmente

	MP		BP		HMPBP		BG		HBGBP	
	E_{MEF}	$E_{m,g_{92}}$	E_{MEF}	$E_{m,g_{92}}$	E_{MEF}	$E_{m,g_{92}}$	E_{MEF}	$E_{m,g_{92}}$	E_{MEF}	$E_{m,g_{92}}$
Média (MPa)	11983	12915	9943	10533	12198	12918	21858	23713	17565	19126
Mínimo (MPa)	10767	10995	8413	8610	11336	12091	20565	21885	17272	18601
Máximo (MPa)	13021	14553	12308	13401	12936	13805	22958	24829	17879	20010
Desvio padrão (MPa)	813	1166	1009	1225	656	667	1100	1405	304	770
COV (%)	6,8	9,0	10,1	11,6	5,4	5,2	5,0	5,9	1,7	4,0
Erro absoluto (%)		7,0		6,0		5,5		7,8		8,1
Número de vigas		7		21		7		4		3

Da análise dos resultados obtidos por via dos modelos numéricos de elementos finitos é possível concluir que os mesmos se aproximam dos resultados obtidos experimentalmente apesar de serem ligeiramente inferiores. Registaram-se igualmente valores de coeficientes de variação semelhantes aos determinados experimentalmente, tendo-se verificado um valor máximo de 10,1%. De referir que este valor poderá ser reduzido se a amplitude de módulo de elasticidade dinâmico das vigas da amostra BP for menor, uma vez que a gama de módulo de elasticidade com base na média das lamelas foi elevada, variando entre 8305 MPa e 12423 MPa.

A observação dos erros absolutos obtidos para as diferentes tipologias de vigas permite atestar a qualidade do modelo desenvolvido na previsão do módulo de elasticidade determinados por via de ensaios experimentais, obtendo-se valores de erro significativamente reduzidos.

Foi igualmente considerada a análise estatística dos resultados através de análise de variância ANOVA, seguido de *Levene's test* e *Tukey test* para avaliação da existência ou não de diferenças significativas. Os resultados são apresentados no Quadro 6.9.

Quadro 6.9 – Coeficientes de correlação e equações de regressão entre módulo de elasticidade ($E_{m,g_{92}}$ e E_{MEF}) determinados experimentalmente e estimados pelo modelo

Viga	ANOVA			Tukey's test (mean)		Levene's test	Coeficiente de correlação (r)	Equação de regressão
	p-value	Fcrit	F	mean	x-crit	(p-value)		
MP	0,108	4,7	3,0	932,6	1170,8	0,560	0,96	$E_{m,g_{92}} = 1,3848x E_{MEF} - 3678,5$
BP	0,096	4,1	2,9	590,0	699,8	0,351	0,94	$E_{m,g_{92}} = 1,1376x E_{MEF} - 777,87$
HMPBP	0,064	4,7	4,1	720,0	770,5	0,927	0,83	$E_{m,g_{92}} = 0,8397x E_{MEF} + 2674,7$
BG	0,083	6,0	4,3	630,9	2183,0	0,576	0,98	$E_{m,g_{92}} = 1,2509x E_{MEF} - 3629,8$
HBGBP	0,031	7,7	10,7	1561,5	1326,2	0,104	0,84	$E_{m,g_{92}} = 2,1263x E_{MEF} - 18222$

Os valores baixos dos erros absolutos obtidos, para as várias tipologias de viga, demonstram a fiabilidade do modelo desenvolvido para prever o módulo de elasticidade experimental. Do conjunto de diferentes tipologias de vigas analisadas verifica-se o menor erro absoluto (5,5%) para HMPBP, coincidente com o menor coeficiente de correlação (0,83). Este coeficiente de correlação relativamente baixo poderá estar relacionado com o reduzido número de vigas analisadas uma vez que o grupo HMPBP agrupa duas configurações distintas (HMPBP-1 e HMPBP-2). Contudo, a amostra completa de 42 vigas revelou uma correlação direta entre módulo de elasticidade (experimental e numérico), tendo-se registado um valor de coeficiente de correlação de 1,00 (Figura 6.9).

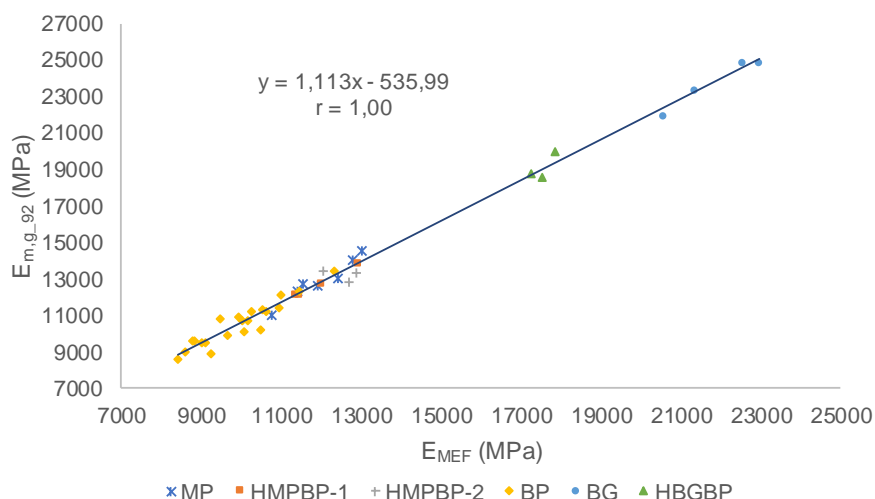


Figura 6.9 – Correlação entre valores de módulo de elasticidade (experimental e numérico)

Em sentido inverso verificaram-se coeficientes de correlação bastante elevados para as tipologias de viga MP, BP e BG com valores de r superiores a 0,94. Da análise do Quadro 6.9 é de registar que a hipótese nula de que as médias das amostras são estatisticamente semelhantes não pode ser rejeitada por via da análise estatística realizada ($F_{crit} > F$ e $p\text{-value} > 0,05$). No entanto, a amostra HBGBP revelou diferenças significativas através da análise estatística ANOVA ($p\text{-value} = 0,031 < 0,05$) e pelo teste de Tukey ($mean > x\text{-crit}$). O teste de Levene provou não existirem diferenças estatísticas significativas, apesar de se posicionar bastante próximo do nível de confiança de 0,05.

6.4.2 Análise do comportamento em fase plástica (resistência à flexão)

Verificada a acuidade do modelo na predição do módulo de elasticidade das vigas, foram conduzidas simulações ao nível da tensão resistente de cada viga, e do comportamento das vigas fora da fase elástica linear. Contudo, o modelo de elementos finitos desenvolvido não contemplou um critério de paragem relacionado com a cedência das vigas. Assim, considerou-se numa primeira análise as tensões (experimental e do modelo numérico) existentes em cada viga correspondentes à deformação máxima obtida experimentalmente aquando da ocorrência da rotura. Os Quadros 6.10 a 6.14 apresentam os valores obtidos experimentalmente de deformação máxima e respetiva tensão resistente. São igualmente apresentados os valores de tensão e extensão (tração e compressão) extraídos do modelo numérico, bem como os valores médios de erro absoluto.

Quadro 6.10 – Comparação de valores de tensão (experimental e modelo numérico) para o mesmo patamar de deformação – vigas MP

Viga	EXPERIMENTAL				MODELO NUMÉRICO				
	Valores últimos		Valores máximos		Tração			Compressão	
	Deformação (mm)	Resistência à flexão (MPa)	Resistência à flexão (MPa)	Deformação (mm)	Tensão (MPa)	Erro absoluto (%)	Extensão (%)	Tensão (MPa)	Extensão (%)
MP1	47,8	69,8	69,8	47,7	63,2	9,4	0,550	39,7	0,793
MP2	56,1	67,0	67,0	56,1	65,8	1,7	0,633	40,0	1,024
MP3	33,9	43,8	43,8	33,9	49,0	11,7	0,373	32,6	0,502
MP4	24,6	37,1	37,1	24,6	39,5	6,6	0,285	30,6	0,348
MP5	49,9	68,0	68,0	49,9	63,0	7,4	0,564	39,8	0,842
MP6	44,2	65,3	65,3	44,2	61,7	5,5	0,508	38,5	0,702
MP7	78,6	82,7	82,7	78,5	72,8	11,9	0,929	40,3	1,698
Média	47,9	62,0	62,0	47,8	59,3	7,7	0,549	37,3	0,844

A análise dos resultados extraídos do modelo numérico permite verificar que as extensões máximas são próximas das registadas experimentalmente na caracterização do comportamento mecânico de tração paralela às fibras (Quadro 6.5). Em particular, nas vigas MP3 e MP4, cuja rotura ocorreu em regime elástico linear, as extensões em tração e compressão foram iguais ou inferiores aos valores experimentalmente obtidos na caracterização mecânica da espécie, à tração e à compressão.

Quadro 6.11 – Comparação de valores de tensão (experimental e modelo numérico) para o mesmo nível de deformação – vigas HMPBP

Viga	EXPERIMENTAL				MODELO NUMÉRICO				
	Valores últimos		Valores máximos		Tração			Compressão	
	Deformação (mm)	Resistência à flexão (MPa)	Resistência à flexão (MPa)	Deformação (mm)	Tensão (MPa)	Erro absoluto (%)	Extensão (%)	Tensão (MPa)	Extensão (%)
HMPBP1	43,5	53,9	53,9	43,5	60,4	12,1	0,489	37,1	0,682
HMPBP2	35,9	54,1	54,1	35,9	57,4	6,1	0,383	34,8	0,557
HMPBP3	63,3	67,1	67,1	63,1	66,0	1,6	0,717	40,1	1,233
HMPBP4	52,2	74,5	74,5	52,2	63,3	15,0	0,587	39,9	0,953
HMPBP5	91,0	71,8	71,8	91,0	73,1	1,9	1,005	33,3	2,106
HMPBP6	64,7	60,3	60,5	62,8	67,0	11,0	0,703	33,0	1,356
HMPBP7	79,6	63,5	64,6	71,1	71,3	12,3	0,871	33,2	1,810
Média	61,5	63,6	63,8	60,0	65,5	8,6	0,679	35,9	1,242

Quadro 6.12 – Comparação de valores de tensão (experimental e modelo numérico) para o mesmo nível de deformação – vigas BP

Viga	EXPERIMENTAL				MODELO NUMÉRICO				
	valores últimos		Valores máximos		Tração			Compressão	
	Deformação (mm)	Resistência à flexão (MPa)	Resistência à flexão (MPa)	Deformação (mm)	Tensão (MPa)	Erro absoluto (%)	Extensão (%)	Tensão (MPa)	Extensão (%)
BP1	78,4	62,6	62,6	78,4	58,8	6,1	0,923	33,1	1,621
BP2	68,4	62,2	62,2	68,4	54,7	12,1	0,783	32,9	1,319
BP3	85,9	62,8	62,8	85,9	59,5	5,2	0,977	33,1	1,853
BP4	32,5	36,4	36,4	32,5	37,4	2,9	0,371	26,0	0,443
BP5	133,5	73,1	73,1	133,0	68,9	5,9	1,718	33,4	3,246
BP7	77,4	60,1	60,1	77,4	58,4	2,7	0,911	33,0	1,556
BP8	52,8	49,7	49,7	52,8	48,8	1,8	0,589	32,3	0,821
BP9	42,8	37,9	37,9	42,8	46,9	23,8	0,467	28,3	0,624
BP10	61,2	57,6	57,6	61,2	54,4	5,5	0,699	32,9	1,176
BP11	72,0	57,6	57,6	71,8	56,3	2,2	0,836	33,0	1,444
BP12	68,6	59,7	59,7	68,5	56,3	5,6	0,798	33,0	1,387
BP13	74,1	53,9	53,9	74,1	55,9	3,8	0,850	33,0	1,470
BP14	44,4	44,5	44,5	44,4	48,4	8,8	0,489	29,3	0,663
BP15	77,4	56,0	58,7	70,4	57,3	2,3	0,891	33,0	1,595
BP16	68,8	59,4	59,4	68,8	55,2	7,1	0,801	32,9	1,347
BP17	52,0	46,7	46,9	51,9	50,3	7,7	0,580	32,6	0,823
BP18	41,4	42,0	44,7	40,0	45,8	9,3	0,459	28,6	0,609
BP19	60,6	72,4	72,4	60,6	55,6	23,2	0,712	32,9	1,222
BP20	105,5	61,7	61,7	104,7	65,3	5,8	1,210	33,3	2,302
BP21	80,3	54,4	54,4	80,2	58,1	6,7	0,929	33,0	1,624
BP22	65,6	51,4	51,4	65,5	53,7	4,5	0,742	32,9	1,203
Média	68,7	55,3	55,6	68,2	54,6	7,3	0,797	32,0	1,350

Da análise do Quadro 6.11 verifica-se que o valor médio da extensão máxima em tração coincide com o obtido na caracterização do Pinho bravo à tração, registando-se os valores inferiores nas vigas cuja rotura ocorreu em regime elástico linear. As vigas HMPBP1 e HMPBP2 apresentam os valores de extensão à compressão mais baixos, coincidindo com os valores baixos de resistência à compressão (abaixo de 40 MPa à compressão).

Em relação às vigas BP (Quadro 6.12), consegue-se perceber claramente a divisão entre o conjunto de vigas que apresentou comportamento elástico linear até à rotura (valores sombreados a cinza claro) e as restantes vigas, tendo em conta as extensões máximas em tração bastante inferiores ao valor de extensão máxima atingida na caracterização do Choupo à tração (0,683%). Por outro lado, 4 das 22 vigas BP apresentaram deformações significativas, superiores a 80 mm, aproximando-se o comportamento mecânico das vigas de um comportamento elástico-perfeitamente plástico.

Quadro 6.13 – Comparação de valores de tensão (experimental e modelo numérico) para o mesmo nível de deformação – vigas BG

Viga	EXPERIMENTAL				MODELO NUMÉRICO				
	Valores últimos		Valores máximos		Tração			Compressão	
	Deformação (mm)	Resistência à flexão (MPa)	Resistência à flexão (MPa)	Deformação (mm)	Tensão (MPa)	Erro absoluto (%)	Extensão (%)	Tensão (MPa)	Extensão (%)
BG1	67,0	125,8	125,8	67,0	107,3	14,7	0,811	62,1	1,419
BG2	82,1	130,1	130,7	77,4	115,0	11,6	0,948	62,6	1,906
BG3	78,8	116,3	131,9	68,3	113,6	2,4	0,950	62,5	1,824
BG4	67,7	113,5	123,9	60,3	107,2	5,5	0,810	62,2	1,477
Média	73,9	121,4	128,1	68,3	110,8	8,6	0,880	62,4	1,656

Quadro 6.14 – Comparação de valores de tensão (experimental e modelo numérico) para o mesmo nível de deformação – vigas HBGBP

Viga	EXPERIMENTAL				MODELO NUMÉRICO				
	Valores últimos		Valores máximos		Tração			Compressão	
	Deformação (mm)	Resistência à flexão (MPa)	Resistência à flexão (MPa)	Deformação (mm)	Tensão (MPa)	Erro absoluto (%)	Extensão (%)	Tensão (MPa)	Extensão (%)
HBGBP1	80,5	104,3	107,0	56,1	109,5	4,9	0,873	62,6	1,953
HBGBP2	51,0	86,7	88,9	46,9	95,0	9,7	0,540	61,6	0,960
HBGBP3	58,0	93,6	93,6	58,0	97,9	4,5	0,606	61,9	1,222
Média	63,2	94,9	96,5	53,7	100,8	6,4	0,673	62,0	1,378

Uma análise idêntica à realizada para as restantes tipologias de viga demonstra claramente que todas as vigas BG já tinham ultrapassado a extensão máxima em tração atingida nos ensaios de madeira limpa (0,603%). Por outro lado, as vigas HBGBP apresentam extensões máximas de tração iguais ou inferiores ao valor anteriormente referido (0,603%), com exceção da viga HBGBP1 cujas extensões máximas de tração e compressão são bastante superiores.

Em termos gerais verifica-se uma aproximação significativa entre modelo numérico e os resultados experimentais na determinação da tensão máxima de tração das vigas, tendo-se obtido valores médios do erro absoluto a variar entre 6,4% (vigas HBGBP) e 8,6% (vigas HMPBP e BG). Em relação às tensões máximas de compressão, é possível verificar que em 74% das vigas as tensões de compressão registadas no modelo numérico foram bastante próximas ou superiores às tensões médias obtidas dos ensaios de compressão de madeira limpa (Choupo – 33 MPa; Pinho bravo – 40 MPa e Eucalipto – 62 MPa).

6.4.3 Análise da plasticidade das vigas

Tendo em consideração o registo de deformação fora do comportamento elástico linear característico da madeira à flexão, foram instrumentadas algumas vigas para avaliar as extensões à tração e compressão. No total foram instrumentadas 8 vigas (MP7, BP20, BP21, BP22, HMPBP6, HMPBP7, HBGBP2 e HBGBP3). Em cada viga foi colocado 1 extensómetro na superfície da lamela superior, solicitada à compressão, e outro extensómetro na superfície da lamela inferior, solicitada à tração. Foram usados extensómetros do tipo N2A-06-20CBW-350 da Micro-Measurements, colados a meio vão e o mais centrado possível na largura da viga (Figura 6.10).



Figura 6.10 – Instrumentação de viga com extensómetros dispostos na lamela de compressão e de tração

Nas Figuras 6.11 a 6.14 são apresentadas as curvas força vs extensão obtidas dos ensaios experimentais e dos modelos numéricos para as 8 vigas. As curvas força vs extensão das vigas MP7, BP (20 e 21) e HMPBP (6 e 7) mostram a ocorrência, na zona tracionada, de comportamento plástico até à rotura. Por outro lado, a viga BP22, e as vigas HBGBP (2 e 3) apresentam comportamento aproximadamente linear até à rotura. Na zona comprimida, é evidente o comportamento plástico apresentado em todas as vigas instrumentadas, com exceção das vigas HBGBP (2 e 3) cujo comportamento plástico não foi tão notório ao nível das extensões.

É de registar igualmente a concordância das curvas obtidas por via dos ensaios experimentais e do modelo numérico desenvolvido. Em particular, nas vigas BP21, BP22, HMPBP6 e HMPBP7 a concordância registada foi bastante significativa.

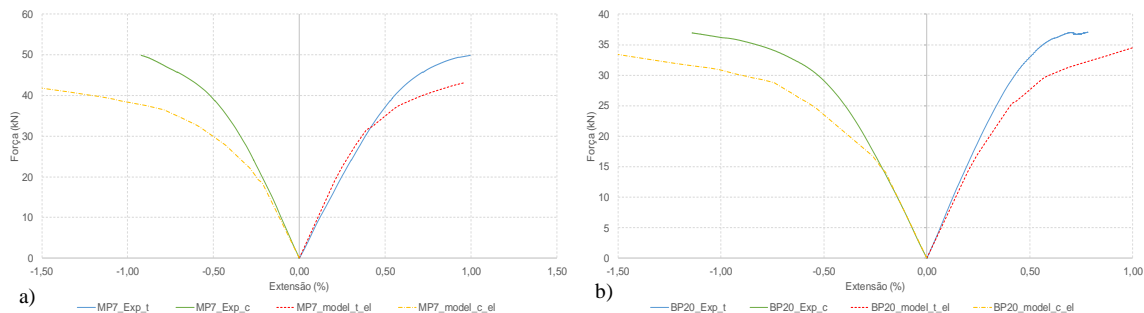


Figura 6.11 – Curvas força vs extensão obtidas dos ensaios experimentais e modelo numérico (tração e compressão): a) MP7; b) BP20

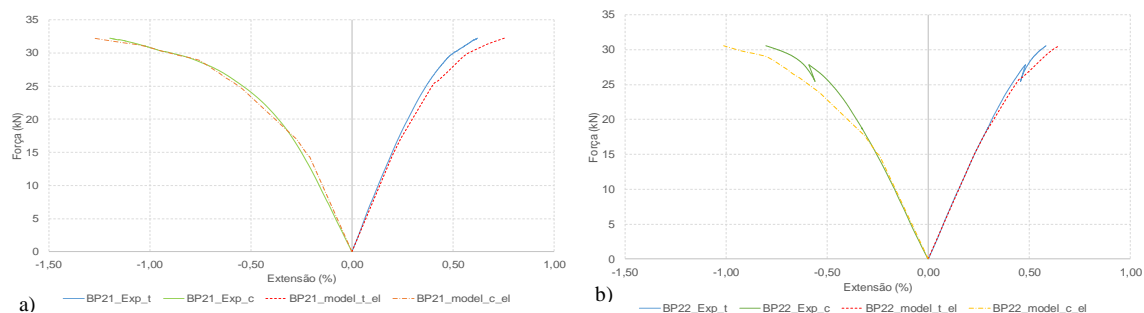


Figura 6.12 – Curvas força vs extensão obtidas dos ensaios experimentais e modelo numérico (tração e compressão): a) BP21; b) BP22

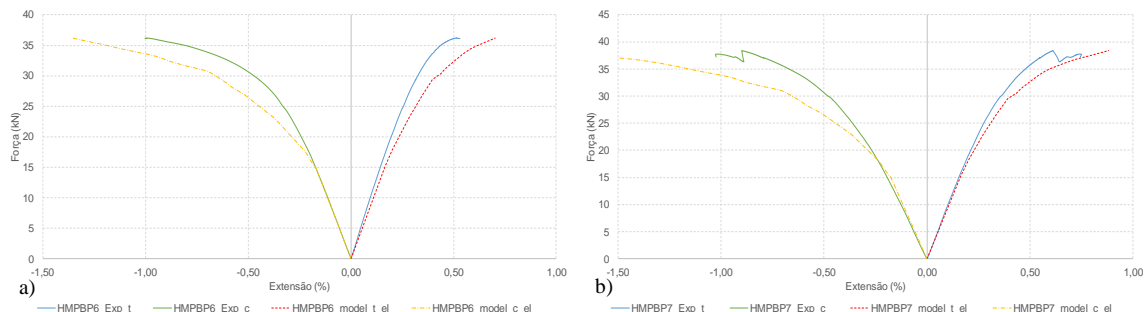


Figura 6.13 – Curvas força vs extensão obtidas dos ensaios experimentais e modelo numérico (tração e compressão): a) HMPBP6; b) HMPBP7

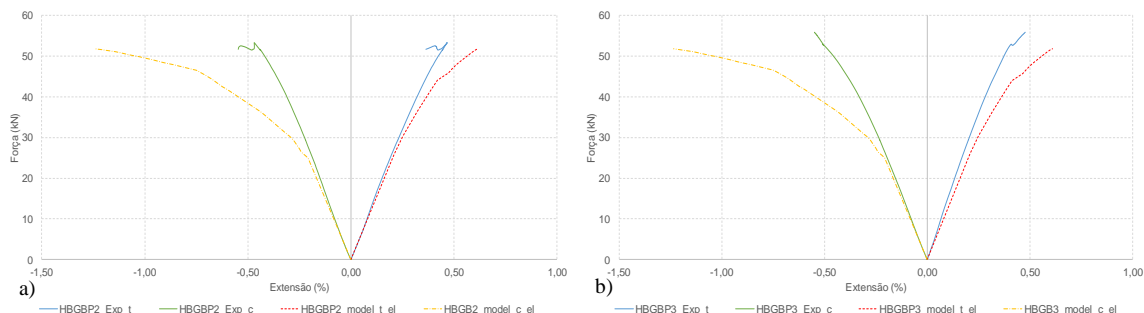


Figura 6.14 – Curvas força vs extensão obtidas dos ensaios experimentais e modelo numérico (tração e compressão): a) HBGBP2; b) HBGBP3

O Quadro 6.15 apresenta os valores máximos de força e extensões de tração (ϵ_t) e compressão (ϵ_c) registadas dos ensaios experimentais e do modelo numérico, nas 8 vigas instrumentadas com extensómetros.

Quadro 6.15 – Valores máximos de força e extensão (tração e compressão) obtidos dos ensaios experimentais e do modelo numérico

Viga	EXPERIMENTAL			MODELO NUMÉRICO		
	Força (kN)	ϵ_t (%)	ϵ_c (%)	Força (kN)	ϵ_t (%)	ϵ_c (%)
MP7	49,9	1,00	0,92	43,1	0,96	1,79
BP20	37,0	0,78	1,21	37,0	1,25	2,42
BP21	32,3	0,62	1,20	32,3	0,75	1,28
BP22	30,6	0,58	0,80	30,6	0,65	1,01
HMPBP6	36,2	0,51	0,99	36,2	0,70	1,36
HMPBP7	38,4	0,61	0,90	38,4	0,88	1,84
HBGBP2	53,3	0,47	0,47	51,8	0,62	1,24
HBGBP3	55,9	0,48	0,55	51,8	0,61	1,23

Da análise dos resultados verifica-se, a par da concordância das curvas força vs extensão, a semelhança dos valores máximos obtidos para as vigas BP21, BP22, HMPBP6 e HMPBP7, em especial na zona tracionada. Em relação aos valores da zona comprimida as diferenças são significativas. Numa primeira análise, considera-se que este resultado pode ser melhorado através da caracterização mais aprofundada do comportamento mecânico à tração e à compressão do Pinho bravo e do Eucalipto, cuja amostra foi bastante reduzida.

No entanto, como referido anteriormente o modelo numérico mostrou-se bastante eficaz na estimativa das tensões não só para o valor de deformação última mas também para os vários níveis de deformação registada ao longo do ensaio experimental. Seguidamente apresentam-se as curvas força vs deslocamento de algumas vigas que demonstram a capacidade do modelo numérico em representar o comportamento mecânico obtido por via de ensaios experimentais das vigas (Figura 6.15 a Figura 6.18). Do conjunto de curvas apresentadas pretende-se ilustrar os diferentes modos de rotura observados para as várias tipologias de vigas. O critério de truncagem considerado foi novamente a deformação última registada no momento em que ocorreu a rotura.

No Anexo F (Figura F.1 a Figura F.10) são apresentadas graficamente as curvas força vs deslocamento correspondentes às 42 vigas com base nos dados recolhidos dos ensaios experimentais e do modelo numérico.

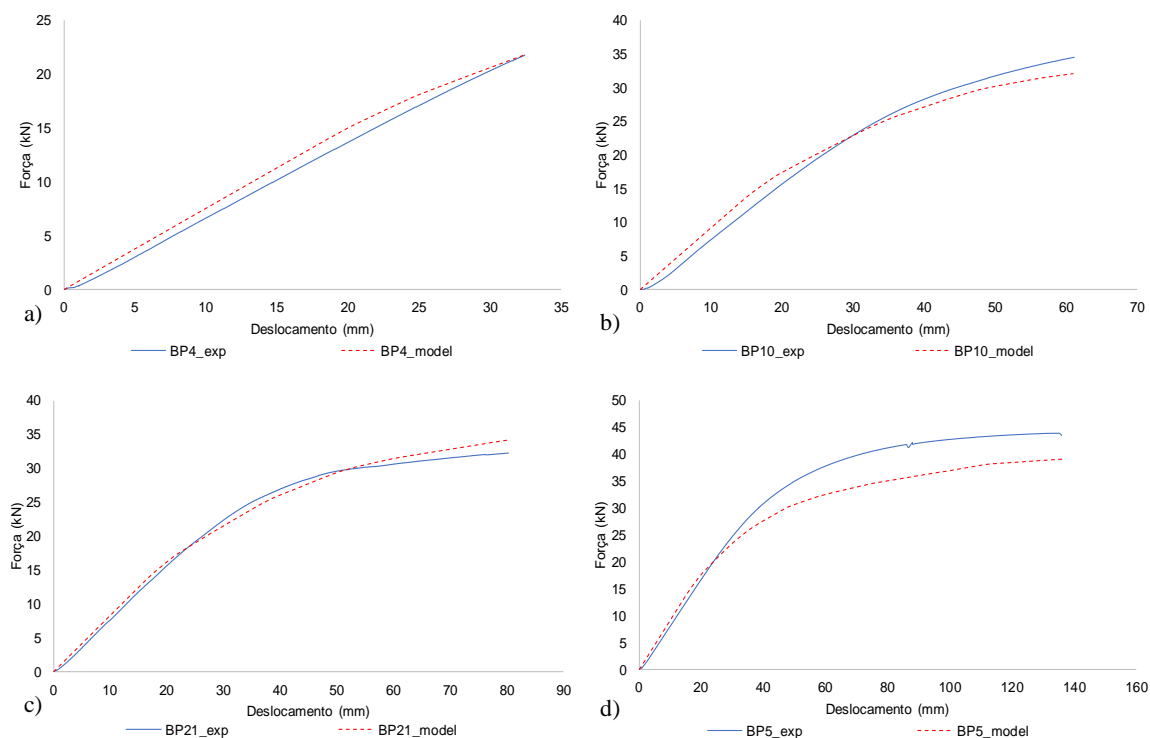


Figura 6.15 – Curvas força vs deslocamento obtidas dos ensaios experimentais e do modelo numérico: a) BP4; b) BP10; c) BP21; d) BP5

Da análise da Figura 6.15 verifica-se a ocorrência de 4 tipologias de curva força vs deslocamento, sendo que a viga BP4 apresentou comportamento elástico linear até à rotura e as restantes apresentaram um regime de deformações não lineares. De realçar o evidente comportamento elasto-plástico registado em diversas vigas da tipologia BP, como são exemplo as vigas BP21 e BP5 com deformação última de 80,3 mm e 136,1 mm, respetivamente. Por outro lado, em algumas vigas as deformações fora do regime elástico linear foram menores como foi exemplo a viga BP10. Apesar dos diferentes comportamentos à rotura registados é de realçar o ajustamento obtido entre curvas experimentais e as simulações do modelo numérico. O excelente ajuste é igualmente observado nas restantes tipologias de vigas como se apresenta de seguida.

A Figura 6.16 apresenta 2 exemplos de curvas força vs deslocamento registados nas vigas MP, sendo que foi evidente a predominância de comportamento elástico linear nas roturas (normalmente associado como rotura característica da madeira à flexão), como foi exemplo a viga MP4. No entanto, a viga MP7 distingue-se das restantes, apresentando deformações significativas em regime não linear.

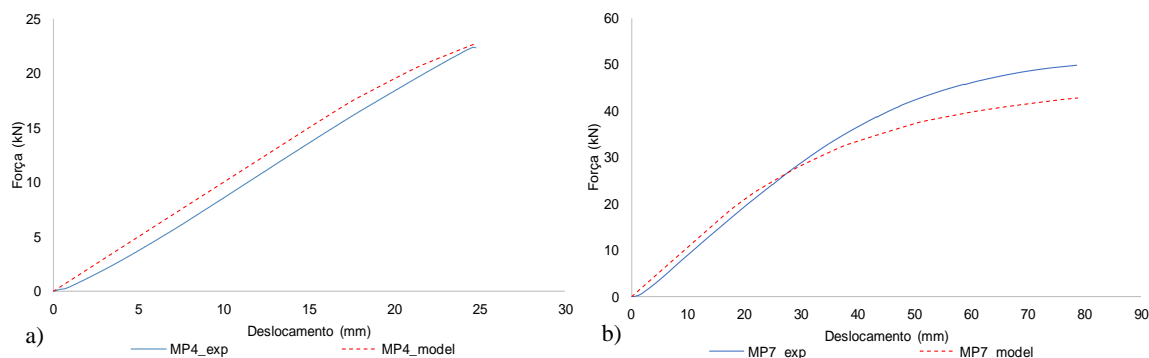


Figura 6.16 – Curvas força vs deslocamento obtidas dos ensaios experimentais e do modelo numérico: a) MP4; b) MP7

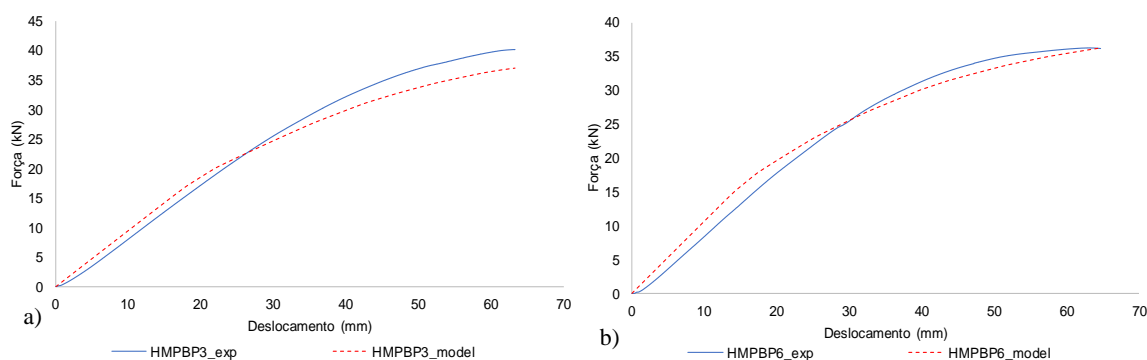


Figura 6.17 – Curvas força vs deslocamento obtidas dos ensaios experimentais e do modelo numérico: a) HMPBP3; b) HMPBP6

Em relação às vigas HMPBP verificou-se um comportamento distinto entre ambas as tipologias HMPBP-1 e HMPBP-2. Nas 4 vigas da configuração HMPBP-1 (3 lamelas de choupo centrais), a rotura apresentou alguma deformação fora do regime elástico linear como é exemplo a viga HMPBP3. Nas 3 vigas HMPBP-2 (2 lamelas de choupo nas camadas superiores) foram observadas deformações evidentes e próximas do regime elasto-plástico como é exemplo a viga HMPBP6.

O comportamento mecânico das vigas BG revelou igualmente deformações fora do domínio do comportamento elástico-linear como exemplificado para a viga BG3 na Figura 6.18. Foi igualmente observado, ao contrário das restantes tipologias, que as vigas constituídas apenas por Eucalipto não registaram uma queda abrupta de carga, mas uma queda por patamares.

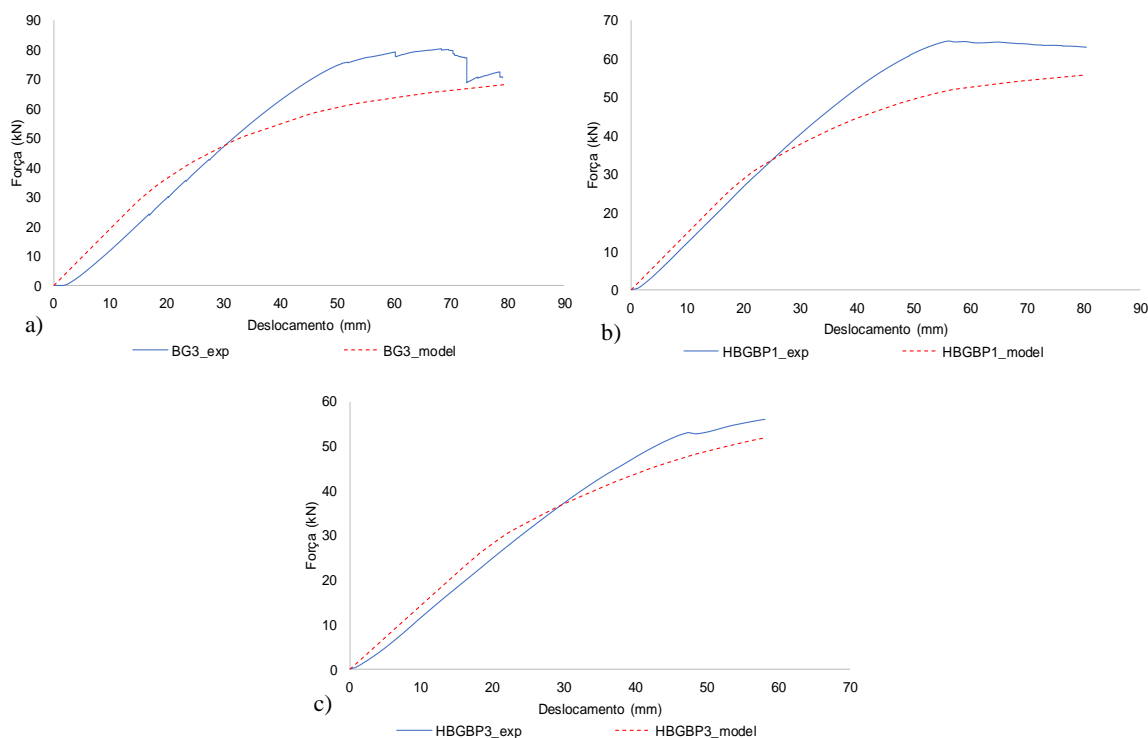


Figura 6.18 – Curvas força vs deslocamento obtidas dos ensaios experimentais e do modelo numérico: a) BG3; b) HBGBP1; c) HBGBP3

Em relação às vigas HBGBP, observou-se na viga HBGBP1 um patamar significativo de deformações representativas do comportamento elasto-plástico. Contudo, nas vigas HBGBP2 e HBGBP3 as deformações em regime não linear foram menos evidentes, sendo que as diferenças registadas entre a viga HBGBP1 e as vigas HBGBP2 e HBGBP3 só ocorreram nos valores de E_{dyn_1} da lamela central e da lamela externa solicitada à tração.

6.4.4 Critério de truncagem do modelo numérico

O desenvolvimento de modelos numéricos é mais útil se for possível evitar o recurso a ensaios que causem a destruição do elemento em análise, pelo que a consideração da deformação última não poderá ser tida como critério de truncagem do modelo para aferir a tensão resistente.

Assim, foi realizada a análise dos resultados extraídos dos modelos numéricos truncando esses mesmos dados por duas vias: i) extensão máxima de compressão e ii) extensão máxima de tração. Os valores de extensão máxima considerados foram os obtidos da caracterização do comportamento mecânico de cada espécie, anteriormente apresentados no Quadro 6.5 para a resistência à tração e Quadro 6.7 para a resistência à compressão. Os valores de tensão obtidos com base nas duas hipóteses de truncagem referidas são

apresentados de seguida (Quadro 6.16 a Quadro 6.20), e comparados com os valores experimentais através do erro absoluto determinado.

Quadro 6.16 – Valores de tensão de flexão baseados na truncagem do modelo numérico – vigas MP

Viga	EXPERIMENTAL Resistência à flexão (MPa)	MODELO NUMÉRICO			
		Compressão		Tração	
		Tensão (MPa)	Erro absoluto (%)	Tensão (MPa)	Erro absoluto (%)
MP1	69,8	54,1	22,4	65,1	6,7
MP2	67,0	52,6	21,4	65,6	2,0
MP3	43,8	47,7	8,7	63,5	44,9
MP4	37,1	50,1	35,2	64,2	73,2
MP5	68,0	51,0	25,1	64,4	5,3
MP6	65,3	52,4	19,8	64,6	1,1
MP7	82,7	54,1	34,5	65,2	21,1
Média	62,0	51,7	23,9	64,7	22,0

Quadro 6.17 – Valores de tensão de flexão baseados na truncagem do modelo numérico – vigas HMPBP

Viga	EXPERIMENTAL Resistência à flexão (MPa)	MODELO NUMÉRICO			
		Compressão		Tração	
		Tensão (MPa)	Erro absoluto (%)	Tensão (MPa)	Erro absoluto (%)
HMPBP1	53,9	49,3	8,6	63,6	18,0
HMPBP2	54,1	52,0	3,9	65,1	20,3
HMPBP3	67,1	48,9	27,0	63,7	5,0
HMPBP4	74,5	50,5	32,2	64,2	13,9
HMPBP5	71,8	45,3	36,8	63,8	11,0
HMPBP6	60,5	47,7	21,2	65,0	7,5
HMPBP7	64,6	47,7	26,1	65,1	0,7
Média	63,8	48,8	22,3	64,4	10,9

Da análise dos resultados de truncagem do modelo para as vigas MP verifica-se uma semelhança entre o erro absoluto médio determinado pela truncagem à compressão (23,9%) e tração (22,0%). Estes valores são bastante superiores aos obtidos aquando da comparação de resultados para a deformação última (7,7%). Contudo, verifica-se uma diferença clara no erro obtido pelas vigas MP3 e MP4. Estas vigas apresentaram comportamento elástico linear até à rotura e como referido apresentaram roturas claramente condicionadas pela presença de nós de grandes dimensões. Inclusive a rotura da viga MP4 ocorreu fora do terço central (secção onde ocorre o momento máximo). Assim, se não se considerarem as vigas MP3 e MP4 na análise, o erro absoluto diminui significativamente para 7,2% se considerada a truncagem do modelo pelas extensões de tração.

Em relação às vigas HMPBP, verifica-se uma diferença significativa entre as duas hipóteses de truncagem do modelo, 22,3% pela compressão e 10,9% pela tração. Apesar de significativo, o erro de 10,9% pode ser aceitável dado ser inferior ao próprio coeficiente de variação registado dos ensaios experimentais (12,7%). Se executada a separação entre vigas HMPBP-1 e HMPBP-2 os erros absolutos por truncagem por extensão de tração seriam 14,3% e 6,4%, respetivamente. Tendo em consideração o comportamento mecânico apresentado pelas duas tipologias, as vigas HMPBP-2 apresentaram melhor desempenho tal como menor erro absoluto determinado por truncagem pelas extensões de tração, em relação à configuração HMPBP-1.

Quadro 6.18 – Valores de tensão de flexão baseados na truncagem do modelo numérico – vigas BP

Viga	EXPERIMENTAL Resistência à flexão (MPa)	MODELO NUMÉRICO			
		Compressão		Tração	
		Tensão (MPa)	Erro absoluto (%)	Tensão (MPa)	Erro absoluto (%)
BP1	62,6	44,4	29,1	54,3	13,3
BP2	62,2	40,0	35,7	52,9	15,0
BP3	62,8	42,9	31,7	54,1	13,9
BP4	36,4	38,5	5,8	52,1	43,1
BP5	73,1	43,8	40,1	54,2	25,9
BP7	60,1	43,7	27,3	54,1	9,9
BP8	49,7	33,6	32,4	50,5	1,6
BP9	37,9	37,6	0,6	52,0	37,3
BP10	57,6	43,3	24,8	54,2	5,9
BP11	57,6	42,2	26,8	53,5	7,1
BP12	59,7	44,2	26,0	54,2	9,2
BP13	53,9	39,9	25,9	52,9	1,8
BP14	44,5	37,5	15,7	52,0	16,7
BP15	58,7	41,7	28,9	53,5	8,8
BP16	59,4	40,7	31,5	53,1	10,6
BP17	46,9	38,4	18,1	52,2	11,4
BP18	44,7	37,6	15,8	52,0	16,2
BP19	72,4	47,8	34,0	55,0	24,0
BP20	61,7	40,8	33,9	53,3	13,6
BP21	54,4	40,4	25,8	53,4	1,8
BP22	51,4	38,4	25,2	52,7	2,4
Média	55,6	40,8	25,5	53,1	13,8

À semelhança do registado nas vigas HMPBP, a previsão do modelo para as vigas BP apresenta uma diferença clara entre as duas hipóteses de truncagem do modelo. Apesar do valor de erro absoluto por truncagem devido às extensões por tração ser de 13,8% é bastante

inferior ao coeficiente de variação registado para a resistência à flexão registada experimentalmente (17,5%).

De entre o conjunto de 21 vigas BP foi possível verificar um comportamento elástico linear até à rotura nas vigas BP4, BP9, BP14 e BP18. Assim, se considerada a truncagem por extensões de compressão nas referidas vigas e truncagem por extensões de tração nas restantes, o erro absoluto decresce para 10,2%.

Quadro 6.19 – Valores de tensão de flexão baseados na truncagem do modelo numérico – vigas BG

Viga	EXPERIMENTAL Resistência à flexão (MPa)	MODELO NUMÉRICO			
		Compressão		Tração	
		Tensão (MPa)	Erro absoluto (%)	Tensão (MPa)	Erro absoluto (%)
BG1	125,8	81,7	35,0	99,2	21,1
BG2	130,7	82,7	36,7	101,2	22,6
BG3	131,9	83,5	36,7	99,9	24,2
BG4	123,9	78,5	38,5	99,1	22,4
Média	128,1	81,6	36,7	99,8	22,6

Quadro 6.20 – Valores de tensão de flexão baseados na truncagem do modelo numérico – vigas HBGBP

Viga	EXPERIMENTAL Resistência à flexão (MPa)	MODELO NUMÉRICO			
		Compressão		Tração	
		Tensão (MPa)	Erro absoluto (%)	Tensão (MPa)	Erro absoluto (%)
HBGBP1	107,0	74,1	30,7	98,9	7,6
HBGBP2	88,9	71,1	20,0	97,5	9,7
HBGBP3	93,6	71,2	24,0	97,9	4,5
Média	96,5	72,1	24,9	98,1	7,3

Os resultados das vigas BG revelaram um erro absoluto claramente superior às restantes tipologias tanto pela truncagem do modelo pelas extensões de compressão, como pela tração. Contudo, contrariamente ao que se registou nas restantes vigas, nas vigas BG o erro absoluto foi bastante elevado e superior ao COV determinado pelos ensaios experimentais (2,2%). Numa primeira análise verifica-se uma diferença média de 28,3 MPa (experimental vs numérico), pelo que reduzir o erro absoluto obtido dos modelos numéricos só parece possível se alterados os valores de *input* relativos ao Eucalipto. Por outro lado, as vigas HBGBP apresentaram um erro absoluto bastante reduzido (7,3%). A diferença da média das entre tensões máximas determinada através do modelo numérico e experimental foi de 1,6 MPa.

6.5 Conclusões

No presente capítulo foi tido como objetivo modelar numericamente, através de elementos finitos, o comportamento mecânico das vigas produzidas e testadas experimentalmente. Para tal foi desenvolvido um modelo numérico simplificado com recurso ao *software* comercial Abaqus CAE.

A adoção dos valores indicados na norma EN 14080 (2013), nomeadamente para as constantes elásticas da madeira introduzidas no modelo, conduziu a erros absolutos bastante elevados na previsão dos valores de módulo de elasticidade estático das vigas, nomeadamente 20,8% para as vigas MP e 18,7% para as vigas HMPBP. Em contrapartida, a adoção de valores específicos das espécies utilizadas no presente estudo ou com características mecânicas semelhantes permitiu a redução significativa dos erros na predição do módulo de elasticidade das vigas, como por exemplo nas vigas MP (7,0%), vigas BP (6,0%), vigas HMPBP (5,5%), vigas BG (7,8%) e vigas HBGBP (8,1%). O excelente ajustamento do modelo foi igualmente comprovado pelos coeficientes de correlação obtidos entre módulo de elasticidade (experimental e numérico) com mínimo de 0,83 nas vigas com combinação de espécies e superiores a 0,94, para as restantes tipologias de vigas.

A modelação do comportamento das vigas teve igualmente como objetivo descrever o comportamento não linear registado nos ensaios experimentais, tendo-se verificado aproximações bastante significativas entre o modelo numérico e o comportamento experimental, expressos pelas respetivas curvas força vs extensão e força vs deslocamento. A caracterização experimental do comportamento mecânico à tração e à compressão foi essencial na definição dos parâmetros de caracterização do comportamento plástico de cada espécie. Contudo, o número de ensaios realizados nas espécies Pinheiro bravo e Eucalipto deve ser aumentado, de modo a obter uma caracterização estatisticamente válida.

A capacidade de modelação do comportamento elástico do material é bastante importante para a verificação da segurança das estruturas aos diversos estados limites de serviço (deformações e vibrações). Contudo a determinação das tensões de rotura é igualmente importante pelo que a sua análise foi tida em conta. Numa primeira fase, a capacidade do modelo para descrever o comportamento experimental das vigas foi avaliada através da deformação última, o que revelou erros absolutos reduzidos (inferiores a 10%). Numa segunda fase, considerou-se a truncagem do modelo numérico com base nas extensões máximas obtidas da caracterização mecânica das espécies, à compressão e à tração. Dos resultados foi evidente o melhor desempenho obtido pela truncagem dos modelos numéricos pelas extensões de tração do material. Contudo, quando devidamente conhecidas as propriedades das lamelas constituintes de cada viga poderão ser tidas em consideração as extensões de compressão para truncagem, como se verificou nas 4 vigas

BP com lamelas cujos valores de $E_{dyn,l}$ das lamelas posicionadas à tração e à compressão foram inferiores a 10500 MPa.

7 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

7.1 Conclusões

A MLC oferece diversas vantagens relativamente à madeira maciça, nomeadamente a possibilidade de fabrico de elementos estruturais competitivos com outros materiais utilizados na construção civil como o aço e o betão. O fabrico de MLC na Europa assentou durante décadas essencialmente nas espécies Espruce (*Picea abie*) e Casquinha (*Pinus sylvestris*). Em Portugal, a utilização de MLC na construção teve um crescimento significativo devido à construção da atual Altice Arena (Pavilhão da Utopia por altura da EXPO'98). Desde então são vários os exemplos de estruturas de grande dimensão em que a opção por MLC não se deveu apenas às suas qualidades estéticas.

Apesar da crescente utilização de MLC em Portugal, a produção com recurso a espécies produzidas na floresta nacional é residual. O presente trabalho teve como principal objetivo o desenvolvimento de conhecimentos relativos ao fabrico e ao comportamento mecânico de elementos estruturais de MLC com madeiras nacionais. Para atingir este objetivo foi realizada uma extensa campanha experimental que envolveu aproximadamente 6 m³ de matéria-prima das espécies Pinheiro bravo (sem e com tratamento preservador), Choupo e Eucalipto. Foi também realizada uma análise numérica do comportamento das vigas através de modelação com elementos finitos com recurso ao *software* Abaqus CAE. Seguidamente são apresentadas de forma sucinta as conclusões obtidas durante os trabalhos.

7.1.1 Colagem de face

O ponto inicial da investigação conduzida centrou-se na identificação das espécies existentes na floresta nacional com potencial para produção de MLC. Por via da consulta do 6º Inventário Florestal Nacional com dados relativos ao ano de 2010, foram escolhidas as espécies: Pinheiro bravo, Eucalipto e Choupo. O desempenho da colagem destas madeiras foi avaliado por via de ensaios de delaminação e resistência ao corte seguindo os procedimentos indicados na norma EN 14080 (2013). No total, foram considerados quatro tipos de cola (PRF, MUF, EPI e PUR), para alguns dos quais foi considerada mais que uma referência. As principais conclusões obtidas são listadas de seguida, por espécie:

7.1.1.1 *Pinheiro bravo sem tratamento*

- No desempenho da colagem de face do Pinho bravo sem tratamento foram estudadas dez referências de cola distintas e na maioria foram consideradas quatro combinações de parâmetros de fabrico das vigas de MLC (quantidade de cola e pressão de aperto);

- O Pinho bravo apresentou um bom desempenho na colagem de face para a generalidade das colas usadas. Estudos anteriores já tinham verificado a viabilidade da colagem de face com colas do tipo PRF e RF;

- Em pelo menos uma das combinações de quatro usadas, com exceção das referências EPI-1 e PUR-2+PR, foi registada delaminação total média inferior a 1,0% após o 2º ciclo de ensaio e próximo ou inferior a 1,0% após o 3º ciclo de ensaio do Método A;

- O melhor desempenho registado foi obtido pela colagem com a referência PUR-1 + PR, com delaminação total média de 0,1% após o 2º ciclo e 0,4% após o 3º ciclo;

- As três referências avaliadas da cola do tipo PUR registaram delaminação total excessiva, superior a 20% em algumas combinações de pressão de aperto e quantidade de cola. A aplicação prévia de primário conduziu à redução significativa da delaminação total para valores médios inferiores aos limites normativos, exceto na cola PUR-2+PR cuja delaminação total foi de 10,9% após o 3º ciclo;

- A colagem de face com cola PUR-1 decorridos 1, 7 e 14 dias após a aplicação de primário nas superfícies evidenciou em todos os casos um bom desempenho. Contudo, é de referir que foram tidas precauções para evitar o contacto entre superfícies até ocorrer a aplicação da cola;

- O desempenho das três referências de cola PRF foi semelhante, apesar de a cola PRF-3 ter apresentado os melhores resultados, com delaminação igual a 0,6% após o 3º ciclo;

- A cola MUF apresentou bom desempenho nas duas referências estudadas. Contudo requer um período de prensagem bastante prolongado comparativamente às restantes colas;

- A cola EPI apresentou um desempenho inadequado na generalidade das condições de fabrico estudadas, para as duas referências de cola. Destas, a EPI-2 é, ainda assim, a que se apresenta mais promissora, embora carecendo de validação futura.

- O efeito da diminuição/aumento da quantidade de cola/pressão de aperto diferiu entre as referências de cola estudadas, não sendo possível estabelecer um critério comum a todas as referências;

- A influência do tempo fechado foi avaliada em algumas referências de cola. Tempo fechado superior conduziu a melhores desempenhos da colagem de face, em particular nas referências PRF-1 e MUF-1;

- A presença de anéis de crescimento dispostos tangencialmente às linhas de cola adjacentes conduziu a delaminação excessiva em alguns provetes;

- A resistência ao corte não variou significativamente com o tipo de cola utilizada. Contudo, verificou-se a ocorrência de valores inferiores de WFP em provetes obtidos de elementos cuja delaminação total foi excessiva.

7.1.1.2 *Pinheiro bravo com tratamento*

- Na avaliação do desempenho da colagem de face do Pinho bravo com tratamento foram consideradas apenas a combinação (quantidade de cola e pressão de aperto) que melhores resultados apresentou e apenas as referências PRF-1, PRF-2, PRF-3, MUF-1 e PUR-1 (sem e com primário);

- Para a generalidade das referências de cola adotadas foi registado um bom desempenho da colagem após ambos os ciclos de ensaio de delaminação. Contudo, registaram-se valores médios superiores aos obtidos para Pinho bravo sem tratamento, por clara influência do tratamento preservador, tal como verificado por Gaspar (2010);

- Em relação à cola PRF-1 foram consideradas duas situações distintas: i) colagem de 2 elementos e ii) colagem de 4 elementos. No segundo caso, registou-se delaminação total excessiva em alguns provetes resultando em valores médios acima do limite máximo aceite pela norma;

- A influência do tempo fechado na delaminação total registada variou com a cola. Maior tempo fechado nas colagens realizadas com PUR-1+PR conduziu a um aumento substancial da delaminação total. Desempenho oposto foi registado com a referência MUF-1;

- Foi clara a influência negativa, no desempenho das colagens de face, da ocorrência de anéis de crescimento dispostos tangencialmente às linhas de cola, como já se tinha verificado nas colagens de Pinho bravo sem tratamento.

7.1.1.3 *Choupo*

- Dos resultados de delaminação total verificou-se que a colagem de Choupo produzido em Portugal é viável com colas do tipo PRF e MUF. Foram registados desempenhos excelentes com valores de delaminação total média inferiores aos registados com Pinho bravo sem tratamento;

- No entanto, uma quantidade de provetes muito reduzida apresentou delaminação superior aos limites da EN 14080 (2013). Da análise efetuada aos provetes identificou-se como possível causa para a delaminação excessiva os valores de massa volúmica mais elevados relativamente aos restantes provetes.

- A referência MUF-2 apresentou um excelente desempenho, com o maior valor de delaminação total média igual a 1,2%. Por outro lado, com a referência MUF-1 e razão resina/endurecedor de 100/35, os valores foram significativamente mais elevados, cumprindo ainda assim, o limite de 10% imposto pela norma EN 14080 (2013).

- A cola EPI-2 apresentou um desempenho inadequado para a colagem de face de Choupo. Uma das combinações apresentou valores médios abaixo dos limites máximos após o 3º ciclo, apesar de apresentar valores individuais com delaminação total superior a 10%;

- O desempenho da colagem de face com a cola PUR foi inadequado, a exemplo do que foi registado no Pinho bravo (sem e com tratamento).

- No entanto, a aplicação de primário na colagem com cola PUR conduziu a um desempenho adequado à colagem de face. Apesar de se registarem alguns valores individuais de delaminação total acima de 10%, esses correspondem a provetes maioritariamente localizados nos topos dos elementos, o que pode estar relacionado com a ausência de primário em zonas próximas das extremidades das lamelas.

Na generalidade dos resultados verificou-se um bom desempenho da colagem de face do Pinho bravo e do Choupo para as colas PRF, MUF e PUR+PR. Por outro lado, as referências de cola EPI apresentaram inadequado desempenho na maioria das condições de fabrico estudadas.

7.1.2 Integridade das linhas de cola após envelhecimento

Uma vez definidos os parâmetros ideais de colagem de face para o Pinho bravo (sem e com tratamento preservador), decidiu-se apreciar o desempenho das linhas de cola em situação de envelhecimento natural causado por exposição a agentes atmosféricos (sol, chuva e vento). No total foram produzidos 42 elementos de Pinho bravo (sem e com tratamento preservador) com dimensões aproximadas de 105 mm x 180 mm x 1450 mm, com 3 referências de cola (PRF-1, PRF-3 e PUR-1+PR).

Da avaliação da superfície de elementos após 4, 6, 9 e 18 meses de envelhecimento, verificou-se nos elementos de Pinho bravo sem tratamento a ocorrência de manchas acinzentadas na face sul, decorridos 6 meses de envelhecimento. Os elementos que foram alvo de proteção (pintura) mantiveram a cor inicial. Contudo, após 7 meses de exposição a pintura incolor começava a apresentar sinais de degradação na face superior dos 3 elementos de Pinho bravo com tratamento preservador. Aos 9 meses de envelhecimento natural a degradação foi registada também na face sul dos elementos TMP_{env} . Os elementos MP_{env} protegidos com pintura à base de solução aquosa/solvente não apresentavam, após 9 meses de envelhecimento, quaisquer sinais de degradação da pintura nas faces sul e norte.

Da quantificação do comprimento de delaminação ocorrida nas linhas de cola, face sul e face norte, dos elementos sem proteção concluiu-se que o desempenho nos elementos MP_{env} foi semelhante independentemente da cola utilizada no seu fabrico até aos 9 meses e apresentou pior desempenho na cola PRF-1 aos 18 meses.

Os elementos TMP_{env} apresentavam após 18 meses de envelhecimento um desempenho menos eficiente em comparação com os elementos MP_{env} . No caso do elemento colado com cola PRF-1, a ocorrência de delaminação atingiu 41% do comprimento total de linha de cola (face sul) e no caso do elemento colado com PUR-1+PR atingiu o valor máximo de 47% (face sul). O desempenho no elemento colado com cola PUR-1+PR foi significativamente melhor até aos 9 meses de envelhecimento, com 19,5% comprimento de delaminação em relação ao total do comprimento de linha de cola na face sul. Verificou-se uma redução aos 18 meses para o elemento colado com a cola PRF-3, o que se verificou poder estar relacionado com a menor área da secção transversal com retenção de produto preservador.

A avaliação da integridade da colagem foi realizada através de ensaios de delaminação em provetes extraídos dos elementos após envelhecimento. O desempenho dos elementos MP_{env} foi bastante positivo, uma vez que não foram registados provetes com delaminação excessiva. Em relação aos elementos TMP_{env} , foram registados valores de delaminação total média superior a 5% após o 2º ciclo, com diversos provetes a apresentarem delaminação excessiva. Após o 3º ciclo os valores médios cumpriram o limite máximo de 10%. Nos elementos colados com PRF-3 e PUR-1+PR foi clara a tendência de aumento da delaminação com o aumento do tempo de envelhecimento.

A resistência ao corte pela linha de cola e pela madeira após envelhecimento foi idêntica à registada nos provetes sem envelhecimento. Foi ainda registada uma relação clara entre a percentagem de rotura pela madeira e a ocorrência de delaminação excessiva.

7.1.3 Caracterização mecânica de elementos de madeira lamelada colada

Após verificada a viabilidade de colagem das espécies Pinheiro bravo e Choupo com recurso a diferentes tipos de cola, foi analisado o comportamento mecânico de vigas com dimensões 92 x 120 x 2400 mm³, constituídas por 5 lamelas de 24 mm de espessura cada. No total foram produzidas em laboratório 42 vigas com 5 configurações distintas, 3 das quais foram integralmente constituídas por uma só espécie: i) MP, ii) BP, iii) BG. As restantes 2 configurações foram produzidas a partir da combinação de espécies: iv) HMPBP e v) HBGBP.

No processo de fabrico das vigas foram caracterizadas 210 tábuas para determinação da massa volúmica e avaliação do módulo de elasticidade por ensaio não destrutivo de vibração longitudinal. O processo foi aplicado novamente após o aparelhamento das tábuas para a sua dimensão final antes da montagem, permitindo a reorganização das lamelas em função do módulo de elasticidade dinâmico sempre que necessário.

Foram considerados dois métodos analíticos para predição do módulo de elasticidade das vigas, nomeadamente o método baseado na teoria da viga de Timoshenko e o método da secção transformada. Cada viga foi alvo de ensaios mecânicos para determinação do módulo de elasticidade estático local e global e da resistência à flexão. Consequentemente foram determinadas a respetiva massa volúmica e o teor de água, e verificada a qualidade da colagem. Seguidamente apresentam-se as principais conclusões.

Os valores médios mais baixos do módulo de elasticidade foram registados para as vigas BP (10975 MPa), o que está de acordo com o previsto tendo em conta a menor massa volúmica do Choupo (424 kg/m^3). Em sentido oposto, as vigas BG apresentaram o valor mais elevado (24174 MPa) impulsionado por um valor de massa volúmica média superior às restantes (968 kg/m^3). As vigas MP apresentaram valor médio de 13680 MPa, para massa volúmica média de 629 kg/m^3 . A mesma tendência foi registada para a resistência à flexão, tendo-se registado um valor médio de 52,5 MPa para as vigas BP, 58,5 MPa para vigas MP e 121,4 MPa para as vigas BG.

A combinação de espécies no mesmo elemento estrutural permitiu obter desempenhos apreciáveis no que diz respeito ao módulo de elasticidade, tendo-se registado nas vigas HMPBP um aumento de 23% em relação às vigas BP e valores semelhantes (um decréscimo de 1%) em relação às vigas MP. A análise dos valores de resistência à flexão revela para as vigas HMPBP valores 15% superiores às vigas BP e 3% superiores às vigas MP. É de realçar o excelente ganho proporcionado pela combinação do Pinho bravo com Choupo, tendo em conta a redução 15,5% na massa volúmica em relação às vigas MP.

Nas vigas HBGBP registaram-se valores de módulo de elasticidade 78,4% superiores às vigas BP e 19% inferiores às vigas BG. A resistência à flexão das vigas HBGBP foi 73% superior à das vigas BP e 25% inferior à das vigas BG. Note-se que a massa volúmica média das vigas HBGBP era de $659,1 \text{ kg/m}^3$, valor semelhante ao das vigas de Pinho bravo ($629,2 \text{ kg/m}^3$).

Para melhor avaliar o desempenho de cada tipo de viga foi determinada a eficiência estrutural definida pela relação entre propriedade mecânica (módulo de elasticidade ou resistência à flexão) e massa volúmica. Sem margem para dúvidas, a melhor eficiência estrutural foi obtida nas vigas HBGBP com valor de 29,3 para o módulo de elasticidade e 0,15 para a resistência à flexão, seguidos por valores bastante inferiores (semelhantes entre si) para as vigas BP e HMPBP, com 24,8 e 24,4, respetivamente para o módulo de elasticidade e para as vigas BP e BG, com 0,13 e 0,12, respetivamente para a resistência à flexão. A menor eficiência estrutural foi registada nas vigas MP, com os valores 20,3 e 0,10 respetivamente para o módulo de elasticidade e para a resistência à flexão.

Nos ensaios de resistência à flexão foi observada a ocorrência de deformações significativas fora do comportamento elástico linear normalmente associado à rotura da madeira em flexão. Nas vigas em que a curva força vs deformação apresentou não linearidade registou-se a ocorrência de pregas de compressão na primeira lamela posicionada à compressão e por vezes na lamela adjacente. Este comportamento foi notório nas vigas BP que apresentavam lamelas exteriores com módulo de elasticidade dinâmico superior a 10500 MPa (compressão e tração). Nas vigas HMPBP-2, BG e HBGBP também se registaram deformações significativas fora do regime elástico linear.

A utilização do método de vibração longitudinal permitiu não só prever as propriedades mecânicas das vigas através da sua aplicação nas mesmas como fornecer informação sobre as lamelas para aplicação dos métodos analíticos usados para previsão do módulo de elasticidade das vigas. Os 2 métodos analíticos considerados (TSM e Timoshenko) estimaram valores médios semelhantes entre si e mais próximos dos valores medidos experimentalmente do que o método de vibração longitudinal das vigas, que apresentou valores inferiores. O método TSM é indicado para vigas com 3 zonas de rigidez definidas e simétricas em relação ao eixo da secção transversal e o método denominado no presente trabalho por TIMO exige alguns cálculos extra mas não exige simetria de rigidez na secção e permite aplicação num número indefinido de zonas de rigidez distinta.

A análise de correlações lineares simples permitiu avaliar a fiabilidade da aplicação dos métodos referidos para previsão das propriedades mecânicas das vigas. Considerando a amostra de 42 vigas, obtiveram-se valores de coeficientes de correlação excelentes tanto para a previsão do módulo de elasticidade como para a resistência à flexão, apesar da significativa diferença de valores de massa volúmica entre as diferentes configurações de viga e consequentes propriedades mecânicas. Com efeito, os coeficientes de correlação para o módulo de elasticidade variaram entre 0,89 (HMPBP) e 0,99 (BG) pelo método TSM, entre 0,90 (MP e HMPBP) e 0,98 (BG) para o método TIMO e entre 0,79 (BP) e 1,00 (HBGBP) para o método de vibração longitudinal aplicado às vigas. De referir que em alguns casos o número de vigas foi reduzido, pelo que os valores referidos indicam apenas uma tendência, em especial nas vigas BG e HBGBP, com 4 e 3 vigas respetivamente.

Quanto à resistência à flexão, os coeficientes de correlação determinados entre os valores reais e as previsões são bastante díspares, variando de 0,33 a 1,00. Focando a análise nas vigas BP cujo número de vigas permite ter confiança nos resultados, registaram-se valores entre 0,76 (vibração longitudinal) e 0,86 (TSM). Nas amostras MP e HMPBP os valores foram significativamente mais baixos, registando-se valores de 0,33 na amostra HMPBP para o método TSM e 0,60 para a vibração longitudinal. Na amostra MP os valores foram mais homogêneos variando entre 0,60 (vibração longitudinal) e 0,67 (método TSM).

A previsão da resistência à flexão das vigas por correlação com o módulo de elasticidade global estático apresenta valores idênticos aos mais elevados apresentados pelos restantes métodos (analíticos e vibração longitudinal).

Tendo em conta os resultados, é de registar a importância do método de vibração longitudinal na caracterização não destrutiva das tábuas/lamelas, que permite a obtenção de informação de extrema importância a considerar nos métodos analíticos. Estes, por sua vez, permitem com elevado rigor a previsão das propriedades mecânicas de uma viga mesmo antes da mesma ser produzida, afigurando-se esta como a principal vantagem em relação à aplicação da vibração longitudinal após o fabrico da viga.

Por fim, confirmou-se um excelente desempenho das colagens realizadas nas vigas MP, BP e HMPBP. As vigas BG e HBGMP apresentaram delaminação total média bastante acima dos valores normativos máximos para resinosas e Choupo. Este inadequado desempenho foi também observado pelos valores inferiores de WFP. No entanto, é de referir que apesar de a qualidade de colagem não ter sido assegurada, não se verificou influência da mesma no desempenho mecânico das vigas.

7.1.4 Modelação numérica através de elementos finitos

A modelação numérica através de elementos finitos teve por objetivo conseguir descrever o comportamento força vs deformação registado nos ensaios experimentais através de um modelo numérico simples. Para tal foi usado o *software* comercial Abaqus CAE.

O comportamento de cada viga foi definido com base nas constantes elásticas de cada espécie, nomeadamente: módulo de elasticidade, módulo de distorção e coeficientes de Poisson. Para o módulo de elasticidade na direção principal foi adotado para cada lamela o respetivo módulo de elasticidade dinâmico. As restantes constantes elásticas foram definidas pelas relações entre as mesmas e o módulo de elasticidade longitudinal, referidas na literatura.

De modo a obter uma representação adequada do comportamento das vigas, foram recolhidos troços das lamelas posicionadas à compressão e à tração, sem presença de defeitos associados à rotura das vigas, para caracterizar o comportamento mecânico das espécies. Para tal foram realizados ensaios de tração e de compressão em madeira limpa, tendo-se registado um comportamento elástico linear à tração e elasto-plástico à compressão.

Da análise de resultados em comportamento elástico registou-se um bom ajustamento entre valores de módulo de elasticidade, com erros absolutos médios a variar entre 5,5%

(HMPBP) e 8,1% (HBGBP). A análise de regressão linear simples entre resultados do módulo de elasticidade conduziu a valores de coeficientes de correlação entre 0,83 (HMPBP) e 0,98 (BG). Como referido para a análise anterior, em algumas combinações o número de vigas é bastante pequeno para conclusões exatas. No entanto, na amostra BP com 21 vigas, foi obtido um valor de 0,94.

Na análise do comportamento plástico das vigas, foram comparados os valores medidos e estimados pelo modelo para a resistência à flexão correspondentes à deformação última registada experimentalmente. Foram obtidos ajustamentos bastante significativos entre os resultados experimentais e o modelo numérico, que resultaram em erros absolutos médios entre 6,4% (HBGBP) e 8,6% (HMPBP e BG). No sentido de analisar as deformações em regime não linear, 8 vigas foram instrumentadas com 2 extensómetros a meio vão, 1 na lamela posicionada à tração e outro na lamela posicionada à compressão. A comparação dos gráficos força vs extensão revelou um ajuste bastante próximo principalmente nas vigas HMPBP e BP.

Foram também comparadas as curvas força vs deformação experimental e resultante da simulação numérica para todas as vigas, verificando-se um bom ajustamento, para valores obtidos até ao patamar máximo experimental de resistência à flexão das vigas.

Por fim, foi decidido apresentar um critério de truncagem baseado nas extensões máximas de compressão e tração obtidas da caracterização mecânica de provetes de madeira limpa. Os erros absolutos registados pela truncagem com base nas extensões máximas de tração (entre 7,3% (HBGBP) e 22,6% (BG)) foram inferiores aos obtidos quando considerado o critério de truncagem com base nas extensões máximas de compressão (entre 22,3% (HMPBP) e 36,7% (BG)). Os valores de erro absoluto médio podem ser reduzidos se se considerarem no caso das vigas MP e BP os valores relativos à truncagem por via de extensões de compressão nas vigas que apresentaram comportamento elástico linear até à rotura. Deste modo podem ser obtidos erros absolutos médios de 7,2% para as vigas MP (vigas MP3 e MP4 excluídas da análise), 10,2% nas vigas BP.

7.2 Desenvolvimentos futuros

O presente trabalho teve como principal objetivo o estudo do comportamento mecânico de elementos estruturais de madeira lamelada colada. Com base nas conclusões apresentadas anteriormente, são elencados alguns aspetos suscetíveis de desenvolvimento em trabalhos futuros:

- Estudo da viabilidade da colagem de face de Eucalipto com outras formulações de primário;
- Avaliação do desempenho da cola PUR-3+PR na colagem de Choupo;

-
- Avaliação do desempenho da cola PUR-1 considerando primário com menor concentração, no caso do Pinho bravo;
 - Estudo do comportamento mecânico de ligações por entalhes múltiplos (*finger-joints*) e da sua introdução em vigas;
 - Avaliação a longo prazo da integridade das linhas de cola após exposição natural em elementos de MLC de Choupo e Eucalipto;
 - Desenvolvimento de *settings* de classificação não destrutiva por via da vibração longitudinal para as espécies Choupo e Eucalipto;
 - Continuidade da análise do comportamento mecânico das tipologias de vigas estudadas, de modo a obter um conjunto de resultados com maior significado estatístico;
 - Caracterização mecânicas de vigas produzidas com madeira de Pinho bravo com tratamento preservador;
 - Caracterização mecânica de MLC à compressão e à tração;
 - Otimização do comportamento mecânico à flexão das combinações Pinho bravo com Choupo e Eucalipto com Choupo;
 - Introdução de critérios de rotura específicos para madeira como é exemplo o critério de fratura;
 - Continuidade da análise do comportamento mecânico de madeira limpa à tração e à compressão de modo a ter uma amostra estatisticamente significativa, nomeadamente para o Pinho bravo e Eucalipto;
 - Caracterização de madeira estrutural e de ligações por entalhes múltiplos à tração para introdução em modelos analíticos disponíveis na literatura;
 - Aplicabilidade de vigas de MLC com comportamento dúctil em elementos estruturais madeira-betão, nomeadamente em soluções de múltiplos vãos;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (1997). NBR 7190 - Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, Brasil, Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- Acker, J. V., N. Defoirdt e J. V. Bulcke (2016). "Enhanced potential of poplar and willow for engineered wood products." 2nd Conference on Engineered Wood Products based on Poplar/willow Wood. J. V. Acker. León, Spain, Ghent University.
- Almeida, D. H. d., R. Cavalheiro, L. Macêdo, C. Neto, A. Christoforo, C. C. Junior e F. Lahr (2014). "Evaluation of Quality in the Adhesion of Glued Laminated Timber (Glulam) of Paricá and Lyptus Wood Species." *International Journal of Materials Engineering* 4(3): 5.
- Alvite, J. D. B., M. T. Vázquez e F. S. Infante (2002). "Manual de la madeira de eucalipto blanco." Ourense, Fundación para o Fomento da Calidade Industrial e Desenvolvemento Tecnolóxico de Galicia.
- APA (2008). Glulam Product Guide. www.apawood.org, APA - The Engineered Wood Association.
- ASTM D 905-03 (2003). Standard test method for strength properties of adhesives bond in shear by compression loading, American Society for Testing and Materials.
- ASTM D 3737-05 (2005). Standard Practices for Establishing Allowable Properties for Structural Glued Laminated Timber (Glulam). American Society for Testing and Materials.
- ASTM D 1101-97a (2006). Standard test methods for integrity of adhesive joints in structural laminated wood products for exterior use. American Society for Testing and Materials.
- ASTM D1828 (2007). Standard Practice for Atmospheric Exposure of Adhesive-Bonded Joints and Structures. Annual book of ASTM standards. American Society for Testing and Materials.
- Balatinecz, J. J. e D. E. Kretschmann (2001). "Chapter 9 - Properties and utilization of poplar wood." *Poplar Culture in North America*. D. I. Dickmann, J. G. Isebrands, J. E. Eckenwalder e J. Richardson. Ottawa, NRC Research Press.
- Balsa, J. (2013). "Avaliação destrutiva e não destrutiva de elementos de madeira de Pinheiro bravo." Departamento de Engenharia Civil. Coimbra, Universidade de Coimbra. MSc: 80.
- Biblis, E. J. (1966). "Design considerations for laminated wood beams composed of two species." *Forest Products Journal* 16(7).
- Biblis, E. J. (1967a). "Shear deflection of two species laminated wood beams." *Wood Science and Technology* 1: 231.

- Biblis, E. J. (1967b). "Strength-weight and stiffness-weight ratios of two species wood beams." *Forest Products Journal* 17(8).
- Bodig, J. e B. A. Jayne (1993). "Mechanics of Wood and Wood Composites." Florida, United States of America, Krieger Publishing Company.
- Boever, L. D., J. V. Bulcke e J. V. Acker (2016). "Potential of thermally modified poplar wood for construction products." 2nd Conference on Engineered Wood Products based on Poplar/willow Wood, León, Spain.
- Bourreau, D. (2011). "Feasibility study of glued laminated timber with Guianese hardwoods (em Francês)." Universidade des Antilles et de la Guyane. Cayene. 164p.
- Bourreau, D., Y. Aimene, J. Beauchêne e B. Thibaut (2013). "Feasibility of glued laminated timber beams with tropical hardwoods." *European Journal of Wood and Wood Products* 71(5): 653-662.
- Brites, R. D., P. B. Lourenço e J. S. Machado (2012). "A semi-destructive tension method for evaluating the strength and stiffness of clear wood zones of structural timber elements in-service." *Construction and Building Materials* 34: 136-144.
- Candian, M. e A. Sales (2009). "Aplicação das técnicas não-destrutivas de ultra-som, vibração transversal e ondas de tensão para avaliação de madeira." *Ambiente Construído* 9: 83-98.
- Carreira, M. R., A. B. Cheung, F. G. R. Oliveira, A. A. Dias, C. C. Junior, A. Sales e M. Candian (2006). "Classificação de peças estruturais de Pinus SP por ultra-som." 17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais. Foz do Iguaçu, PR, Brasil.
- Casado, M., L. Acuña, L. A. Basterra, G. R. Cueto e D. Vecilla (2012). "Grading of structural timber of Populus x euramericana clone I-214." *Holzforschung* 65.
- Castro, G. e G. Fragnelli (2006). "New Technologies and Alternative Uses for Poplar Wood." *Boletín del CIDEU* 2: 27-36.
- Castro, G. e F. Paganini (1999). "Poplar-Eucalyptus Glued Laminated Timber." *Proceedings of EUROWOOD Technical Workshop "Industrial end-uses of fast-grown species"*, Florence.
- Castro, G. e F. Paganini (2003). "Mixed glued laminated timber of poplar and Eucalyptus grandis clones." *Holz Als Roh-Und Werkstoff* 61(4): 291-298.
- Cizmar, D., D. Damjanovic, K. Pavkovic e V. Rajcic (2014). "Ductility analysis of laminated timber beams of small section height." *GRADEVINAR* 66(5): 395-406.
- Clough, R. W. e J. Penzien (1993). "Dynamics of structures." McGraw - Hill International Editions.
- Colling, F. (1990). "Tragfähigkeit von Biegeträgern aus Brettschichtholz in Abhängigkeit von den festigkeitsrelevanten Einflussgrößen." Karlsruhe, Universität Karlsruhe. PhD.

- Correal, J., F. Ramirez, S. Gonzalez e J. Camacho (2010). "Structural behavior of glued laminated guadua bamboo as a construction material." WCTE 2010 - 11th World Conference on Timber Engineering, Riva del Garda, Trentino, Italy: 6.
- Crespo, J., J. R. Aira, C. Vázquez e M. Guaita (2017). "Comparative Analysis of the Elastic Constants Measured via Conventional, Ultrasound, and 3-D Digital Image Correlation Methods in Eucalyptus globulus Labill." *Bioresources*. 12 (2). 3728-3743.
- Cruz, H. (1985). "Aplicação da madeira de Pinho bravo em estruturas lameladas coladas. Ensaio de colagem para uso em condições de exposição exterior." Relatório 267/85-NM. Lisboa, LNEC.
- Cruz, H. (2007). "Estruturas de madeira lamelada colada em Portugal. Instrumentos para a garantia de qualidade." *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas*. Lisboa, LNEC. Série II.
- Cruz, H. e L. Nunes (2009). "Estruturas de Madeira – Durabilidade e Proteção de Estruturas de Madeira." *Construção Magazine*. 34.
- Custodio, J., J. Broughton, H. Cruz e A. Hutchinson (2008). "A review of adhesion promotion techniques for solid timber substrates." *Journal of Adhesion* 84(6): 502-529.
- Custodio, J., J. Broughton e H. Cruz (2009). "A review of factors influencing the durability of structural bonded timber joints." *International Journal of Adhesion and Adhesives* 29(2): 173-185.
- Dias, A. M. P. G., P. Palma, J. Custódio, J. S. Machado e H. Cruz (2009). "Avaliação, Conservação e Reforço de Estruturas de Madeira". Verlag Dashöfer Portugal.
- Dias, A. (2016). "Influência da fase de tratamento na qualidade de colagem de madeira de Pinheiro Bravo." Departamento de Engenharia Civil. Coimbra, Universidade de Coimbra. Msc.
- Ebnesajjad, Ed. (2008). "Adhesives Technology Handbook." Norwich, NY, USA, William Andrew.
- EN 301 (2006). Adhesives, phenolic and aminoplastic, for load-bearing timber structures - Classification and performance requirements. European Committee for Standardization, Brussels.
- EN 302-1 (2004). Adhesives for load-bearing timber structures - Test methods - Part 1: Determination of bond strength in longitudinal tensile shear strength. European Committee for Standardization, Brussels.
- EN 302-2 (2004). Adhesives for load-bearing timber structures - Test methods - Part 2: Determination of resistance to delamination. European Committee for Standardization, Brussels.
- EN 338 (2003). "Structural timber - Strength Classes." European Committee for Standardization, Brussels.

-
- EN 350-2 (1994). Durability of wood and wood-based products - Natural durability of solid wood - Part 2: Guide to natural durability and treatability of selected wood species of importance in Europe. European Committee for Standardization, Brussels.
- EN 384 (2004). Structural timber - Determination of characteristic values of mechanical properties and density. European Committee for Standardization, Brussels.
- EN 385 (2001). Finger jointed structural timber - Performance requirements and minimum production requirements. European Committee for Standardization, Brussels.
- EN 386 (2001). Glued laminated timber - Performance requirements and minimum production requirements. European Committee for Standardization, Brussels.
- EN 387 (2001). Glued laminated timber. Large finger joints. Performance requirements and minimum production requirements. European Committee for Standardization, Brussels.
- EN 390 (1994). Glued laminated timber - Sizes - Permissible deviations. European Committee for Standardization, Brussels.
- EN 391 (2001). Glued laminated timber - Delamination test of glue lines. European Committee for Standardization, Brussels.
- EN 392 (1995). Glued laminated timber - Shear test of glue lines. European Committee for Standardization, Brussels.
- EN 408 (2012). Timber structures - Structural timber and glued laminated timber - Determination of some physical and mechanical properties. European Committee for Standardization, Brussels.
- EN 1912 (2013). Structural timber - Strength classes - Assignment of visual grades and species. European Committee for Standardization, Brussels.
- EN 1194 (1999). Timber structures - Glued laminated timber - Strength classes and determination of characteristic values. European Committee for Standardization, Brussels.
- EN 1995-1-1 (2003). Eurocode 5 - Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings. European Committee for Standardization, Brussels.
- EN 13183-1 (2002). Moisture content of a piece of sawn timber - Part 1: Determination by oven dry method. European Committee for Standardization, Brussels.
- EN 14080 (2005). Timber structures - Glued laminated timber - Requirements. European Committee for Standardization, Brussels.
- EN 14080 (2013). Timber structures - Glued laminated timber and glued solid timber - Requirements. European Committee for Standardization, Brussels.
- EN 14081-1 (2005). Timber structures - Strength graded structural timber with rectangular cross section - Part 1: General requirements. European Committee for Standardization, Brussels.
-

- EN 14081-4 (2009). Timber structures - Strength graded structural timber with rectangular cross section - Part 4: Machine grading - Grading machine settings for machine controlled systems. European Committee for Standardization, Brussels.
- Feio, A. O., J. S. Machado e P. B. Lourenço (2005). "Parallel to the grain behaviour and NDT correlations for chestnut wood (*Castanea Sativa* Mill)." Conservation of Historic Wooden Structures. Florence.
- Fink, G., A. Frangi e J. Kohler (2014). "Bending tests on GLT beams having well-known local material properties." *Materials and Structures*: 1-14.
- França, L. C. A. (2012). "Madeira laminada colada de *Acacia mangium* Wild produzida com adesivos estruturais." Departamento de Ciências Florestais e da Madeira. Espírito Santo, Brasil, Universidade Federal do Espírito Santo: 50.
- Franco da Costa, J. (1978). "Aplicação da madeira de Pinho bravo em estruturas coladas. Viabilidade de colagem." Relatório – Proc. 33/11/6150. Lisboa, LNEC.
- Franke, S. e J. Marto (2014). "Investigation of *Eucalyptus globulus* wood for the use as an engineered material." WCTE 2014 - World Conference on Timber Engineering. Quebec City, Canada.
- Frese, M. e H. J. Blass (2005). "Beech Glulam Strength Classes." International Council for Research and Innovation in Building and Construction. Karlsruhe, Germany.
- Frese, M. e H. J. Blass (2006). "Characteristic bending strength of beech glulam." *Materials and Structures* 40(1): 3-13.
- Frese, M. e H. J. Blass (2009). "Bending strength of spruce glulam." *European Journal of Wood and Wood Products* 67(3): 277-286.
- Frese, M., F. Hunger, H. J. Blass e P. Glos (2010a). "Validation of strength models for softwood glulam (in German)." *European Journal of Wood and Wood Products* 68(1): 99-108.
- Frese, M., Y. Chen e H. J. Blass (2010b). "Tensile strength of spruce glulam." *European Journal of Wood and Wood Products* 68(3): 257-265.
- Frese, M., M. E. Comberg, H. J. Blass e P. Glos (2012). "Compressive strength of spruce glulam." *European Journal of Wood and Wood Products* 70(6): 801-809.
- Gao, Y., Y. Wu, X. Zhu, L. Zhu, Z. Yu e Y. Wu (2015). "Numerical Analysis of the Bending Properties of Cathay Poplar Glulam." *Materials* 8.
- Gaspar, F. (2006). "Estruturas de madeira lamelada-colada - Viabilidade da utilização da madeira de Pinho bravo tratada com produto preservador." Lisboa, Portugal, Instituto Superior Técnico. MSc.
- Gaspar, F., H. Cruz, L. Nunes e A. Gomes (2005). "Fabrico de estruturas lameladas-coladas com madeira de Pinho bravo tratada em autoclave." Proceedings do 5º Congresso Florestal, Viseu.
- Gaspar, F. J. M. (2010). "Avaliação da integridade de estruturas de madeira lamelada colada em serviço." Instituto Superior Técnico. Lisboa, Portugal, Universidade Técnica de Lisboa. PhD: 382.

- Gaspar, F., H. Cruz e A. Gomes (2015). "Modeling the influence of delamination on the mechanical performance of straight glued laminated timber beams." *Construction and Building Materials* 98: 447-455.
- Green, D. W., J. E. Winandy e D. E. Kretschmann (1999). "Mechanical Properties of Wood. Wood as a engineering material. Madison." WI, Forest Products Laboratory.
- Grippa, M. R., B. Faggiano, A. Marzo e F. M. Mazzolani (2010). "Combined methods for in situ mechanical identification of ancient timber structures based on non-destructive tests." WCTE 2010. Trento, Itália.
- Grostad, K. e R. Bredesen (2014). "EPI for Glued Laminated Timber. Materials and Joints in Timber Structures: Recent Developments of Technology." S. Aicher, H. W. Reinhardt and H. Garrecht. Dordrecht, Springer. 9: 355-364.
- Guitard, D. (1987). "Mécanique du Matériau Bois et Composites." Toulouse, France, Cépaudes-Editions.
- Hayashi, T. e A. Miyatake (2015). "Recent research and development on sugi (Japanese cedar) structural glued laminated timber." *Journal of Wood Science* 61(4).
- Hodousek, M., A. M. P. G. Dias, C. Martins, A. F. S. Marques e M. Böhm (2017). "Comparison of Non-Destructive Methods Based on Natural Frequency for Determining the Modulus of Elasticity of *Cupressus lusitanica* and *Populus x canadensis*." *Bioresources* 12(1): 270-282.
- ICNF (2013). "IFN6 - Áreas dos usos do solo e das espécies florestais de Portugal Continental em 1995, 2005 e 2010." I. d. C. d. N. e. d. Florestas. Lisboa: 34.
- Jiang, Y., J. Schaffrath, M. Knorz e S. Winter (2014). "Bonding of Various Wood Species - Studies about Their Applicability in Glued Laminated Timber." *Materials and Joints in Timber Structures: Recent Developments of Technology* 9: 365-374.
- Jiang, Y., J. Schaffrath, M. Knorz, S. Winter e J. W. van de Kuilen (2014). "Applicability of various wood species in glued laminated timber – parameter study on delamination resistance and shear strength". WCTE 2014. Quebec, Canada.
- Kandler, G., J. Füssl, E. Serrano e J. Eberhardsteiner (2015). "Effective stiffness prediction of GLT beams based on stiffness distribution of individual lamellas." *Wood Science and Technology* 49: 1101-1121.
- Kandler, G., M. Lukacevic e J. Füssl (2018). "Experimental study on glued laminated timber beams with well-known knot morphology." *European Journal of Wood and Wood Products* 76: 1435-1452.
- Kessel, M. H. e M. Guenther (2006). "Assessment of the load bearing capacity of defectively glued laminated timber." WCTE 2006 - 9th World Conference on Timber Engineering. Portland, OR, USA.
- Knorz, M., M. Schmidt, S. Torno e J. W. van de Kuilen (2014). "Structural bonding of ash (*Fraxinus excelsior* L.): resistance to delamination and performance in shearing tests." *European Journal of Wood and Wood Products* 72(3): 297-309.

- Konnerth, J., M. Kluge, G. Schweizer, M. Miljkovic e W. G. Altmutter (2016). "Survey of selected adhesive bonding properties of nine European softwood and hardwood species." *European Journal of Wood and Wood Products* 74: 809-819.
- Kretschmann, D. E. (2010). "Mechanical Properties of Wood. Wood Handbook - Wood as an Engineering Material Madison." WI: U.S., Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.: 508.
- Lampreia, N. (2010). "Utilização de promotores de adesão no fabrico de estruturas de madeira lamelada colada." Departamento de Engenharia Civil. Lisboa, Portugal, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. MSc: 152.
- Lampreia, N., H. Cruz, J. A. Fernandes e J. Custódio (2011). "Utilização de promotores de adesão no fabrico de estruturas de madeira lamelada colada de Pinho bravo." CIMAD 11 - 1º Congresso Ibero-LatinoAmericano da Madeira na Construção. Coimbra, Portugal: 10.
- Lee, J. J., J. S. Park, K. M. Kim e J. K. Oh (2005). "Prediction of bending properties for structural glulam using optimized distributions of knot characteristics and laminar MOE." *J Wood Sci* 51: 8.
- Lopez-Suevos, F. e K. Richter (2009). "Hydroxymethylated Resorcinol (HMR) and Novolak-Based HMR (n-HMR) Primers to Enhance Bond Durability of Eucalyptus globulus Glulams." *Journal of Adhesion Science and Technology* 23(15): 1925-1937.
- Machado, J. (2000). "Avaliação da variação das propriedades mecânicas de Pinho bravo (*Pinus pinaster Ait.*)." Instituto Superior de Agronomia. Lisboa, Universidade Técnica de Lisboa. Tese de Doutoramento.
- Marra, A. A. (1992). "Technology of wood bonding: principles in practice." New York. V. N. Reinhold. 454p.
- Martins, M. J. R. (2015). "Caracterização do Eucalipto globulus para aplicação estrutural." Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra. Mestre: 80.
- Mirzaei, G., B. Mohebbi e G. Ebrahimi (2018). "Technological properties of glulam beams made from hydrothermally treated poplar wood." *Wood Material Science and Engineering* 13(1): 36-44.
- Moody, R. C. (1974). "Design criteria for larger structural glued-laminated timber beams using mixed species of visual graded lumber." USDA Forest Service - Res. Paper, FPL.
- Morgado, T. F. M., J. Rodrigues, J. S. Machado, A. M. P. G. Dias e H. Cruz (2009). "Bending and compression strength of Portuguese Maritime pine small-diameter poles." *Forest Products journal* 59(4): 23-28.
- Morgado, T. F. M., A. M. P. G. Dias, J. S. Machado, J. H. Negrão e A. F. S. Marques (2016). "Grading of Portuguese Maritime Pine Small-Diameter Roundwood." *Journal of Materials in Civil Engineering*: 7.

- Nakamura, N. e K. Fujita (2011). "Simulation method to generate the strength of glulam using correlated random variables." *Journal of Wood Science* 57(3): 203-207.
- Negrão, J. H. (2010). "Estruturas de madeira em Portugal - Presente e passado recente." CIMAD 11- 1º Congresso Ibero-LatinoAmericano da Madeira na Construção, Coimbra, Portugal.
- Obucina, M., E. Gonzic e S. Smajic (2014). "The Influence of Amount of Layer on the Bending Strenght by Longitudinal Finger-Jointing Wood Elements." 24th Daaam International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation. 69: 1094-1099.
- Oscarsson, J., A. Olsson e B. Enquist (2014). "Improving Strength of Glulam Laminations of Norway Spruce Side Boards by Removal of Weak Sections Using Optimized Finger Jointing." *Materials and Joints in Timber Structures: Recent Developments of Technology* 9: 801-811.
- Paganini, F. e G. Castro (2000). "Legno lamellare misto abete-pioppo." *Mondo Legno* 47: 46-55.
- Paganini, F. e G. Castro (2001). "Legno lamellare misto larice-pioppo." *Mondo Legno* 53: 38-45.
- Pitzner, B. e P. Lind (2005). "Gluing of Norway spruce and Scots pine with and EPI-adhesive (emulsion polymer isocyanate) - An activity in the SSFF-project." *Norsk Treteknisk Institutt (NTI)*.
- Plaster, O. B., J. R. S. Oliveira, C. P. Abrahão e R. L. Braz (2008). "Comportamento de juntas coladas da madeira serrada de eucalyptus sp." *Cerne* 14(3): 251-258.
- Pontífice de Sousa, P. M. (1990). "Estruturas de madeira lamelada-colada, Viabilidade da utilização do Pinho bravo." Tese para especialista - Proc. 083/11/9342. Lisboa, LNEC.
- Portal do Clima (2018). "www.portaldoclima.pt". Acedido a 06-09-2018.
- Prieto, E. H., J. I. F. G. Seco, M. R. D. Barra e R. M. Pérez (2007). "Aplicación de los ultrasonidos a la evaluación de las propiedades mecánicas de la madera en rollo de pequeño diámetro." *Informes de la Construcción* 59(506): 87-95.
- Ranta-Maunus, A. (1999). "Round small-diameter timber for construction." *VTT Publications* 383: 210.
- Ross, R. J. e R. F. Pellerin (1994). "Nondestructive Testing for Assessing Wood Members in Structures-A review." *Forest Products Laboratory*.
- Sanabria, S. J., J. Neuenschwander, P. Niemz e U. Sennhauser (2010). "Structural health monitoring of glued laminated timber with a novel air-coupled ultrasound method." *WCTE 2010 - World Conference on Timber Engineering, Trentino, Italy*.
- Santos, P. (2012). "Análise de Elementos Colados Cruzados de Pinho Bravo." Departamento de Engenharia Civil. Coimbra. Universidade de Coimbra. Tese de Mestrado.

- Santos, R. (2017). “Utilização de modelos numéricos para predição de propriedades mecânicas de madeira lamelada colada.” Departamento de Engenharia Civil. Coimbra, Universidade de Coimbra. Tese de Mestrado
- Schickhofer, G. (1996). “Development of efficient glued laminated timber.” Proceedings of the 29th meeting, international council for research and innovation in building and construction, working commission W18 - timber structures. Bordeaux.
- Schmidt, M., P. Glos e G. Wegener (2010). “Gluing of European beech wood for load bearing timber structures.” *European Journal of Wood and Wood Products* 68(1): 43-57.
- Schmidt, M. e M. Knorz (2010). “Gluing of european beech (*fagus sylvatica* L.) and douglas fir (*Pseudotsuga menziessii* Mirb.) for load bearing timber structures.” WCTE 2010 - 11th World Conference on Timber Engineering. Riva del Garda, Trentino, Italy: 10.
- Segundinho, P. G. A., A. L. Zangiácomo, M. R. Carreira, A. A. Dias e F. A. R. Lahr (2013). “Avaliação de vigas de madeira laminada colada de cedrinho (*Erisma uncinatum* Warm.)” *Cerne* 19(3): 10.
- Serrano, E., P. J. Gustafsson e H. J. Larsen (2001). “Modeling of Finger-joint Failure in Glued-Laminated Timber Beams.” *Journal of Structural Engineering* 127(8): 914.
- Srpčič, J., M. Plos, T. Pazlar e G. Turk (2010). “Strength grading of Slovenian structural sawn timber.” COST Action E53 - The Future of Quality Control for Wood & Wood Products. Edinburgh: 8.
- Teles, R. F., C. H. S. D. Menezzi, M. R. Souza e F. Souza (2010). “Effect of nondestructive testing of laminations on the bending properties of glulam beams made from louro-vermelho (*Sextonia rubra*).” *Cerne* 16(1): 9.
- Trä, S. (2015). “www.svensktlimtra.se” Acedido a 06-05-2015.
- Tsoumis, G. (1991). “Science and technology of wood: structure, properties, utilization.” New York. V. N. Reinhold. 494p.
- Vick, C. B. (1995). “Coupling Agent Improves Durability of Prf Bonds to Cca-Treated Southern Pine.” *Forest Products Journal* 45(3): 78-84.
- Vries, P. (1998). “Strength grading of small-diameter Larch.” Report C4-98-02, Delft University of Technology.
- Vick, C. B. (1999). “Adhesive Bonding of Wood Materials - Chapter 9. Wood Handbook - Wood as an engineering material.” Madison, Forest Products Laboratory.
- Wang, X., R. J. Ross, J. A. Mattson, J. R. Erickson, J. W. Forsman, E. A. Geske e M. A. Wehr (2001). “Several nondestructive evaluation techniques for assessing stiffness and MOE of small-diameter logs.” Forest Products Laboratory.
- Wang, S.-Y., J. H. Chen, M. J. R. Tsai, C. J. Lin e T. H. Yang (2008). “Grading of softwood lumber using non-destructive techniques.” *Journal of Materials Processing Technology* 208: 10.

-
- Williamson, T. G. e B. Yeh (2007). “Standard Practice for the Derivation of Design Properties of Structural Glued Laminated Timber in the United States.” CIB-W18/40-12-4. Bled, Slovenia.
- Xavier, J. C., N. M. Garrido, M. Oliveira, J. L. Morais, P. P. Camanho e F. Pierron (2004). “A comparison between the Iosipescu and off-axis shear test methods for the characterization of *Pinus Pinaster Ait.*” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 35.
- Zhang, Y. H., J. Y. Gu, Y. W. Zheng, H. Y. Tan, M. W. Di e L. B. Zhu (2011). “Study on Bonding Properties of birch with API adhesive.” *Advances in Composites, Pts 1 and 2* 150-151: 551-555.

ANEXO A – Resultados dos ensaios de delaminação em elementos de Pinho bravo sem tratamento

Quadro A.1 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PRF-1

Elemento	Lamela	Teor de água (%)	Massa volúmica (kg/m ³)	Provete	Massa volúmica (kg/m ³)	2º Ciclo		3º Ciclo	
						total (%)	máxima (%)	total (%)	máxima (%)
MP_4 350 g/m ² 0,6 MPa CAT = 13 min	L1 – 114.1	13,5	574	D1	-	-	-	-	-
				D2	639	0,9	2,7	2,1	5,0
				D3	638	2,3	6,8	2,6	7,7
				D4	651	2,0	4,7	3,5	5,7
				D5	645	2,1	4,5	3,1	4,5
				D6	651	0,0	0,0	0,0	0,0
				D7	657	0,5	1,5	0,5	1,5
MP_5 450 g/m ² 0,6 MPa CAT = 5 min	L1 – 114.2	13,5	597	D1	-	-	-	-	
				D2	638	2,9	8,8	3,6	10,9
				D3	641	0,0	0,0	0,4	1,1
				D4	650	2,7	4,8	3,2	6,0
				D5	655	0,0	0,0	0,4	1,1
				D6	664	2,5	6,3	2,6	6,4
				D7	668	3,8	11,4	5,3	15,9
MP_19 350 g/m ² 0,8 MPa CAT = 13 min	L1 – 19.1	15,4	573	D1	635	0,6	1,9	1,1	3,4
				D2	637	2,6	7,8	2,6	7,8
				D3	642	1,5	4,4	1,6	4,7
				D4	642	0,5	1,4	0,6	1,7
				D5	636	0,0	0,0	0,0	0,0
				D6	632	0,0	0,0	0,0	0,0
				D7	633	0,4	1,2	0,5	1,5
MP_29 350 g/m ² 0,8 MPa CAT = 15 min	L1 – 135.2	14,4	581	D1	648	0,0	0,0	0,5	1,5
				D2	644	2,5	7,6	2,6	7,9
				D3	640	0,0	0,0	0,0	0,0
				D4	640	0,8	2,5	0,9	2,8
				D5	634	0,0	0,0	0,0	0,0
				D6	639	0,0	0,0	0,0	0,0
				D7	639	0,0	0,0	0,0	0,0
MP_30 350 g/m ² 0,8 MPa CAT = 5 min	L1 – 135.1	14,4	572	D1	645	0,4	1,3	0,9	1,6
				D2	648	0,6	1,7	1,3	2,7
				D3	643	1,6	3,2	1,7	3,2
				D4	645	1,5	4,4	1,7	5,0
				D5	644	0,5	1,5	1,1	1,7
				D6	656	3,5	9,0	3,5	9,0
				D7	651	1,7	5,0	1,9	5,8

Quadro A.2 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PRF-1 (continuação)

Elemento	Lamela	Teor de água (%)	Massa volúmica (kg/m ³)	Provete	Massa volúmica (kg/m ³)	2º Ciclo		3º Ciclo	
						total (%)	máxima (%)	total (%)	máxima (%)
MP_20 450 g/m ² 0,8 MPa CAT = 4 min	L1 – 112.1	13,5	582	D1	627	0,0	0,0	1,7	5,1
				D2	622	1,0	2,9	1,9	2,9
				D3	627	4,0	12,1	4,6	13,8
				D4	638	0,7	2,1	0,7	2,1
				D5	637	1,5	4,5	3,0	8,9
				D6	635	2,2	4,9	2,6	5,1
				D7	629	1,0	1,9	1,1	1,9

Quadro A.3 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PRF-2

Elemento	Lamela	Teor de água (%)	Massa volúmica (kg/m ³)	Provete	Massa volúmica (kg/m ³)	2º Ciclo		3º Ciclo	
						total (%)	máxima (%)	total (%)	máxima (%)
MP_09 350 g/m ² 0,6 MPa CAT = 14 min	L1 - 18.1	14,0	623	D1	665	2,5	3,8	3,5	5,3
				D2	662	1,1	1,7	1,5	2,8
				D3	672	2,0	3,3	2,8	4,6
				D4	659	0,4	1,2	0,4	1,3
				D5	656	0,0	0,0	0,0	0,0
				D6	658	0,0	0,0	0,4	1,1
				D7	662	1,3	2,9	1,3	2,9
MP_43 350 g/m ² 0,6 MPa CAT = 10 min	L1 - 82.1	14,0	511	D1	637	1,5	4,5	1,8	5,3
				D2	651	0,7	2,2	1,2	2,4
				D3	635	0,0	0,0	0,0	0,0
				D4	627	0,0	0,0	0,0	0,0
				D5	624	0,0	0,0	0,0	0,0
				D6	626	0,0	0,0	0,0	0,0
				D7	630	0,9	2,8	0,9	2,8
MP_10 450 g/m ² 0,6 MPa CAT = 5,5 min	L1 - 18.2	14,0	611	D1	662	-	-	-	-
				D2	665	0,8	1,2	2,1	5,2
				D3	661	2,3	5,2	2,2	5,1
				D4	656	2,4	3,8	2,9	5,3
				D5	650	0,0	0,0	0,0	0,0
				D6	642	2,5	3,8	4,0	6,2
				D7	645	0,8	1,3	1,2	2,4

Quadro A.4 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PRF-2 (continuação)

Elemento	Lamela	Teor de água (%)	Massa volúmica (kg/m ³)	Provete	Massa volúmica (kg/m ³)	2º Ciclo		3º Ciclo	
						total (%)	máxima (%)	total (%)	máxima (%)
MP_17 350 g/m ² 0,8 MPa CAT = 10 min	L1 - 14.2 L2 - 62.2 L3 - 83.2 L4 - 132.1	13,9 13,9 12,8 13,6	609 663 632 675	D1	650	-	-	-	-
				D2	647	1,1	3,3	1,8	3,7
				D3	642	1,5	2,8	1,8	2,8
				D4	659	2,3	3,8	3,3	5,3
				D5	676	1,0	1,5	1,0	1,6
				D6	641	0,0	0,0	0,7	2,1
				D7	635	0,0	0,0	0,8	1,4
MP_18 450 g/m ² 0,8 MPa CAT = 5 min	L1 - 14.1 L2 - 62.1 L3 - 83.1 L4 - 132.2	13,9 13,9 12,8 13,6	592 642 616 724	D1	656	2,9	5,3	3,3	6,2
				D2	651	4,9	6,4	5,6	6,7
				D3	651	2,8	5,9	5,6	7,3
				D4	653	3,9	8,3	7,0	10,5
				D5	642	2,8	5,3	2,9	5,6
				D6	638	1,3	3,8	1,3	3,9
				D7	627	0,9	2,8	1,0	3,0

Quadro A.5 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PRF-3

Elemento	Lamela	Teor de água (%)	Massa volúmica (kg/m ³)	Provete	Massa volúmica (kg/m ³)	2º Ciclo		3º Ciclo	
						total (%)	máxima (%)	total (%)	máxima (%)
MP_07 350 g/m ² 0,6 MPa CAT = 14 min	L1 - 78.1 L2 - 46.1 L3 - 40.1 L4 - 7.1	13,8 13,9 14,2 13,5	534 686 638 717	D1	632	-	-	-	-
				D2	640	2,4	4,5	3,7	6,4
				D3	650	2,1	6,4	2,8	8,3
				D4	653	2,2	4,7	2,3	4,8
				D5	663	1,2	3,5	3,3	5,0
				D6	647	1,2	3,5	1,7	3,5
				D7	642	4,2	5,8	5,9	10,3
MP_08 450 g/m ² 0,6 MPa CAT = 5 min	L1 - 78.2 L2 - 46.2 L3 - 40.2 L4 - 7.2	13,8 13,9 14,2 13,5	535 668 702 723	D1	670	-	-	-	-
				D2	673	0,0	0,0	1,5	4,5
				D3	665	1,0	2,9	1,0	2,9
				D4	650	0,5	1,6	1,1	1,7
				D5	652	0,4	1,1	0,4	1,2
				D6	667	1,8	5,4	1,8	5,4
				D7	644	0,0	0,0	0,4	1,1

Quadro A.6 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PRF-3 (continuação)

Elemento	Lamela	Teor de água (%)	Massa volúmica (kg/m ³)	Provete	Massa volúmica (kg/m ³)	2º Ciclo		3º Ciclo	
						total (%)	máxima (%)	total (%)	máxima (%)
MP_25 350 g/m ² 0,8 MPa	L1 - 49.1 L2 - 111.2 L3 - 11.1 L4 - 58.2	13,7 13,5 13,2 13,6	596 659 645 696	D1	681	4,2	9,6	4,2	9,7
				D2	675	1,6	2,1	1,8	2,4
				D3	673	1,6	3,5	1,6	3,5
				D4	666	2,4	7,3	3,0	9,0
				D5	637	0,6	1,9	1,4	4,1
				D6	625	1,7	3,2	2,1	3,8
				D7	624	1,7	3,1	2,2	3,4
MP_26 450 g/m ² 0,8 MPa	L1 - 49.2 L2 - 111.1 L3 - 11.2 L4 - 58.1	13,7 13,5 13,2 13,6	573 665 628 730	D1	650	0,4	1,3	0,5	1,4
				D2	649	0,0	0,0	0,0	0,0
				D3	641	0,0	0,0	0,4	1,2
				D4	640	0,0	0,0	0,0	0,0
				D5	647	0,4	1,3	0,5	1,6
				D6	656	0,6	1,9	0,6	1,9
				D7	653	2,4	3,9	2,4	3,9
MP_44 450 g/m ² 0,8 MPa	L1 - 82.2 L2 - 97.1 L3 - 102.2 L4 - 54.2	14,0 13,7 13,2 15,0	509 628 612 777	D1	634	0,0	0,0	0,0	0,0
				D2	635	0,0	0,0	0,0	0,0
				D3	632	0,0	0,0	0,0	0,0
				D4	634	0,0	0,0	0,0	0,0
				D5	632	0,5	1,4	0,8	1,4
				D6	653	0,0	0,0	0,0	0,0
				D7	654	2,3	7,0	3,2	9,7

Quadro A.7 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo MUF-1

Elemento	Lamela	Teor de água (%)	Massa volúmica (kg/m ³)	Provete	Massa volúmica (kg/m ³)	2º Ciclo		3º Ciclo	
						total (%)	máxima (%)	total (%)	máxima (%)
MP_23 400 g/m ² 0,6 MPa CAT = 11 min	L1 - 24.1 L2 - 122.1 L3 - 22.1 L4 - 52.1	13,2 13,9 13,8 14,2	623 644 654 699	D1	666	0,0	0,0	0,0	0,0
				D2	656	1,4	4,3	1,5	4,5
				D3	677	1,6	4,9	2,0	6,1
				D4	661	2,9	7,1	3,6	9,1
				D5	654	0,6	1,8	1,0	2,9
				D6	668	1,4	2,7	1,4	2,7
				D7	647	2,2	5,4	2,3	5,5
MP_39 400 g/m ² 0,6 MPa CAT = 19 min	L1 - 121.1 L2 - 41.1 L3 - 108.1 L4 - 13.2	12,9 13,8 12,5 14,3	544 664 605 743	D1	639,6	0,0	0,0	0,4	1,2
				D2	654,0	0,7	2,0	0,7	2,0
				D3	647,4	0,6	1,7	0,6	1,8
				D4	645,7	0,0	0,0	0,0	0,0
				D5	674,1	0,0	0,0	0,0	0,0
				D6	654,3	0,0	0,0	0,0	0,0
				D7	631,3	0,0	0,0	0,0	0,0
MP_40 400 g/m ² 0,6 MPa CAT = 10 min	L1 - 121.2 L2 - 41.2 L3 - 108.2 L4 - 13.1	12,9 13,8 12,5 14,3	543 666 581 767	D1	670,5	3,3	9,9	3,5	10,5
				D2	654,1	0,0	0,0	0,0	0,0
				D3	671,6	0,0	0,0	0,0	0,0
				D4	645,7	1,4	2,6	2,3	3,8
				D5	651,4	1,1	3,3	1,2	3,6
				D6	630,3	0,4	1,2	0,4	1,2
				D7	633,0	0,0	0,0	0,0	0,0
MP_24 500 g/m ² 0,6 MPa CAT = 5 min	L1 - 22.2 L2 - 24.2 L3 - 122.2 L4 - 52.2	13,8 13,2 13,9 14,2	600 640 620 734	D1	658	3,3	5,3	3,8	5,4
				D2	670	1,4	4,1	1,5	4,4
				D3	656	2,4	5,2	2,4	5,4
				D4	659	3,4	10,1	2,7	8,2
				D5	651	2,6	3,0	2,9	3,4
				D6	641	4,5	6,0	5,4	7,3
				D7	630	0,7	2,1	1,8	4,1
MP_27 400 g/m ² 0,8 MPa CAT = 15 min	L1 - 85.2 L2 - 107.2 L3 - 127.2 L4 - 8.1	14,4 13,6 13,7 13,2	588 611 606 796	D1	666	7,3	15,5	9,1	21,5
				D2	704	5,6	14,3	5,7	14,4
				D3	661	0,0	0,0	0,0	0,0
				D4	653	1,7	5,0	1,6	4,8
				D5	639	0,0	0,0	0,0	0,0
				D6	635	0,6	1,8	0,6	1,8
				D7	634	3,7	9,6	4,2	10,7

Quadro A.8 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo MUF-1 (continuação)

Elemento	Lamela	Teor de água (%)	Massa volúmica (kg/m ³)	Provete	Massa volúmica (kg/m ³)	2º Ciclo		3º Ciclo	
						total (%)	máxima (%)	total (%)	máxima (%)
MP_28 500 g/m ² 0,8 MPa CAT = 5 min	L1 - 127.1 L2 - 85.1 L3 - 107.1 L4 - 8.2	13,7 14,4 13,6 13,2	596 651 617 710	D1	641,4	0,0	0,0	0,0	0,0
				D2	633,3	5,5	14,7	5,5	14,8
				D3	644,3	1,4	4,1	2,2	6,6
				D4	627,6	1,2	2,5	1,3	2,6
				D5	647,8	3,7	9,9	4,3	11,8
				D6	663,6	3,8	6,2	4,1	7,2
				D7	682,1	2,3	6,8	3,0	7,4
MP_41 400 g/m ² 0,6 MPa 100/35 CAT = 10 min	L1 - 117.2 L2 - 12.1 L3 - 125.2 L4 - 88.1	13,8 13,5 13,7 13,0	582 639 620 728	D1	645,0	0,0	0,0	0,0	0,0
				D2	643,9	1,6	4,9	1,7	5,0
				D3	678,8	1,0	2,9	1,5	4,4
				D4	648,6	1,7	3,5	1,7	3,5
				D5	644,8	0,4	1,2	0,5	1,5
				D6	642,3	0,8	2,5	0,8	2,5
				D7	648,6	7,8	18,1	8,8	19,9
MP_92 400 g/m ² 0,6 MPa 100/35 CAT = 5 min	L1 - 311.1 L2 - 297.2 L3 - 311.2 L4 - 297.1	14,3 15,1 14,3 15,1	621 703 635 716	D1	673,4	2,3	3,5	2,5	3,8
				D2	674,1	6,0	11,0	7,0	14,3
				D3	674,3	3,1	4,7	3,6	6,3
				D4	674,2	0,5	1,6	1,0	2,9
				D5	669,9	2,7	8,2	2,8	8,3
				D6	670,3	4,6	9,5	5,4	12,0
				D7	669,1	1,0	3,1	2,2	6,7

Quadro A.9 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo MUF-2

Elemento	Lamela	Teor de água (%)	Massa volúmica (kg/m ³)	Provete	Massa volúmica (kg/m ³)	2º Ciclo		3º Ciclo	
						total (%)	máxima (%)	total (%)	máxima (%)
MP_60 350 g/m ² 0,6 MPa CAT = 13 min	L1 - 77.2 L2 - 118.1 L3 - 134.1 L4 - 48.1	14,7 14,5 14,1 14,2	574 598 588 798	D1	629,1	0,4	1,2	0,5	1,6
				D2	635,5	0,0	0,0	0,0	0,0
				D3	638,7	0,0	0,0	0,4	1,2
				D4	650,1	4,0	6,3	4,1	6,4
				D5	636,5	1,1	3,2	1,0	3,1
				D6	632,7	0,7	2,0	2,6	5,0
				D7	629,9	0,0	0,0	0,0	0,0
MP_61 450 g/m ² 0,6 MPa CAT = 7 min	L1 - 77.1 L2 - 118.2 L3 - 134.2 L4 - 48.2	14,7 14,5 14,1 14,2	565 632 584 775	D1	638,5	0,4	1,3	2,6	4,7
				D2	649,8	0,4	1,3	0,8	1,3
				D3	640,5	0,0	0,0	0,0	0,0
				D4	646,4	0,0	0,0	0,0	0,0
				D5	647,3	0,0	0,0	0,0	0,0
				D6	635,2	0,7	2,1	0,7	2,2
				D7	635,1	0,9	2,8	0,9	2,8
MP_94 450 g/m ² 0,6 MPa CAT = 5 min	L1 - 220.1 L2 - 273.2 L3 - 220.2 L4 - 273.1	14,5 14,6 14,5 14,6	580 716 603 723	D1	670,0	1,8	5,5	1,9	5,8
				D2	671,1	3,6	6,0	4,7	7,2
				D3	664,8	1,5	3,0	1,5	3,1
				D4	679,0	4,3	8,1	4,4	8,4
				D5	658,5	1,1	1,7	1,2	1,8
				D6	691,6	2,2	5,1	3,5	8,0
				D7	652,3	1,3	2,6	1,5	2,9
MP_64 350 g/m ² 0,8 MPa CAT = 12 min	L1 - 214.1 L2 - 191.1 L3 - 193.1 L4 - 211.1	14,4 15,4 15,6 16,1	520 683 617 752	D1	645,6	2,2	5,0	2,3	5,2
				D2	641,6	1,4	2,8	1,7	3,2
				D3	645,2	0,9	2,6	1,3	3,9
				D4	648,7	0,0	0,0	0,6	1,8
				D5	651,0	3,4	5,2	4,3	7,6
				D6	647,4	0,9	1,5	1,3	1,6
				D7	651,7	1,2	3,5	1,5	3,4
MP_65 450 g/m ² 0,8 MPa CAT = 7 min	L1 - 214.2 L2 - 191.2 L3 - 193.2 L4 - 211.2	14,4 15,4 15,6 16,1	533 677 616 716	D1	631,9	1,1	3,4	1,3	4,0
				D2	643,2	1,3	4,0	2,3	7,0
				D3	643,5	0,0	0,0	0,0	0,0
				D4	636,9	0,0	0,0	0,0	0,0
				D5	646,7	1,0	3,1	1,6	4,8
				D6	630,6	0,0	0,0	0,0	0,0
				D7	645,4	1,1	3,4	1,2	3,6

Quadro A.10 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo EPI-1

Elemento	Lamela	Teor de água (%)	Massa volúmica (kg/m ³)	Provete	Massa volúmica (kg/m ³)	2º Ciclo		3º Ciclo	
						total (%)	máxima (%)	total (%)	máxima (%)
MP_11 250 g/m ² 0,6 MPa CAT = 5 min	L1 - 72.1 L2 - 64.2 L3 - 16.1 L4 - 6.1	13,2 14,0 14,3 13,6	588 692 601 691	D1	638	25,6	59,1	28,2	65,0
				D2	644	17,4	32,4	20,3	36,0
				D3	664	21,2	38,1	24,6	41,6
				D4	642	11,5	22,0	14,3	29,7
				D5	646	10,6	18,5	14,5	26,8
				D6	649	24,8	37,6	26,8	42,7
				D7	661	13,7	15,1	14,7	16,7
MP_12 350 g/m ² 0,6 MPa CAT = 5 min	L1 - 72.2 L2 - 64.1 L3 - 16.2 L4 - 6.2	13,2 14,0 14,3 13,6	592 640 632 716	D1	662	16,7	29,4	18,0	30,3
				D2	656	14,9	22,5	18,3	28,0
				D3	654	10,5	19,7	11,3	19,8
				D4	649	6,5	15,3	7,9	15,8
				D5	655	10,6	19,5	11,3	20,1
				D6	647	15,1	19,1	15,4	19,4
				D7	646	18,0	41,3	18,7	41,6
MP_21 250 g/m ² 0,8 MPa CAT = 5 min	L1 - 23.2 L2 - 37.1 L3 - 23.1 L4 - 47.1	13,5 14,0 13,5 13,6	580 704 566 735	D1	644	30,6	36,1	32,1	39,1
				D2	637	13,2	33,5	14,7	37,9
				D3	646	9,1	13,8	9,6	13,8
				D4	639	11,0	13,6	13,2	15,4
				D5	643	14,3	16,1	17,4	17,8
				D6	655	8,8	12,9	11,0	16,3
				D7	648	5,5	10,9	6,3	11,5
MP_22 350 g/m ² 0,8 MPa CAT = 5 min	L1 - 126.1 L2 - 37.2 L3 - 126.2 L4 - 47.2	13,7 14,0 13,7 13,6	557 698 589 727	D1	678	12,1	16,9	15,6	26,0
				D2	635	14,5	21,4	15,3	22,3
				D3	638	8,3	15,3	10,2	17,4
				D4	654	12,7	27,4	14,1	28,1
				D5	674	10,1	19,0	11,5	20,2
				D6	637	14,4	18,0	16,8	22,7
				D7	643	13,8	29,2	15,1	29,4

Quadro A.11 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo EPI-2

Elemento	Lamela	Teor de água (%)	Massa volúmica (kg/m ³)	Provete	Massa volúmica (kg/m ³)	2º Ciclo		3º Ciclo	
						total (%)	máxima (%)	total (%)	máxima (%)
MP_58 300 g/m ² 0,6 MPa CAT = 12 min	L1 - 123.1	13,4	589	D1	631	6,8	10,4	9,0	15,4
				D2	634	5,0	13,7	7,6	17,6
				D3	636	10,8	20,9	12,8	22,3
				D4	649	9,9	21,3	11,4	22,8
				D5	660	10,4	20,5	12,9	23,7
				D6	643	5,7	9,1	9,5	16,6
				D7	658	5,7	11,1	6,0	11,2
MP_59 350 g/m ² 0,6 MPa CAT = 5 min	L1 - 123.2	13,4	574	D1	637	8,5	17,0	11,6	18,1
				D2	634	4,9	11,1	5,4	10,8
				D3	646	10,7	18,4	11,3	20,2
				D4	672	17,8	25,0	20,0	28,0
				D5	644	4,8	11,9	8,6	17,1
				D6	637	5,5	9,7	8,2	13,7
				D7	636	10,3	26,7	14,0	30,7
MP_62 300 g/m ² 0,8 MPa CAT = 11 min	L1 - 89.2	13,9	553	D1	629	0,0	0,0	0,0	0,0
				D2	633	2,5	4,7	2,7	4,9
				D3	628	0,0	0,0	0,0	0,0
				D4	636	0,8	2,3	0,9	2,6
				D5	641	0,8	2,4	0,9	2,6
				D6	639	0,8	2,4	0,7	2,2
				D7	637	0,0	0,0	0,0	0,0
MP_63 350 g/m ² 0,8 MPa CAT = 5 min	L1 - 89.1	13,9	582	D1	643	1,7	5,1	1,8	5,3
				D2	632	2,9	5,0	2,5	3,8
				D3	624	9,3	26,4	10,9	29,8
				D4	629	1,4	4,3	1,6	4,7
				D5	633	4,3	8,6	7,1	11,9
				D6	650	1,5	2,8	3,1	4,3
				D7	630	1,9	5,6	1,9	5,8

Quadro A.12 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PUR-1

Elemento	Lamela	Teor de água (%)	Massa volúmica (kg/m ³)	Provete	Massa volúmica (kg/m ³)	2º Ciclo		3º Ciclo	
						total (%)	máxima (%)	total (%)	máxima (%)
MP_02 160 g/m ² 0,6 MPa CAT = 14 min	L1 - 68.1	14,1	523	D1	658	-	-	-	-
				D2	659	29,1	46,7	32,7	49,4
				D3	659	21,9	27,1	30,3	37,9
				D4	663	26,5	46,3	30,9	53,6
				D5	679	23,6	31,5	27,1	34,9
				D6	660	30,0	43,3	32,5	45,6
				D7	676	-	-	-	-
MP_03 180 g/m ² 0,6 MPa CAT = 5 min	L1 - 68.2	14,1	525	D1	650	-	-	-	-
				D2	655	19,9	43,9	27,6	51,1
				D3	662	23,8	41,2	27,8	47,7
				D4	668	29,6	65,3	33,9	70,1
				D5	653	34,0	40,1	38,1	41,7
				D6	662	41,5	47,2	46,2	53,9
				D7	653	-	-	-	-
MP_15 160 g/m ² 0,8 MPa CAT = 14 min	L1 - 73.1	13,7	595	D1	636	3,4	10,1	3,3	8,6
				D2	618	0,0	0,0	0,0	0,0
				D3	631	2,0	6,0	2,1	6,2
				D4	655	0,0	0,0	1,2	3,7
				D5	636	0,4	1,3	1,2	2,2
				D6	645	2,4	4,8	2,6	4,9
				D7	636	4,5	6,1	4,9	6,7
MP_42 160 g/m ² 0,8 MPa CAT = 5 min	L1 - 117.1	13,8	601	D1	652	17,2	51,5	18,2	54,5
				D2	650	19,2	52,9	21,3	55,7
				D3	649	21,0	50,3	24,4	54,0
				D4	638	20,0	47,6	24,1	55,0
				D5	635	20,7	41,6	23,2	45,0
				D6	642	9,8	17,2	13,9	24,3
				D7	645	20,0	31,9	21,1	32,4
MP_16 180 g/m ² 0,8 MPa CAT = 5 min	L1 - 3.2	13,4	573	D1	622	29,0	51,4	31,8	53,5
				D2	632	22,9	43,8	26,2	50,2
				D3	658	20,3	50,1	20,9	50,2
				D4	630	19,1	43,7	21,8	47,3
				D5	641	13,8	34,0	15,7	38,9
				D6	631	14,7	41,1	15,9	43,4
				D7	626	11,0	30,1	12,6	33,6

Quadro A.13 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PUR-1+PR

Elemento	Lamela	Teor de água (%)	Massa volúmica (kg/m ³)	Provete	Massa volúmica (kg/m ³)	2º Ciclo		3º Ciclo	
						total (%)	máxima (%)	total (%)	máxima (%)
MP_47 160 g/m ² 0,6 MPa CAT = 16 min	L1 - 96.1	13,3	595	D1	643	1,0	3,0	1,7	5,1
				D2	656	2,0	6,0	3,4	10,1
	L2 - 101.1	14,1	666	D3	647	1,8	4,1	2,0	4,3
				D4	657	4,2	12,6	8,3	19,9
	L3 - 10.1	13,9	631	D5	656	3,9	11,6	4,3	13,0
				D6	660	0,5	1,4	0,9	1,4
	L4 - 9.2	14,6	699	D7	654	1,3	3,8	3,6	5,9
MP_54 160 g/m ² 0,6 MPa CAT = 16 min	L1 - 75.2	14,1	536	D1	647	2,5	7,5	3,0	7,7
				D2	650	0,0	0,0	0,0	0,0
	L2 - 45.1	14,0	701	D3	652	0,0	0,0	0,0	0,0
				D4	676	3,0	6,1	4,7	7,7
	L3 - 106.1	14,3	649	D5	654	0,0	0,0	0,0	0,0
				D6	657	1,0	1,6	1,8	2,1
	L4 - 131.1	12,4	710	D7	658	1,1	3,4	1,2	3,6
MP_48 180 g/m ² 0,6 MPa CAT = 7 min	L1 - 104.2	13,5	601	D1	635	2,7	8,1	3,3	9,8
				D2	636	1,2	3,7	1,2	3,7
	L2 - 9.1	14,6	651	D3	632	1,7	4,0	2,5	5,1
				D4	640	1,9	5,8	2,1	6,3
	L3 - 10.2	13,9	632	D5	639	1,3	4,0	2,2	6,5
				D6	659	2,6	7,7	2,9	7,6
	L4 - 101.2	14,1	673	D7	643	17,4	45,7	19,2	48,6
MP_55 180 g/m ² 0,6 MPa CAT = 9 min	L1 - 75.1	14,1	549	D1	636	1,3	2,5	1,9	3,9
				D2	644	2,1	5,0	2,6	5,2
	L2 - 45.2	14,0	675	D3	643	0,6	1,7	1,0	1,7
				D4	657	0,0	0,0	0,0	0,0
	L3 - 106.2	14,3	652	D5	647	0,5	1,4	1,0	3,1
				D6	669	0,6	1,8	1,5	2,4
	L4 - 131.2	12,4	709	D7	653	0,0	0,0	0,0	0,0
MP_49 160 g/m ² 0,8 MPa CAT = 16 min	L1 - 130.1	13,7	560	D1	633	0,0	0,0	0,0	0,0
				D2	636	0,9	2,8	1,5	4,6
	L2 - 30.1	15,4	647	D3	638	3,9	11,7	4,1	12,2
				D4	631	0,0	0,0	0,9	1,6
	L3 - 21.1	14,3	602	D5	640	0,0	0,0	0,0	0,0
				D6	652	0,0	0,0	0,0	0,0
	L4 - 44.1	14,9	727	D7	645	3,1	8,2	3,3	8,5

Quadro A.14 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PUR-1+PR (continuação)

Elemento	Lamela	Teor de água (%)	Massa volúmica (kg/m ³)	Provete	Massa volúmica (kg/m ³)	2º Ciclo		3º Ciclo	
						total (%)	máxima (%)	total (%)	máxima (%)
MP_56 160 g/m ² 0,8 MPa CAT = 16 min	L1 - 113.1	13,3	590	D1	639	1,4	2,8	2,7	6,7
				D2	659	0,0	0,0	0,9	2,7
				D3	636	0,4	1,2	1,3	1,9
				D4	639	0,4	1,2	0,5	1,4
				D5	647	0,7	2,2	1,2	3,7
				D6	671	0,9	2,6	0,9	2,7
				D7	637	0,0	0,0	0,0	0,0
MP_50 180 g/m ² 0,8 MPa CAT = 7 min	L1 - 130.2	13,7	548	D1	636	0,0	0,0	0,4	1,2
				D2	640	0,0	0,0	0,0	0,0
				D3	640	0,0	0,0	1,5	4,4
				D4	645	0,0	0,0	0,0	0,0
				D5	640	0,0	0,0	0,0	0,0
				D6	639	0,4	1,2	1,0	2,9
				D7	637	0,0	0,0	0,0	0,0
MP_57 180 g/m ² 0,8 MPa CAT = 9 min	L1 - 113.2	13,3	603	D1	654	1,6	4,8	2,2	6,6
				D2	640	0,0	0,0	0,4	1,3
				D3	648	0,0	0,0	0,0	0,0
				D4	639	0,0	0,0	0,0	0,0
				D5	660	0,0	0,0	0,0	0,0
				D6	639	0,0	0,0	0,0	0,0
				D7	642	0,0	0,0	0,0	0,0
MP_97 180 g/m ² 0,8 MPa + PR (25h) CAT = 5 min	L1 - 247.1	16,2	586	D1	626	0,0	0,0	0,5	1,6
	L2 - 197.2	16,9	629	D2	632	0,0	0,0	0,5	1,5
	L3 - 268.1	16,3	604	D3	642	0,0	0,0	0,0	0,0
	L4 - 227.1	16,7	710	D4	626	2,0	4,5	2,3	5,2
MP_98 180 g/m ² 0,8 MPa + PR (7 dias) CAT = 5 min	L1 - 218.2	17,7	547	D1	627	18,0	34,7	19,2	35,4
	L2 - 210.1	18,1	689	D2	632	0,0	0,0	0,4	1,3
	L3 - 268.2	16,3	604	D3	632	0,0	0,0	0,0	0,0
	L4 - 227.3	16,7	698	D4	633	6,0	12,1	7,1	12,7
MP_99 180 g/m ² 0,8 MPa + PR (14 dias) CAT = 5 min	L1 - 247.2	16,2	585	D1	621	1,6	4,8	2,9	7,4
	L2 - 197.1	16,9	616	D2	618	0,5	1,4	0,5	1,6
	L3 - 247.3	16,2	601	D3	622	0,0	0,0	0,0	0,0
	L4 - 227.2	16,7	705	D4	625	0,8	2,3	0,9	2,7

Quadro A.15 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com colas do tipo PUR-2, PUR-2+PR

Elemento	Lamela	Teor de água (%)	Massa volúmica (kg/m ³)	Provete	Massa volúmica (kg/m ³)	2º Ciclo		3º Ciclo	
						total (%)	máxima (%)	total (%)	máxima (%)
MP_100 180 g/m ² 0,8 MPa CAT = 5 min	L1 - 178.1	15,4	529	D1	623	41,5	56,1	46,3	62,6
				D2	595	46,8	65,6	50,5	71,5
				D3	625	23,4	30,6	26,2	35,6
				D4	590	41,9	63,0	49,2	67,5
				D5	590	37,2	47,2	41,3	51,7
				D6	595	36,6	51,3	40,8	59,5
				D7	599	39,2	62,3	43,1	68,5
MP_101 180 g/m ² 0,8 MPa + PR CAT = 5 min	L1 - 178.2	15,4	513	D1	595	16,8	42,4	18,1	44,3
				D2	598	6,4	11,5	9,1	16,5
				D3	595	13,7	20,3	15,0	22,2
				D4	591	8,4	17,1	9,5	17,6
				D5	586	4,4	11,7	6,7	18,5
				D6	589	5,1	12,0	6,6	13,0
				D7	592	8,6	18,6	11,2	20,9

Quadro A.16 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com colas do tipo PUR-3 e PUR-3+PR

Elemento	Lamela	Teor de água (%)	Massa volúmica (kg/m ³)	Provete	Massa volúmica (kg/m ³)	2º Ciclo		3º Ciclo	
						total (%)	máxima (%)	total (%)	máxima (%)
MP_95 180 g/m ² 0,8 MPa CAT = 5 min	L1 - 154.1	16,2	512	D1	608	16,4	24,2	18,5	26,5
				D2	667	18,6	31,8	18,7	26,1
				D3	598	18,2	22,2	20,1	26,9
				D4	595	19,6	30,4	21,6	32,1
				D5	596	3,6	5,0	4,8	6,7
				D6	588	4,5	10,8	9,4	14,0
				D7	586	14,0	19,1	18,5	24,0
MP_96 180 g/m ² 0,8 MPa + PR CAT = 5 min	L1 - 159.1	17,7	553	D1	647	2,1	6,3	2,7	8,0
				D2	644	0,5	1,5	1,5	3,2
				D3	652	1,0	1,9	1,7	3,1
				D4	643	1,5	4,6	2,9	8,7
				D5	650	3,8	8,5	4,5	10,0
				D6	649	1,9	3,0	3,8	7,0
				D7	634	0,0	0,0	0,6	1,7

ANEXO B – Resultados dos ensaios de delaminação em elementos de Pinho bravo com tratamento preservador

Quadro B.1 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PRF-1

Elemento	Lamela	Teor de água (%)	Massa volúmica (kg/m ³)	Provete	Massa volúmica (kg/m ³)	2º Ciclo		3º Ciclo	
						total (%)	máxima (%)	total (%)	máxima (%)
TMP_7 350 g/m ² 0,8 MPa CAT = 31 min	L1 – 93.1 L2 – 44.1 L3 – 70.2 L4 – 104.2	14,1 13,9 14,4 13,5	614 669 655 721	D1	683	1,9	4,4	2,3	4,3
				D2	690	1,7	2,9	2,1	3,9
				D3	685	1,5	4,5	1,7	5,0
				D4	681	0,8	2,5	1,2	3,7
				D5	666	2,3	3,1	3,9	6,3
				D6	658	2,3	4,1	2,9	4,3
				D7	650	2,7	4,1	3,5	4,2
TMP_8 350 g/m ² 0,8 Mpa CAT = 24 min	L1 – 93.2 L2 – 70.1 L3 – 44.2 L4 – 104.1	14,1 14,4 13,9 13,5	614 647 637 756	D1	674	12,7	22,2	17,0	31,1
				D2	668	9,4	16,1	10,3	16,7
				D3	669	11,5	16,1	12,2	18,0
				D4	676	1,4	2,7	3,6	5,7
				D5	680	5,0	8,0	5,7	9,3
				D6	673	1,5	3,2	1,8	3,6
				D7	669	0,6	1,9	0,7	2,0
TMP_9 350 g/m ² 0,8 MPa CAT = 16 min	L1 – 06.2 L2 – 76.1 L3 – 33.1 L4 – 42.1	13,7 14,1 14,0 14,3	570 674 652 710	D1	655	12,7	32,3	13,4	35,5
				D2	654	3,4	7,5	4,6	9,8
				D3	650	11,0	14,8	12,1	16,6
				D4	648	8,1	16,9	9,4	18,4
				D5	658	6,7	15,2	7,6	16,5
				D6	652	4,2	8,7	5,0	7,6
				D7	652	5,3	6,9	5,8	7,1
TMP_10 350 g/m ² 0,8 MPa CAT = 10 min	L1 – 06.1 L2 – 76.2 L3 – 33.2 L4 – 42.2	13,7 14,1 14,0 14,3	589 682 625 709	D1	656	2,2	5,3	3,0	7,6
				D2	666	7,6	11,7	8,4	12,1
				D3	658	4,3	7,1	6,7	10,9
				D4	656	4,4	6,9	6,6	12,3
				D5	679	5,8	8,3	9,0	12,6
				D6	653	6,3	9,4	11,9	18,8
				D7	656	3,5	7,4	4,5	10,5
TMP_15 350 g/m ² 0,8 MPa CAT = 12 min	L1 – 112.1 L2 – 28.1 L3 – 43.1 L4 – 88.2	14,6 14,6 14,5 15,8	573 683 638 759	D1	667	1,1	1,5	1,6	1,8
				D2	665	4,6	8,8	4,6	9,7
				D3	663	0,0	0,0	0,0	0,0
				D4	664	0,0	0,0	0,0	0,0
				D5	667	2,5	1,8	2,9	4,7
				D6	671	0,4	0,0	0,4	1,2
				D7	661	0,8	1,4	1,8	2,4

Quadro B.2 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PRF-1 (continuação)

Elemento	Lamela	Teor de água (%)	Massa volúmica (kg/m ³)	Provete	Massa volúmica (kg/m ³)	2º Ciclo		3º Ciclo	
						total (%)	máxima (%)	total (%)	máxima (%)
TMP_16 350 g/m ² 0,8 MPa CAT = 5 min	L1 – 112.2	14,6	604	D1	665	2,7	4,7	3,3	5,5
				D2	660	1,3	1,4	2,4	3,8
				D3	664	6,0	2,8	7,5	12,4
				D4	660	1,9	2,6	1,9	3,0
				D5	652	2,2	0,0	4,0	3,6
				D6	656	0,0	0,0	0,4	0,0
				D7	658	0,0	0,0	0,4	0,0
TMP_17 350 g/m ² 0,8 Mpa CAT = 12 min	L1 – 20.1	14,6	614	D1	652	2,3	4,9	3,7	6,9
				D2	685	1,0	3,2	1,7	3,1
				D3	658	1,0	1,9	1,2	3,1
				D4	664	2,2	2,8	2,3	5,3
				D5	651	0,0	0,0	0,4	0,0
				D6	682	0,6	0,0	1,2	1,9
				D7	674	1,4	3,9	1,5	4,2
TMP_18 350 g/m ² 0,8 MPa CAT = 5 min	L1 – 20.2	14,6	607	D1	658	0,0	0,0	0,4	0,0
				D2	679	0,0	0,0	0,4	0,0
				D3	672	0,0	0,0	0,0	0,0
				D4	663	0,0	0,0	0,0	0,0
				D5	715	0,7	0,0	0,7	2,2
				D6	665	1,1	1,8	1,1	3,3
				D7	664	0,0	0,0	0,4	0,0

Quadro B.3 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PRF-2

Elemento	Lamela	Teor de água (%)	Massa volúmica (kg/m ³)	Provete	Massa volúmica (kg/m ³)	2º Ciclo		3º Ciclo	
						total (%)	máxima (%)	total (%)	máxima (%)
TMP_13 350 g/m ² 0,6 MPa CAT = 18 min	L1 – 85.2 L2 – 75.1 L3 – 56.2 L4 – 7.1	14,1 14,3 14,1 14,7	608 681 655 713	D1	668	2,1	4,2	3,1	5,9
				D2	667	0,4	1,2	2,1	4,6
				D3	671	8,6	16,0	11,8	23,0
				D4	669	1,6	3,7	2,3	4,0
				D5	670	0,0	0,0	0,5	1,6
				D6	671	10,2	21,0	12,1	23,2
				D7	668	3,4	7,7	3,9	8,6
TMP_14 350 g/m ² 0,6 Mpa CAT = 10 min	L1 – 85.1 L2 – 7.2 L3 – 56.1 L4 – 77.1	14,1 14,7 14,1 14,3	601 703 641 709	D1	668	8,9	14,6	10,7	16,0
				D2	667	8,5	12,0	10,8	13,8
				D3	673	3,5	9,0	5,1	12,0
				D4	675	0,8	2,3	1,7	5,2
				D5	666	0,0	0,0	3,1	6,8
				D6	663	1,9	2,5	2,5	3,7
				D7	665	1,4	2,7	1,6	3,1

Quadro B.4 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PRF-3

Elemento	Lamela	Teor de água (%)	Massa volúmica (kg/m ³)	Provete	Massa volúmica (kg/m ³)	2º Ciclo		3º Ciclo	
						total (%)	máxima (%)	total (%)	máxima (%)
TMP_11 450 g/m ² 0,8 MPa CAT = 23 min	L1 – 25.1 L2 – 118.1 L3 – 95.1 L4 – 39.1	14,5 13,9 14,4 14,6	622 700 637 705	D1	669	1,6	4,7	1,6	4,7
				D2	673	0,5	1,5	0,5	1,6
				D3	664	0,5	1,4	0,5	1,4
				D4	678	0,0	0,0	0,0	0,0
				D5	674	0,6	1,7	1,0	2,9
				D6	678	2,4	7,2	2,6	7,8
				D7	671	0,5	1,6	1,4	4,3
TMP_12 450 g/m ² 0,8 MPa CAT = 15 min	L1 – 25.2 L2 – 39.2 L3 – 95.2 L4 – 118.2	14,5 14,6 14,4 13,9	620 684 639 712	D1	666	0,5	1,6	0,6	1,7
				D2	669	0,0	0,0	0,0	0,0
				D3	669	1,3	2,3	1,5	2,3
				D4	668	0,4	1,2	0,4	1,2
				D5	668	1,2	2,4	1,8	2,9
				D6	670	1,2	3,6	1,8	5,3
				D7	672	2,1	4,9	4,3	11,0

Quadro B.5 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo MUF-1 (100/20 e 100/35)

Elemento	Lamela	Teor de água (%)	Massa volúmica (kg/m ³)	Provete	Massa volúmica (kg/m ³)	2º Ciclo		3º Ciclo	
						total (%)	máxima (%)	total (%)	máxima (%)
TMP_1 400 g/m ² 0,6 MPa CAT = 19 min	L1 – 8.2 L2 – 36.1 L3 – 83.2 L4 – 16.1	13,8 13,6 14,0 14,2	606 640 636 718	D1	659	4,2	7,9	4,6	8,7
				D2	663	1,5	4,6	1,6	4,8
				D3	672	0,0	0,0	0,0	0,0
				D4	665	1,6	3,7	1,9	3,9
				D5	654	6,8	10,7	7,5	11,6
				D6	660	1,2	3,7	2,1	5,2
				D7	651	1,4	2,5	2,7	4,3
TMP_2 400 g/m ² 0,6 MPa CAT = 10 min	L1 – 8.1 L2 – 84.1 L3 – 83.1 L4 – 50.1	13,8 13,5 14,0 14,0	608 670 650 671	D1	646	9,9	20,2	10,8	22,2
				D2	649	11,4	20,9	12,8	23,3
				D3	652	10,6	14,3	11,6	14,8
				D4	665	5,2	12,2	6,3	15,7
				D5	652	10,2	18,8	12,2	18,9
				D6	667	5,4	14,5	5,8	15,8
				D7	665	0,8	2,4	0,9	2,6
TMP_3 400 g/m ² 0,6 MPa CAT = 19 min	L1 – 126.2 L2 – 126.1 L3 – 45.1 L4 – 13.2	13,9 13,9 13,9 14,3	572 670 660 715	D1	639	0,5	1,4	0,5	1,4
				D2	652	0,0	0,0	0,6	1,9
				D3	655	0,5	1,5	1,5	4,4
				D4	663	2,1	3,6	2,6	5,1
				D5	670	0,7	2,0	0,7	2,0
				D6	681	0,0	0,0	0,0	0,0
				D7	687	0,0	0,0	0,0	0,0
TMP_4 400 g/m ² 0,6 MPa CAT = 10 min	L1 – 45.2 L2 – 29.2 L3 – 29.1 L4 – 13.1	13,9 13,8 13,8 14,3	627 656 631 707	D1	684	5,6	16,9	5,7	17,1
				D2	665	0,8	2,4	0,9	2,6
				D3	658	0,4	1,2	0,5	1,4
				D4	662	0,5	1,5	1,0	1,5
				D5	660	0,0	0,0	0,0	0,0
				D6	652	0,8	1,3	1,2	2,3
				D7	659	2,6	4,8	2,7	5,0
TMP_5 400 g/m ² 0,6 MPa CAT = 10 min	L1 – 51.1 L2 – 114.1 L3 – 66.1 L4 – 65.2	20,8 14,0 13,7 14,1	584 643 595 781	D1	652	4,1	12,4	5,0	13,3
				D2	660	1,9	5,6	2,7	5,7
				D3	667	0,0	0,0	0,0	0,0
				D4	672	0,6	1,8	0,6	1,9
				D5	676	2,2	5,2	2,7	5,8
				D6	646	3,1	9,2	3,1	9,4
				D7	636	0,9	2,6	1,9	5,8

Quadro B.6 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PUR-1 e PUR-1+PR

Elemento	Lamela	Teor de água (%)	Massa volúmica (kg/m ³)	Provete	Massa volúmica (kg/m ³)	2º Ciclo		3º Ciclo	
						total (%)	máxima (%)	total (%)	máxima (%)
TMP_6 160 g/m ² 0,8 MPa CAT = 5 min	L1 – 51.2 L2 – 31.2 L3 – 31.1 L4 – 65.1	20,8 14,1 14,1 14,1	583 670 649 713	D1	658	24,1	51,1	26,2	52,0
				D2	655	18,6	53,1	19,9	56,9
				D3	660	13,1	31,0	16,4	39,8
				D4	653	16,1	30,9	17,7	33,8
				D5	647	17,9	43,3	20,5	48,7
				D6	649	23,3	58,6	23,4	58,6
				D7	658	24,5	64,9	29,3	72,9
TMP_19 180 g/m ² 0,8 MPa CAT = 16 min	L1 – 71.1 L2 – 133.2 L3 – 89.1 L4 – 54.1	15,1 14,5 15,1 14,6	629 677 660 691	D1	666	1,7	3,9	2,2	5,2
				D2	667	9,2	27,6	12,9	32,9
				D3	667	6,9	19,4	10,4	25,3
				D4	670	5,7	10,7	6,3	10,7
				D5	671	7,6	12,3	9,8	13,8
				D6	675	3,4	5,5	4,7	8,8
				D7	671	1,4	2,7	2,2	5,2
TMP_20 180 g/m ² 0,8 MPa CAT = 9 min	L1 – 133.1 L2 – 89.2 L3 – 71.2 L4 – 54.2	14,5 15,1 15,1 14,6	617 675 650 724	D1	686	1,0	3,0	1,0	3,0
				D2	679	0,0	0,0	0,0	0,0
				D3	680	0,8	2,4	0,9	2,6
				D4	673	4,0	11,9	4,2	12,7
				D5	665	1,4	4,3	1,4	4,3
				D6	661	0,5	1,6	0,5	1,6
				D7	658	0,4	1,2	1,2	2,2

ANEXO C – Resultados dos ensaios de delaminação em elementos de Choupo

Quadro C.1 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PRF-1

Elemento	Lamela	Teor de água (%)	Massa volúmica (kg/m ³)	Provete	Massa volúmica (kg/m ³)	2º Ciclo		3º Ciclo	
						total (%)	máxima (%)	total (%)	máxima (%)
BP_13 350 g/m ² 0,8 MPa CAT = 9 min	L1 – 69.1 L2 – 68.1 L3 – 8.1 L4 – 99	14,2 14,6 14,4 14,5	453 474 463 485	D1	462	0,8	2,4	0,9	2,6
				D2	460	0,9	2,6	2,1	3,7
				D3	467	0,0	0,0	0,0	0,0
				D4	489	1,7	3,8	2,1	5,1
				D5	464	0,0	0,0	1,1	1,8
				D6	475	0,0	0,0	0,5	1,5
				D7	456	3,3	9,8	3,9	11,6
BP_14 350 g/m ² 0,8 MPa CAT = 6 min	L1 – 69.2 L2 – 8.2 L3 – 170 L4 – 68.2	14,2 14,4 14,4 14,6	460 478 473 478	D1	486	1,3	3,9	1,5	4,6
				D2	475	4,0	10,6	8,6	17,1
				D3	477	0,5	1,5	2,0	4,4
				D4	471	0,0	0,0	1,0	3,0
				D4	471	0,0	0,0	1,0	3,0
BP_44 350 g/m ² 0,8 MPa CAT = 5 min	L1 – 27 L2 – 67.2 L3 – 63.2 L4 – 67.1	15,4 14,6 14,3 14,6	426 500 462 508	D1	480	0,4	1,3	0,6	1,7
				D2	480	1,2	1,8	1,4	2,1
				D3	482	0,4	1,3	0,9	2,8
				D4	485	0,5	1,6	0,6	1,7
				D4	485	0,5	1,6	0,6	1,7
BP_25 450 g/m ² 0,8 MPa CAT = 10 min	L1 – 14 L2 – 47 L3 – 163.2 L4 – 166.2	14,6 14,9 15,1 15,0	459 477 473 481	D1	485	0,0	0,0	0,0	0,0
				D2	472	0,0	0,0	0,0	0,0
				D3	477	0,0	0,0	0,0	0,0
				D4	478	0,0	0,0	0,0	0,0
				D4	478	0,0	0,0	0,0	0,0
BP_26 450 g/m ² 0,8 MPa CAT = 5 min	L1 – 166.1 L2 – 166.3 L3 – 163.1 L4 – 161	15,0 15,0 15,1 15,0	456 468 467 490	D1	474	0,0	0,0	0,0	0,0
				D2	476	0,0	0,0	0,0	0,0
				D3	480	0,0	0,0	0,0	0,0
				D4	468	0,0	0,0	0,0	0,0
				D4	468	0,0	0,0	0,0	0,0
BP_43 450 g/m ² 0,8 MPa CAT = 9 min	L1 – 73.1 L2 – 73.2 L3 – 144.1 L4 – 63.1	14,4 14,4 14,5 14,3	452 458 457 477	D1	460	3,1	9,2	3,4	10,1
				D2	473	2,8	4,5	3,2	5,1
				D3	464	3,1	7,2	3,4	8,3
				D4	466	0,5	1,4	2,7	6,6
				D5	476	1,3	2,4	1,3	2,3
				D6	471	2,7	8,0	2,8	8,5
				D7	464	4,9	7,8	5,1	7,7

Quadro C.2 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PRF-1 (continuação)

Elemento	Lamela	Teor de água (%)	Massa volúmica (kg/m ³)	Provete	Massa volúmica (kg/m ³)	2º Ciclo		3º Ciclo	
						total (%)	máxima (%)	total (%)	máxima (%)
BP_31 350 g/m ² 1,0 MPa CAT = 10 min	L1 – 143.1	14,2	425	D1	459	1,6	4,9	2,0	6,0
				D2	463	0,0	0,0	0,0	0,0
	L2 – 4	14,2	444	D3	461	0,0	0,0	0,7	2,0
				D4	459	0,0	0,0	0,0	0,0
	L3 – 143.2	14,2	430	D5	451	0,7	2,1	0,8	2,4
				D6	448	0,0	0,0	0,8	2,4
	L4 – 138	14,6	487	D7	452	0,0	0,0	0,4	1,3
BP_46 350 g/m ² 1,0 MPa CAT = 5 min	L1 – 115.2	15,0	447	D1	483	0,0	0,0	0,5	1,6
		14,5	495	D2	481	0,9	2,8	1,0	2,9
	L3 – 54.2	14,7	458	D3	484	0,0	0,0	0,0	0,0
	L4 – 46.2	14,4	503	D4	483	0,0	0,0	0,0	0,0
BP_32 450 g/m ² 1,0 MPa CAT = 5 min	L1 – 191.2	14,3	423	D1	468	0,0	0,0	0,0	0,0
				D2	464	1,1	2,0	1,4	2,3
	L2 – 133.1	14,2	480	D3	467	0,0	0,0	0,5	1,4
				D4	478	0,0	0,0	0,0	0,0
	L3 – 191.1	14,3	434	D5	461	0,6	1,7	0,6	1,7
				D6	462	0,0	0,0	0,0	0,0
	L4 – 133.2	14,2	487	D7	474	0,0	0,0	0,0	0,0
BP_45 450 g/m ² 1,0 MPa CAT = 9 min	L1 – 115.1	15,0	450	D1	482	0,0	0,0	0,0	0,0
		14,5	502	D2	484	0,0	0,0	0,0	0,0
	L2 – 56.1	14,5	502	D3	482	0,0	0,0	0,0	0,0
				D4	484	0,0	0,0	0,0	0,0
	L3 – 54.1	14,7	455	D5	487	0,0	0,0	0,0	0,0
				D6	489	1,2	3,7	1,2	3,7
	L4 – 46.1	14,4	502	D7	486	0,6	1,7	0,6	1,8

Quadro C.3 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PRF-2

Elemento	Lamela	Teor de água (%)	Massa volúmica (kg/m ³)	Provete	Massa volúmica (kg/m ³)	2º Ciclo		3º Ciclo	
						total (%)	máxima (%)	total (%)	máxima (%)
BP_17 350 g/m ² 0,8 MPa CAT = 9 min	L1 – 124	15,3	426	D1	470	1,0	1,7	2,7	5,7
				D2	476	1,6	4,9	3,4	10,1
	L2 – 77	15,6	491	D3	496	1,2	3,6	1,3	3,9
				D4	472	0,7	2,1	1,0	2,9
	L3 – 1	16,1	441	D5	470	2,6	6,8	5,1	13,8
				D6	468	1,3	3,9	2,4	7,1
	L4 – 48	16,0	524	D7	478	1,8	2,9	2,1	3,4

Quadro C.4 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PRF-2 (continuação)

Elemento	Lamela	Teor de água (%)	Massa volúmica (kg/m ³)	Provete	Massa volúmica (kg/m ³)	2º Ciclo		3º Ciclo	
						total (%)	máxima (%)	total (%)	máxima (%)
BP_18 350 g/m ² 0,8 MPa CAT = 5 min	L1 – 9.1	15,8	434	D1	462	0,4	1,2	0,9	1,5
	L2 – 70.1	15,7	472	D2	465	1,2	2,3	1,2	2,3
	L3 – 9.2	15,8	437	D3	463	0,8	2,3	1,7	3,8
	L4 – 70.2	15,7	479	D4	463	0,0	0,0	0,0	0,0
BP_21 450 g/m ² 0,8 MPa CAT = 11 min	L1 – 128.2	14,1	426	D1	456	1,2	3,6	1,6	3,6
	L2 – 147.1	14,6	452	D2	447	0,4	1,2	0,4	1,2
	L3 – 128.1	14,1	430	D3	452	0,0	0,0	0,0	0,0
	L4 – 155.1	14,2	481	D4	457	0,0	0,0	0,0	0,0
				D5	461	0,0	0,0	0,4	1,2
				D6	471	1,6	3,3	1,9	2,9
				D7	457	1,3	4,0	1,3	4,0
BP_22 450 g/m ² 0,8 MPa CAT = 6 min	L1 – 147.2	14,6	446	D1	462	3,6	10,7	5,0	12,6
	L2 – 17.1	15,4	461	D2	473	1,5	2,8	1,5	2,8
	L3 – 17.2	15,4	461	D3	470	0,0	0,0	0,0	0,0
	L4 – 155.2	14,2	473	D4	469	0,4	1,2	2,1	3,9
BP_53 350 g/m ² 1,0 MPa CAT = 9 min	L1 – 192	14,9	430	D1	464	1,4	4,1	1,9	4,2
	L2 – 30	15,4	462	D2	467	0,0	0,0	0,0	0,0
	L3 – 108	15,5	435	D3	462	0,0	0,0	0,0	0,0
	L4 – 158.1	14,5	497	D4	461	0,5	1,6	0,6	1,7
				D5	469	0,5	1,6	0,6	1,9
				D6	461	0,6	1,8	1,1	1,8
				D7	460	0,0	0,0	0,0	0,0
BP_54 350 g/m ² 1,0 MPa CAT = 6 min	L1 – 156.1	15,3	445	D1	474	2,2	5,2	4,7	7,9
	L2 – 101	15,5	471	D2	474	3,1	9,4	4,4	9,8
	L3 – 156.2	15,3	449	D3	477	2,9	4,5	3,6	6,2
	L4 – 158.2	14,5	497	D4	466	0,0	0,0	0,6	1,7
BP_49 450 g/m ² 1,0 MPa CAT = 9 min	L1 – 179.2	15,1	422	D1	445	3,9	9,4	4,1	9,9
	L2 – 21	15,4	427	D2	448	3,2	3,7	5,4	7,7
	L3 – 179.1	15,1	426	D3	440	0,0	0,0	0,8	2,3
	L4 – 57	15,1	481	D4	443	3,0	5,1	4,0	7,9
				D5	447	5,5	11,8	6,9	12,3
				D6	451	2,3	4,4	3,3	7,3
				D7	444	2,1	4,5	2,3	5,1
BP_50 450 g/m ² 1,0 MPa CAT = 6 min	L1 – 13.1	15,0	417	D1	445	1,1	3,3	2,2	6,6
	L2 – 29	15,3	438	D2	452	5,5	16,6	6,5	19,5
	L3 – 13.2	15,0	434	D3	447	2,5	7,5	2,8	8,4
	L4 – 61	15,3	483	D4	458	1,7	5,0	1,6	4,9

Quadro C.5 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PRF-3

Elemento	Lamela	Teor de água (%)	Massa volúmica (kg/m ³)	Provete	Massa volúmica (kg/m ³)	2º Ciclo		3º Ciclo	
						total (%)	máxima (%)	total (%)	máxima (%)
BP_35 350 g/m ² 0,8 MPa CAT = 9 min	L1 – 36.1 L2 – 93.1 L3 – 93.2 L4 – 184.1	15,0 15,9 15,9 14,4	452 465 457 500	D1	472	3,3	5,6	7,1	9,7
				D2	479	8,0	13,8	10,0	18,8
				D3	473	1,4	4,3	2,8	8,3
				D4	470	2,2	4,7	4,4	9,9
				D5	478	8,3	12,8	13,1	21,6
				D6	477	5,2	10,8	6,7	12,8
				D7	468	3,5	8,8	7,5	11,1
BP_36 350 g/m ² 0,8 MPa CAT = 5 min	L1 – 85.1 L2 – 85.2 L3 – 36.2 L4 – 184.2	14,5 14,5 15,0 14,4	436 461 441 494	D1	468	0,0	0,0	0,0	0,0
				D2	468	2,6	7,8	2,6	7,9
				D3	462	2,3	6,9	4,6	13,7
				D4	461	2,5	7,6	2,8	8,4
BP_33 450 g/m ² 0,8 MPa CAT = 9 min	L1 – 173 L2 – 145.1 L3 – 145.2 L4 – 154.1	14,3 14,7 14,7 14,4	428 445 434 484	D1	469	0,0	0,0	0,5	1,4
				D2	462	0,0	0,0	0,0	0,0
				D3	458	0,4	1,3	0,5	1,6
				D4	456	0,0	0,0	0,7	2,0
				D5	454	0,0	0,0	0,6	1,9
				D6	457	0,0	0,0	0,0	0,0
				D7	460	1,1	3,2	1,1	3,3
BP_34 450 g/m ² 0,8 MPa CAT = 5 min	L1 – 103.1 L2 – 168.1 L3 – 168.2 L4 – 154.2	14,4 14,7 14,7 14,4	422 471 464 504	D1	472	0,4	1,3	1,2	3,6
				D2	473	0,0	0,0	0,0	0,0
				D3	473	0,0	0,0	0,0	0,0
				D4	472	0,6	1,7	1,3	3,9
BP_51 350 g/m ² 1,0 MPa CAT = 9 min	L1 – 117.1 L2 – 75.1 L3 – 119.1 L4 – 100.1	15,2 15,5 15,1 15,0	419 433 432 466	D1	446	0,0	0,0	0,0	0,0
				D2	443	0,6	1,8	1,6	4,8
				D3	447	0,5	1,6	0,5	1,5
				D4	445	0,0	0,0	0,5	1,4
				D5	449	0,5	1,4	0,5	1,6
				D6	449	0,0	0,0	0,0	0,0
				D7	454	1,6	4,7	2,4	7,3
BP_52 350 g/m ² 1,0 MPa CAT = 5 min	L1 – 117.2 L2 – 75.2 L3 – 119.2 L4 – 100.2	15,2 15,5 15,1 15,0	418 433 422 464	D1	445	0,8	2,5	2,3	5,3
				D2	438	0,7	2,1	2,4	4,8
				D3	442	3,0	6,6	3,8	6,8
				D4	438	0,0	0,0	0,0	0,0

Quadro C.6 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PRF-3 (continuação)

Elemento	Lamela	Teor de água (%)	Massa volúmica (kg/m ³)	Provete	Massa volúmica (kg/m ³)	2º Ciclo		3º Ciclo	
						total (%)	máxima (%)	total (%)	máxima (%)
BP_37 450 g/m ² 1,0 MPa CAT = 10 min	L1 – 112.1	14,2	423	D1	460	0,0	0,0	2,7	6,0
				D2	461	0,0	0,0	0,0	0,0
	L2 – 157.1	14,5	466	D3	472	0,5	1,6	0,5	1,6
				D4	477	0,0	0,0	2,1	6,4
	L3 – 112.2	14,2	437	D5	466	0,0	0,0	0,0	0,0
				D6	473	0,0	0,0	1,1	3,3
	L4 – 78.1	14,9	508	D7	467	0,0	0,0	1,2	3,6
BP_38 450 g/m ² 1,0 MPa CAT = 5 min	L1 – 157.2	14,5	462	D1	478	0,6	1,7	0,6	1,9
	L2 – 53.2	15,3	469	D2	477	3,3	9,9	5,4	14,6
	L3 – 53.1	15,3	465	D3	480	0,0	0,0	1,2	3,5
	L4 – 78.2	14,9	479	D4	477	0,7	2,1	5,1	11,1
BP_47 450 g/m ² 1,0 MPa CAT = 9 min	L1 – 31.1	15,6	425	D1	497	5,3	15,8	8,0	24,1
				D2	496	5,2	15,6	5,6	16,8
	L2 – 50.1	15,0	488	D3	479	2,4	5,3	5,1	13,1
				D4	476	0,0	0,0	1,8	5,4
	L3 – 51.1	14,8	468	D5	475	0,5	1,5	0,5	1,6
				D6	476	1,7	5,1	2,4	7,2
	L4 – 45.1	14,6	513	D7	477	1,6	4,9	2,3	5,5
BP_48 450 g/m ² 1,0 MPa CAT = 5 min	L1 – 31.2	15,6	436	D1	476	0,7	2,0	0,7	2,1
	L2 – 50.2	15,0	471	D2	477	1,6	3,1	2,3	5,1
	L3 – 51.2	14,8	452	D3	477	0,6	1,9	1,2	3,6
	L4 – 45.2	14,6	508	D4	475	0,0	0,0	0,0	0,0

Quadro C.7 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo MUF-1 (100/20)

Elemento	Lamela	Teor de água (%)	Massa volúmica (kg/m ³)	Provete	Massa volúmica (kg/m ³)	2º Ciclo		3º Ciclo	
						total (%)	máxima (%)	total (%)	máxima (%)
BP_67 400 g/m ² 0,8 MPa CAT = 8 min	L1 – 91.1 L2 – 34.2 L3 – 34.1 L4 – 91.2	14,5 15,2 15,2 14,5	452 465 459 473	D1	468	3,3	6,4	3,8	6,3
				D2	484	8,2	16,9	9,1	17,1
				D3	471	0,8	2,3	2,2	5,1
				D4	462	2,1	3,5	2,1	3,2
				D5	462	3,2	9,7	4,7	10,8
				D6	463	4,7	7,0	5,9	9,5
				D7	472	4,6	10,0	9,2	20,0
BP_68 400 g/m ² 0,8 MPa CAT = 5 min	L1 – 2.2 L2 – 111.1 L3 – 2.1 L4 – 111.2	14,6 14,4 14,6 14,4	431 439 433 452	D1	447	2,2	3,9	3,3	5,1
				D2	447	5,2	12,0	5,9	13,2
				D3	446	2,9	7,2	4,8	11,4
				D4	446	4,3	12,9	4,7	14,1
						4,3	12,9	4,7	14,1

Quadro C.8 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo MUF-2

Elemento	Lamela	Teor de água (%)	Massa volúmica (kg/m ³)	Provete	Massa volúmica (kg/m ³)	2º Ciclo		3º Ciclo	
						total (%)	máxima (%)	total (%)	máxima (%)
BP_15 350 g/m ² 0,8 MPa CAT = 12 min	L1 – 174.1 L2 – 43.1 L3 – 44 L4 – 41	15,0 15,2 16,1 14,9	431 503 498 514	D1	480	0,0	0,0	0,4	1,2
				D2	481	0,0	0,0	0,0	0,0
				D3	483	0,4	1,2	0,4	1,2
				D4	484	0,0	0,0	0,8	2,3
				D5	486	1,7	3,7	2,2	3,9
				D6	518	1,9	4,7	3,6	5,0
				D7	520	0,0	0,0	0,0	0,0
BP_16 350 g/m ² 0,8 MPa CAT = 7 min	L1 – 172.2 L2 – 43.2 L3 – 167 L4 – 172.1	14,7 15,2 14,8 14,7	460 483 471 502	D1	502	0,7	2,2	1,1	3,4
				D2	493	1,5	3,1	1,7	3,4
				D3	489	0,0	0,0	0,0	0,0
				D4	486	0,0	0,0	0,0	0,0
BP_19 450 g/m ² 0,8 MPa CAT = 11 min	L1 – 130.1 L2 – 159.1 L3 – 94.1 L4 – 123.1	14,2 14,2 14,6 14,1	426 452 452 486	D1	477	1,3	2,3	1,8	3,6
				D2	462	0,0	0,0	0,0	0,0
				D3	459	0,0	0,0	0,0	0,0
				D4	465	0,0	0,0	0,0	0,0
				D5	462	0,0	0,0	0,0	0,0
				D6	464	0,0	0,0	0,0	0,0
				D7	476	0,0	0,0	0,0	0,0

Quadro C.9 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo MUF-2 (continuação)

Elemento	Lamela	Teor de água (%)	Massa volúmica (kg/m ³)	Provete	Massa volúmica (kg/m ³)	2º Ciclo		3º Ciclo	
						total (%)	máxima (%)	total (%)	máxima (%)
BP_20 450 g/m ² 0,8 MPa CAT = 7 min	L1 – 130.2	14,2	428	D1	466	0,0	0,0	0,0	0,0
	L2 – 94.2	14,6	475	D2	469	0,4	1,2	0,7	2,0
	L3 – 159.2	14,2	436	D3	462	1,6	4,9	3,0	9,1
	L4 – 123.2	14,1	496	D4	468	0,0	0,0	1,0	1,6
BP_29 350 g/m ² 1,0 MPa CAT = 12 min	L1 – 107.1	14,1	416	D1	455	0,0	0,0	0,0	0,0
	L2 – 26.1	14,4	452	D2	453	0,0	0,0	0,0	0,0
	L3 – 89.1	14,6	447	D3	453	0,0	0,0	0,0	0,0
	L4 – 151.1	14,3	470	D4	458	0,0	0,0	0,0	0,0
				D5	459	0,7	2,1	0,7	2,2
				D6	463	0,0	0,0	0,0	0,0
				D7	456	0,0	0,0	0,4	1,3
BP_30 350 g/m ² 1,0 MPa CAT = 8 min	L1 – 107.2	14,1	428	D1	448	0,0	0,0	0,0	0,0
	L2 – 89.3	14,6	445	D2	454	0,5	1,4	0,5	1,4
	L3 – 89.2	14,6	441	D3	464	0,4	1,3	0,9	2,8
	L4 – 151.2	14,3	469	D4	457	0,0	0,0	0,0	0,0
BP_71 450 g/m ² 1,0 MPa CAT = 10 min	L1 – 121.1	14,6	447	D1	454	0,0	0,0	0,0	0,0
	L2 – 76.2	15,1	452	D2	490	1,1	1,7	1,2	1,9
	L3 – 169	14,9	447	D3	464	0,0	0,0	0,0	0,0
	L4 – 76.1	15,1	462	D4	454	0,0	0,0	0,5	1,4
				D5	452	1,1	1,8	1,2	2,0
				D6	458	0,5	1,4	0,5	1,5
				D7	471	1,1	1,8	1,4	2,8
BP_72 450 g/m ² 1,0 MPa CAT = 5 min	L1 – 129.1	15,0	436	D1	459	5,2	12,0	6,1	13,4
	L2 – 129.3	15,0	459	D2	459	1,2	3,6	1,2	3,6
	L3 – 121.2	14,6	439	D3	459	0,0	0,0	0,0	0,0
	L4 – 129.2	15,0	474	D4	459	0,8	2,3	0,8	2,5

Quadro C.10 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo EPI-2

Elemento	Lamela	Teor de água (%)	Massa volúmica (kg/m ³)	Provete	Massa volúmica (kg/m ³)	2º Ciclo		3º Ciclo	
						total (%)	máxima (%)	total (%)	máxima (%)
BP_11 350 g/m ² 0,8 MPa CAT = 9 min	L1 – 187 L2 – 5 L3 – 120 L4 – 72	14,3 14,4 14,2 14,1	428 468 465 485	D1	469	5,4	7,6	7,5	9,3
				D2	480	7,3	11,4	12,7	21,3
				D3	479	11,7	27,1	13,4	30,3
				D4	459	5,9	10,1	6,9	12,0
				D5	458	2,3	4,5	3,1	6,9
				D6	473	5,5	13,6	5,5	13,7
				D7	460	3,5	7,7	5,2	11,2
BP_12 350 g/m ² 0,8 MPa CAT = 5 min	L1 – 102.1 L2 – 102.3 L3 – 102.2 L4 – 12	14,1 14,1 14,1 14,2	455 461 456 481	D1	477	7,7	14,8	8,7	13,6
				D2	477	7,5	9,6	8,7	10,9
				D3	472	6,6	11,1	6,8	10,9
				D4	469	10,2	19,4	11,1	20,7
BP_27 350 g/m ² 1,0 MPa CAT = 9 min	L1 – 81.2 L2 – 81.1 L3 – 20.1 L4 – 160.1	14,9 14,9 14,4 14,0	446 451 450 463	D1	449	7,2	21,6	8,1	24,2
				D2	447	1,2	3,5	1,2	3,7
				D3	458	19,9	49,7	20,9	50,9
				D4	466	15,5	45,1	17,1	49,8
				D5	457	9,1	23,9	10,8	28,3
				D6	456	5,2	15,6	5,7	17,2
				D7	467	11,2	29,8	12,1	31,2
BP_28 350 g/m ² 1,0 MPa CAT = 5 min	L1 – 7.1 L2 – 20.2 L3 – 7.2 L4 – 160.2	14,0 14,4 14,0 14,0	427 442 435 463	D1	454	10,1	30,4	12,0	35,9
				D2	450	3,5	8,6	5,3	12,3
				D3	451	3,2	9,6	4,3	11,3
				D4	448	4,4	13,1	4,5	13,5
BP_69 300 g/m ² 0,8 MPa CAT = 9 min	L1 – 90.1 L2 – 92.2 L3 – 92.1 L4 – 90.2	14,4 14,6 14,6 14,4	452 461 457 462	D1	456	5,7	10,6	6,8	11,4
				D2	466	0,7	2,1	1,3	2,3
				D3	457	1,8	1,9	2,9	3,4
				D4	478	5,2	11,9	5,6	12,8
				D5	456	9,6	11,8	11,7	14,1
				D6	459	7,7	13,1	9,1	13,0
				D7	461	7,2	12,4	12,1	20,1
BP_70 300 g/m ² 0,8 MPa CAT = 5 min	L1 – 80.2 L2 – 64.2 L3 – 64.1 L4 – 80.1	14,8 15,4 15,4 14,8	454 479 464 495	D1	473	2,1	6,2	2,2	6,6
				D2	476	4,5	9,1	6,6	14,7
				D3	477	4,9	12,1	5,5	13,3
				D4	487	2,9	3,3	5,9	10,1

Quadro C.11 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PUR-1

Elemento	Lamela	Teor de água (%)	Massa volúmica (kg/m ³)	Provete	Massa volúmica (kg/m ³)	2º Ciclo		3º Ciclo	
						total (%)	máxima (%)	total (%)	máxima (%)
BP_09 180 g/m ² 0,8 MPa CAT = 10 min	L1 – 40	14,6	443	D1	467	6,8	12,1	8,1	15,3
				D2	471	1,0	1,7	2,4	4,3
	L2 – 6	14,7	457	D3	460	11,6	20,9	13,0	22,9
				D4	460	13,9	21,7	16,1	23,6
	L3 – 98	14,6	456	D5	454	18,0	27,1	19,4	28,4
				D6	456	6,8	11,4	7,5	12,9
				D7	453	5,6	13,2	9,2	17,2
BP_10 180 g/m ² 0,8 MPa CAT = 5 min	L1 – 186	14,3	429	D1	457	13,4	20,2	15,7	24,3
				D2	456	22,2	31,4	25,3	34,5
	L2 – 65.1	13,8	484	D3	463	19,6	35,5	20,9	35,5
				D4	464	10,8	16,6	13,2	18,3
	L3 – 110	14,5	437						
L4 – 65.2	13,8	489							

Quadro C.12 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PUR-1+PR

Elemento	Lamela	Teor de água (%)	Massa volúmica (kg/m ³)	Provete	Massa volúmica (kg/m ³)	2º Ciclo		3º Ciclo	
						total (%)	máxima (%)	total (%)	máxima (%)
BP_23 180 g/m ² 0,8 MPa CAT = 11 min	L1 – 188.2	14,7	411	D1	443	0,5	1,4	1,3	2,3
				D2	439	0,8	2,3	1,4	3,1
	L2 – 188.1	14,7	422	D3	432	2,4	6,1	2,8	6,3
				D4	429	3,2	5,3	4,2	6,6
	L3 – 116.1	14,2	415	D5	432	3,9	7,9	4,3	8,7
				D6	432	0,9	2,8	1,1	3,4
				D7	432	1,6	2,4	2,6	5,2
BP_24 180 g/m ² 0,8 MPa CAT = 5 min	L1 – 116.2	14,2	397	D1	465	6,5	15,0	8,2	19,8
				D2	451	4,3	12,9	5,4	16,3
	L2 – 42	16,2	466	D3	452	9,3	28,0	11,7	35,0
				D4	456	12,3	25,1	13,6	25,7
BP_39 180 g/m ² 1,0 MPa CAT = 10 min	L1 – 11.1	15,0	417	D1	454	0,0	0,0	0,0	0,0
				D2	446	0,0	0,0	0,0	0,0
	L2 – 82.1	14,5	447	D3	444	0,0	0,0	0,0	0,0
				D4	439	0,0	0,0	0,0	0,0
	L3 – 22.1	15,6	428	D5	441	0,0	0,0	0,0	0,0
				D6	443	0,0	0,0	0,0	0,0
				D7	444	2,2	6,5	3,2	7,1
L4 – 49.1	15,5	485							

Quadro C.13 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PUR-1+PR (continuação)

Elemento	Lamela	Teor de água (%)	Massa volúmica (kg/m ³)	Provete	Massa volúmica (kg/m ³)	2º Ciclo		3º Ciclo	
						total (%)	máxima (%)	total (%)	máxima (%)
BP_40 180 g/m ² 1,0 MPa CAT = 5 min	L1 – 11.2	15,0	426	D1	444	1,0	2,9	1,3	4,0
	L2 – 82.2	14,5	441	D2	445	0,5	1,5	1,3	2,1
	L3 – 88.2	15,6	441	D3	445	0,9	2,8	1,5	4,5
	L4 – 49.2	15,5	459	D4	442	4,0	12,0	5,9	15,0
BP_41 180 g/m ² 1,0 MPa CAT = 10 min	L1 – 118.1	14,4	438	D1	444	7,5	14,0	9,3	18,9
	L2 – 52.1	14,6	471	D2	445	9,5	15,7	11,4	18,4
	L3 – 95.1	14,7	459	D3	445	1,7	5,1	3,0	8,9
	L4 – 180.1	14,7	459	D4	442	1,7	3,6	2,6	4,6
				D5	467	6,3	9,5	6,5	9,9
				D6	474	4,2	12,7	5,0	13,6
				D7	474	2,6	5,6	2,7	5,8
BP_42 180 g/m ² 1,0 MPa CAT = 5 min	L1 – 118.2	14,4	442	D1	471	10,7	13,3	12,8	15,4
	L2 – 52.2	14,6	466	D2	471	8,1	11,2	10,6	16,4
	L3 – 95.2	14,7	462	D3	470	6,5	10,0	7,0	11,8
	L4 – 180.2	14,5	474	D4	474	12,0	20,9	12,7	21,5
BP_73 180 g/m ² 1,0 MPa CAT = 9 min	L1 – 28.1	14,6	441	D1	466	2,9	5,9	3,7	8,2
	L2 – 153.1	14,6	454	D2	469	4,3	6,4	4,5	7,0
	L3 – 132	14,9	452	D3	467	2,6	6,4	3,8	7,9
	L4 – 137	14,8	487	D4	462	3,6	8,2	4,5	10,6
				D5	465	6,5	15,4	7,0	15,9
				D6	466	2,7	5,9	2,9	6,5
				D7	462	1,4	4,2	1,4	4,2
BP_74 180 g/m ² 1,0 MPa CAT = 5 min	L1 – 28.2	14,6	423	D1	459	18,2	44,7	19,2	45,5
	L2 – 153.2	14,6	458	D2	465	6,2	11,6	6,5	12,5
	L3 – 106.2	14,6	446	D3	466	2,9	5,5	3,6	7,7
	L4 – 106.1	14,6	462	D4	476	1,8	2,8	1,8	2,8

ANEXO D – Resultados de ensaios de delaminação em elementos submetidos a envelhecimento natural

Quadro D.1 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PRF-1 - MP_{env}

Elemento	Lamela	Teor de água (%)	Massa volúmica (kg/m ³)	Provete	Massa volúmica (kg/m ³)	Delaminação inicial (%)	2° Ciclo		3° Ciclo	
							total (%)	máximo (%)	total (%)	máximo (%)
MP _{env_78} 350 g/m ² 0,8 MPa CAT = 21 min 36 meses Imunizador	L1 – 257 L2 – 276 L3 – 229 L4 – 338 L5 – 298 L6 – 303	14,7 14,7 12,7 13,8 14,0 14,4	695 635 580 576 629 727	D1	-	-	-	-	-	-
				D2	-	-	-	-	-	-
				D3	-	-	-	-	-	-
				D4	-	-	-	-	-	-
				D5	-	-	-	-	-	-
				D6	-	-	-	-	-	-
				D7	-	-	-	-	-	-
				D8	-	-	-	-	-	-
				D9	-	-	-	-	-	-
MP _{env_79} 350 g/m ² 0,8 MPa CAT = 5 min 24 meses	L1 – 289 L2 – 258 L3 – 317 L4 – 328 L5 – 295 L6 – 342	14,4 13,4 13,9 13,7 13,9 14,8	698 634 590 594 614 715	D1	-	-	-	-	-	-
				D2	-	-	-	-	-	-
				D3	-	-	-	-	-	-
				D4	-	-	-	-	-	-
				D5	-	-	-	-	-	-
				D6	-	-	-	-	-	-
				D7	-	-	-	-	-	-
				D8	-	-	-	-	-	-
				D9	-	-	-	-	-	-
MP _{env_80} 350 g/m ² 0,8 MPa CAT = 22 min 4 meses	L1 – 241 L2 – 302 L3 – 270 L4 – 221 L5 – 291 L6 – 226	14,5 14,4 14,1 14,1 13,3 14,4	676 627 580 586 624 676	D1	620	0,0	0,2	1,2	0,8	2,9
				D2	628	0,3	0,6	3,1	0,6	3,2
				D3	623	0,7	1,1	3,9	1,1	4,0
				D4	635	0,7	0,9	4,7	1,0	5,2
				D5	630	1,9	1,5	4,4	1,7	4,5
				D6	629	0,3	0,5	1,5	0,9	1,5
				D7	634	1,1	2,5	4,9	2,5	5,1
				D8	625	0,2	0,9	1,8	0,9	1,8
				D9	628	0,2	0,7	1,9	1,9	7,8

Quadro D.2 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PRF-1 - MP_{env} (continuação)

Elemento	Lamela	Teor de água (%)	Massa volúmica (kg/m ³)	Provete	Massa volúmica (kg/m ³)	Delaminação inicial (%)	2° Ciclo		3° Ciclo	
							total (%)	máximo (%)	total (%)	máximo (%)
MP _{env_81} 350 g/m ² 0,8 MPa CAT = 20 min 36 meses Solução aquosa	L1 – 261	13,6	692	D1	-	-	-	-	-	-
				D2	-	-	-	-	-	-
				D3	-	-	-	-	-	-
	L2 – 260	14,0	638	D4	-	-	-	-	-	-
				D5	-	-	-	-	-	-
				D6	-	-	-	-	-	-
	L3 – 299	15,6	577	D7	-	-	-	-	-	-
				D8	-	-	-	-	-	-
				D9	-	-	-	-	-	-
MP _{env_84} 350 g/m ² 0,8 MPa CAT = 22 min 36 meses Solução solvente	L1 – 233	14,1	707	D1	-	-	-	-	-	-
				D2	-	-	-	-	-	-
				D3	-	-	-	-	-	-
	L2 – 249	13,9	634	D4	-	-	-	-	-	-
				D5	-	-	-	-	-	-
				D6	-	-	-	-	-	-
	L3 – 230	13,6	579	D7	-	-	-	-	-	-
				D8	-	-	-	-	-	-
				D9	-	-	-	-	-	-
MP _{env_85} 350 g/m ² 0,8 MPa CAT = 5 min 6 meses	L1 – 244	14,6	684	D1	630	0,0	0,7	1,8	0,7	1,8
				D2	646	0,0	1,1	5,3	1,2	6,0
				D3	629	0,3	0,0	0,0	0,3	1,7
	L2 – 237	14,3	648	D4	632	0,2	0,5	1,8	0,6	2,0
				D5	631	0,0	0,3	1,3	0,3	1,3
				D6	661	0,0	0,4	1,8	0,4	1,8
	L3 – 245	14,0	569	D7	636	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
				D8	634	0,0	0,3	1,3	0,3	1,3
				D9	646	0,0	0,8	2,5	1,0	2,7
MP _{env_88} 350 g/m ² 0,8 MPa CAT = 22 min 9 meses	L1 – 175,2	14,7	693	D1	618	0,3	1,7	8,3	2,0	8,5
				D2	642	0,5	1,6	5,1	2,6	5,1
				D3	624	0,0	1,4	4,8	2,7	9,4
	L2 – 198,2	14,8	621	D4	624	0,3	2,1	5,6	2,6	7,8
				D5	632	0,3	0,0	0,0	1,1	3,8
				D6	662	0,1	1,0	3,9	1,0	3,8
	L3 – 250	13,5	564	D7	636	0,0	2,0	9,8	4,0	14,5
				D8	630	0,2	0,8	3,8	1,1	5,7
				D9	630	0,0	1,0	3,3	1,6	4,8
L4 – 256	13,3	553								
L5 – 198,1	14,8	630								
L6 – 175,1	14,7	706								

Quadro D.3 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PRF-1 - MP_{env} (continuação)

Elemento	Lamela	Teor de água (%)	Massa volúmica (kg/m ³)	Provete	Massa volúmica (kg/m ³)	Delaminação inicial (%)	2° Ciclo		3° Ciclo	
							total (%)	máximo (%)	total (%)	máximo (%)
MP _{env_89} 350 g/m ² 0,8 MPa CAT = 5 min 18 meses	L1 – 201,2	14,9	657	D1	640	3,8	1,0	3,1	1,5	3,9
	L2 – 155,1	15,9	655	D2	640	3,4	2,0	5,7	2,3	7,2
	L3 – 155,2	15,9	600	D3	646	2,9	0,4	1,7	0,6	2,8
	L4 – 272	13,4	594	D4	650	3,8	0,3	1,3	1,9	4,3
	L5 – 222	14,9	605	D5	632	3,2	0,9	2,2	1,4	3,2
	L6 – 201,1	14,9	714	D6	658	2,8	0,3	1,3	1,3	3,7
				D7	628	3,2	0,6	2,4	0,6	2,5
				D8	658	5,8	2,4	8,4	3,1	10,1
				D9	633	4,7	2,0	6,5	3,5	9,2

Quadro D.4 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PRF-3 - MP_{env}

Elemento	Lamela	Teor de água (%)	Massa volúmica (kg/m ³)	Provete	Massa volúmica (kg/m ³)	Delaminação inicial (%)	2° Ciclo		3° Ciclo	
							total (%)	máximo (%)	total (%)	máximo (%)
MP _{env_74} 450 g/m ² 0,8 MPa CAT = 20 min 18 meses	L1 – 354	15,4	686	D1	652	2,3	2,7	11,5	3,2	11,6
	L2 – 346	14,2	657	D2	653	3,9	0,9	2,2	0,9	2,3
	L3 – 310	13,9	573	D3	633	4,4	3,0	9,8	3,2	10,3
	L4 – 330	13,5	573	D4	633	6,3	1,1	3,5	1,3	3,5
	L5 – 327	14,7	587	D5	642	2,1	0,3	1,3	1,4	4,9
	L6 – 323	14,5	757	D6	648	2,1	0,4	1,8	0,7	2,3
				D7	651	1,5	0,0	0,0	0,0	0,0
				D8	630	1,2	0,9	3,2	1,5	3,6
				D9	624	1,7	0,6	2,9	0,9	3,3
MP _{env_75} 450 g/m ² 0,8 MPa CAT = 5 min 36 meses Solução solvente	L1 – 329	14,9	690	D1	-	-	-	-	-	-
	L2 – 345	14,6	641	D2	-	-	-	-	-	-
	L3 – 335	13,5	596	D3	-	-	-	-	-	-
	L4 – 322	14,8	564	D4	-	-	-	-	-	-
	L5 – 313	13,6	621	D5	-	-	-	-	-	-
	L6 – 321	14,2	727	D6	-	-	-	-	-	-
				D7	-	-	-	-	-	-
				D8	-	-	-	-	-	-
				D9	-	-	-	-	-	-

Quadro D.5 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PRF-3 - MP_{env} (continuação)

Elemento	Lamela	Teor de água (%)	Massa volúmica (kg/m ³)	Provete	Massa volúmica (kg/m ³)	Delaminação inicial (%)	2 nd Cycle		3 rd Cycle	
							total (%)	maximum (%)	total (%)	maximum (%)
MP _{env_82} 450 g/m ² 0,8 MPa CAT = 20 min 36 meses Imunizador	L1 – 307 L2 – 296 L3 – 275 L4 – 326 L5 – 306 L6 – 293	15,2 13,8 12,9 13,7 14,1 14,1	740 606 537 530 593 771	D1	-	-	-	-	-	-
				D2	-	-	-	-	-	-
				D3	-	-	-	-	-	-
				D4	-	-	-	-	-	-
				D5	-	-	-	-	-	-
				D6	-	-	-	-	-	-
				D7	-	-	-	-	-	-
				D8	-	-	-	-	-	-
				D9	-	-	-	-	-	-
MP _{env_83} 450 g/m ² 0,8 MPa CAT = 5 min 24 meses	L1 – 278 L2 – 236 L3 – 269 L4 – 267 L5 – 242 L6 – 223	15,1 14,2 13,8 13,6 14,1 14,5	718 600 564 537 603 730	D1	-	-	-	-	-	-
				D2	-	-	-	-	-	-
				D3	-	-	-	-	-	-
				D4	-	-	-	-	-	-
				D5	-	-	-	-	-	-
				D6	-	-	-	-	-	-
				D7	-	-	-	-	-	-
				D8	-	-	-	-	-	-
				D9	-	-	-	-	-	-
MP _{env_86} 450 g/m ² 0,8 MPa CAT = 19 min 6 meses	L1 – 231 L2 – 234 L3 – 246 L4 – 239 L5 – 265 L6 – 251	13,8 13,6 13,5 13,5 14,5 14,6	672 660 586 587 655 676	D1	650	2,9	1,2	4,8	1,6	5,3
				D2	641	2,4	3,3	8,0	4,3	8,1
				D3	633	2,7	2,6	4,6	2,7	4,9
				D4	644	1,6	0,7	2,4	1,1	2,6
				D5	630	0,5	2,3	8,3	2,5	9,3
				D6	639	0,4	1,8	5,6	1,9	5,6
				D7	638	0,1	0,3	1,4	0,3	1,4
				D8	638	0,8	1,7	8,5	1,7	8,6
				D9	673	0,6	2,1	5,3	2,3	6,3
MP _{env_87} 450 g/m ² 0,8 MPa CAT = 5 min 9 meses	L1 – 213,2 L2 – 279 L3 – 240 L4 – 235 L5 – 294 L6 – 213,1	15,2 15,2 13,4 13,3 14,5 15,2	692 615 589 560 593 744	D1	639	2,2	4,4	17,9	4,9	18,4
				D2	640	2,6	3,7	15,1	4,5	15,6
				D3	655	0,6	0,5	1,8	1,1	1,9
				D4	653	0,6	0,9	4,6	1,1	4,8
				D5	633	0,5	0,4	2,2	0,9	4,0
				D6	634	1,5	1,6	3,7	2,0	4,0
				D7	628	0,5	0,9	4,7	1,0	4,9
				D8	627	0,2	0,6	2,8	0,8	4,1
				D9	624	0,8	1,8	7,7	1,9	8,1

Quadro D.6 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PRF-3 - MP_{env} (continuação)

Elemento	Lamela	Teor de água (%)	Massa volúmica (kg/m ³)	Provete	Massa volúmica (kg/m ³)	Delaminação inicial (%)	2º Ciclo		3º Ciclo		
							total (%)	máximo (%)	total (%)	máximo (%)	
MP _{env_90} 450 g/m ² 0,8 MPa CAT = 21 min 36 meses Solução aquosa	L1 – 208,1 L2 – 203,1 L3 – 139,2 L4 – 139,1 L5 – 203,2 L6 – 208,2	15,8 15,3 14,6 14,6 15,3 15,8	683 668 595 611 622 719	D1	-	-	-	-	-	-	-
				D2	-	-	-	-	-	-	-
				D3	-	-	-	-	-	-	-
				D4	-	-	-	-	-	-	-
				D5	-	-	-	-	-	-	-
				D6	-	-	-	-	-	-	-
				D7	-	-	-	-	-	-	-
				D8	-	-	-	-	-	-	-
				D9	-	-	-	-	-	-	-
MP _{env_91} 450 g/m ² 0,8 MPa CAT = 5 min 4 meses	L1 – 209,1 L2 – 200,2 L3 – 205,1 L4 – 200,1 L5 – 205,2 L6 – 209,2	14,9 15,2 14,5 15,2 14,5 14,9	696 645 632 586 649 710	D1	654	0,2	1,1	2,4	2,3	4,3	
				D2	652	0,9	1,7	5,2	2,3	5,5	
				D3	654	1,3	1,1	3,3	1,9	4,8	
				D4	653	0,3	2,0	7,1	3,8	9,8	
				D5	654	0,3	1,4	3,4	2,4	5,1	
				D6	658	2,4	4,0	10,0	4,2	7,7	
				D7	671	0,4	1,4	4,3	2,9	8,0	
				D8	650	1,0	1,1	3,7	2,4	6,3	
				D9	658	1,5	3,6	11,5	4,8	17,2	

Quadro D.7 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PUR-1+PR - MP_{env}

Elemento	Lamela	Teor de água (%)	Massa volúmica (kg/m ³)	Provete	Massa volúmica (kg/m ³)	Delaminação inicial (%)	2º Ciclo		3º Ciclo	
							total (%)	máximo (%)	total (%)	máximo (%)
MP _{env_71} 180 g/m ² 0,8 MPa CAT = 5 min 18 meses	L1 – 320 L2 – 348 L3 – 319 L4 – 314 L5 – 341 L6 – 350	14,7 14,2 14,0 14,5 14,2 15,0	685 625 621 578 656 742	D1	644	4,3	1,8	3,6	1,9	3,7
				D2	669	1,1	0,3	1,4	1,9	6,8
				D3	649	3,4	1,6	6,7	1,7	7,0
				D4	645	3,0	1,9	3,5	2,2	4,5
				D5	657	3,1	0,4	1,2	0,9	1,7
				D6	645	2,1	1,7	7,4	2,2	9,7
				D7	649	5,5	0,5	1,3	0,7	2,1
				D8	649	1,9	0,3	1,7	0,4	1,9
				D9	638	0,2	1,3	6,6	1,7	7,0

Quadro D.8 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PUR-1+PR - MP_{env} (continuação)

Elemento	Lamela	Teor de água (%)	Massa volúmica (kg/m ³)	Provete	Massa volúmica (kg/m ³)	Delaminação inicial (%)	2º Ciclo		3º Ciclo	
							total (%)	máximo (%)	total (%)	máximo (%)
MP _{env_72} 180 g/m ² 0,8 MPa CAT = 21 min 24 meses	L1 – 318	14,6	658	D1	-	-	-	-	-	-
	L2 – 349	14,4	646	D2	-	-	-	-	-	-
	L3 – 340	14,7	639	D3	-	-	-	-	-	-
	L4 – 316	15,1	617	D4	-	-	-	-	-	-
	L5 – 347	14,0	637	D5	-	-	-	-	-	-
	L6 – 344	14,6	730	D6	-	-	-	-	-	-
				D7	-	-	-	-	-	-
				D8	-	-	-	-	-	-
				D9	-	-	-	-	-	-
MP _{env_73} 180 g/m ² 0,8 MPa CAT = 5 min 6 meses	L1 – 312	13,6	684	D1	615	0,0	1,2	2,6	1,3	2,9
	L2 – 339	14,4	614	D2	623	0,2	1,2	5,8	1,2	5,8
	L3 – 324	14,5	585	D3	642	0,0	0,2	1,2	0,2	1,2
	L4 – 352	14,4	573	D4	625	0,2	0,3	1,5	0,3	1,5
	L5 – 343	13,7	599	D5	639	0,0	0,6	2,8	0,6	2,8
	L6 – 353	15,6	744	D6	642	0,3	0,6	2,8	0,6	2,8
				D7	633	0,2	0,3	1,3	0,3	1,3
				D8	633	0,2	0,0	0,0	0,3	1,3
				D9	628	0,0	0,6	1,7	0,9	2,4
MP _{env_76} 180 g/m ² 0,8 MPa CAT = 20 min 9 meses	L1 – 300	14,3	715	D1	665	0,3	0,7	2,4	1,5	4,2
	L2 – 284	13,5	639	D2	681	0,5	1,9	6,6	2,6	7,4
	L3 – 334	14,2	606	D3	684	0,7	1,6	4,9	2,1	6,6
	L4 – 337	14,3	602	D4	662	0,4	2,7	6,7	3,4	8,7
	L5 – 288	14,2	638	D5	650	0,3	1,5	4,6	1,6	5,1
	L6 – 286	14,2	733	D6	646	0,0	0,5	2,7	0,6	2,9
				D7	644	0,0	1,5	7,3	1,5	7,6
				D8	640	0,0	0,6	2,8	0,6	2,9
				D9	638	0,0	0,8	4,1	1,1	5,4
MP _{env_77} 180 g/m ² 0,8 MPa CAT = 5 min 4 meses	L1 – 281	14,0	685	D1	617	0,0	4,3	13,3	4,3	13,2
	L2 – 331	13,6	625	D2	615	0,0	3,9	15,6	4,4	17,1
	L3 – 280	14,2	592	D3	619	0,0	2,0	6,9	2,0	6,7
	L4 – 333	13,7	573	D4	612	0,0	0,7	3,7	0,8	3,8
	L5 – 301	14,1	590	D5	615	0,3	1,9	7,1	1,9	7,0
	L6 – 287	13,6	701	D6	624	0,4	1,8	7,5	1,8	7,4
				D7	613	0,0	3,9	17,5	3,9	17,4
				D8	628	0,6	0,6	1,5	0,8	2,4
				D9	614	0,3	1,6	5,2	2,5	8,0

Quadro D.9 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PRF-1 - TMP_{env}

Elemento	Lamela	Teor de água (%)	Massa volúmica (kg/m^3)	Provete	Massa volúmica (kg/m^3)	Delaminação inicial (%)	2° Ciclo		3° Ciclo	
							total (%)	máximo (%)	total (%)	máximo (%)
TMP_{env_23} 350 g/m^2 0,8 MPa CAT = 18 min 9 meses	L1 – 2	13,5	660	D1	643	6,2	3,3	4,6	5,1	11,7
				D2	643	5,5	2,1	7,1	4,1	16,4
	L2 – 80	14,4	653	D3	639	6,0	1,8	6,2	3,0	11,7
				D4	659	5,3	7,0	23,6	7,7	23,8
	L3 – 3	14,2	585	D5	666	3,7	3,9	18,5	5,3	25,5
				D6	649	4,2	4,5	11,6	6,5	19,3
	L4 – 17	14,1	590	D7	652	5,1	0,6	2,5	1,8	3,0
				D8	653	4,5	4,6	18,0	6,4	23,3
	L5 – 9	14,4	611	D9	651	3,7	3,6	13,6	5,8	24,3
TMP_{env_24} 350 g/m^2 0,8 MPa CAT = 5 min 36 meses Solução aquosa	L1 – 59	14,2	709	D1	-	-	-	-	-	-
				D2	-	-	-	-	-	-
	L2 – 40	14,5	663	D3	-	-	-	-	-	-
				D4	-	-	-	-	-	-
	L3 – 128	14,3	620	D5	-	-	-	-	-	-
				D6	-	-	-	-	-	-
	L4 – 37	14,5	597	D7	-	-	-	-	-	-
				D8	-	-	-	-	-	-
	L5 – 27	12,5	680	D9	-	-	-	-	-	-
TMP_{env_27} 350 g/m^2 0,8 MPa CAT = 20 min 24 meses	L1 – 72	14,6	678	D1	-	-	-	-	-	-
				D2	-	-	-	-	-	-
	L2 – 74	14,6	670	D3	-	-	-	-	-	-
				D4	-	-	-	-	-	-
	L3 – 119	13,5	637	D5	-	-	-	-	-	-
				D6	-	-	-	-	-	-
	L4 – 91	13,8	608	D7	-	-	-	-	-	-
				D8	-	-	-	-	-	-
	L5 – 108	14,2	635	D9	-	-	-	-	-	-
L6 – 92	13,5	740								

Quadro D.10 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PRF-1 - TMP_{env} (continuação)

Elemento	Lamela	Teor de água (%)	Massa volúmica (kg/m ³)	Provete	Massa volúmica (kg/m ³)	Delaminação inicial (%)	2º Ciclo		3º Ciclo	
							total (%)	máximo (%)	total (%)	máximo (%)
TMP _{env_28} 350 g/m ² 0,8 MPa CAT = 5 min 18 meses	L1 – 99 L2 – 81 L3 – 134 L4 – 110 L5 – 124 L6 – 62	14,7 14,0 13,6 13,9 13,9 14,3	726 667 661 642 680 729	D1	670	5,5	3,1	5,8	3,8	7,3
				D2	688	7,0	1,6	5,2	3,4	10,2
				D3	679	11,6	2,7	6,5	3,7	9,0
				D4	682	9,4	5,9	10,2	7,7	15,4
				D5	685	8,6	5,8	14,2	7,4	16,0
				D6	688	9,9	3,6	12,7	5,4	19,5
				D7	689	13,3	9,7	24,1	12,3	26,7
				D8	694	14,2	8,9	26,7	9,0	23,6
				D9	689	8,3	7,3	22,0	10,5	31,0
TMP _{env_39} 350 g/m ² 0,8 MPa CAT = 18 min 36 meses Sem proteção	L1 – 136,1 L2 – 150,1 L3 – 162,1 L4 – 168,1 L5 – 170,1 L6 – 155,1	14,9 15,2 14,6 14,6 16,3 13,9	695 649 613 602 615 774	D1	-	-	-	-	-	-
				D2	-	-	-	-	-	-
				D3	-	-	-	-	-	-
				D4	-	-	-	-	-	-
				D5	-	-	-	-	-	-
				D6	-	-	-	-	-	-
				D7	-	-	-	-	-	-
				D8	-	-	-	-	-	-
				D9	-	-	-	-	-	-
TMP _{env_40} 350 g/m ² 0,8 MPa CAT = 5 min 4 meses	L1 – 162,2 L2 – 155,2 L3 – 170,2 L4 – 150,2 L5 – 136,2 L6 – 168,2	14,6 13,9 16,3 15,2 14,9 14,6	620 676 644 627 639 701	D1	644	3,7	9,8	15,9	12,1	17,6
				D2	650	6,0	9,0	19,0	9,7	20,7
				D3	648	6,9	7,4	17,0	8,4	20,2
				D4	650	5,3	8,4	15,3	9,1	17,5
				D5	644	4,3	6,1	15,5	7,3	15,5
				D6	650	5,5	5,6	11,4	6,5	14,3
				D7	646	5,4	5,1	10,7	5,7	13,1
				D8	640	4,8	5,3	12,9	6,1	13,4
				D9	662	6,3	5,9	20,2	6,2	23,2
TMP _{env_43} 350 g/m ² 0,8 MPa CAT = 5 min 6 meses	L1 – 137,2 L2 – 174,2 L3 – 144,2 L4 – 156,2 L5 – 171,2 L6 – 175,2	13,5 14,9 15,2 15,0 15,7 15,3	685 612 601 601 642 687	D1	641	2,0	3,7	11,3	4,2	13,0
				D2	665	4,9	2,7	6,4	3,2	6,7
				D3	637	7,1	4,8	16,2	5,3	18,8
				D4	642	8,3	8,2	20,7	8,7	20,8
				D5	640	6,5	2,6	6,1	2,6	6,2
				D6	644	6,8	6,0	12,1	6,4	13,9
				D7	630	6,7	5,5	13,9	4,2	8,5
				D8	619	5,7	4,9	14,7	5,4	16,5
				D9	633	6,3	5,8	14,0	6,3	16,7

Quadro D.11 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PRF-3 adhesive - TMP_{env}

Elemento	Lamela	Teor de água (%)	Massa volúmica (kg/m ³)	Provete	Massa volúmica (kg/m ³)	Delaminação inicial (%)	2° Ciclo		3° Ciclo		
							total (%)	máximo (%)	total (%)	máximo (%)	
TMP _{env_21} 450 g/m ² 0,8 MPa CAT = 18 min 36 meses Sem proteção	L1 – 111 L2 – 49 L3 – 122 L4 – 57 L5 – 24 L6 – 116	14,5 15,2 14,5 14,8 15,0 14,8	683 681 578 606 651 704	D1	-	-	-	-	-	-	-
				D2	-	-	-	-	-	-	-
				D3	-	-	-	-	-	-	-
				D4	-	-	-	-	-	-	-
				D5	-	-	-	-	-	-	-
				D6	-	-	-	-	-	-	-
				D7	-	-	-	-	-	-	-
				D8	-	-	-	-	-	-	-
				D9	-	-	-	-	-	-	-
TMP _{env_22} 450 g/m ² 0,8 MPa CAT = 5 min 24 meses	L1 – 121 L2 – 125 L3 – 22 L4 – 78 L5 – 68 L6 – 30	14,7 15,2 15,1 15,1 15,6 14,2	709 642 583 607 625 719	D1	-	-	-	-	-	-	-
				D2	-	-	-	-	-	-	-
				D3	-	-	-	-	-	-	-
				D4	-	-	-	-	-	-	-
				D5	-	-	-	-	-	-	-
				D6	-	-	-	-	-	-	-
				D7	-	-	-	-	-	-	-
				D8	-	-	-	-	-	-	-
				D9	-	-	-	-	-	-	-
TMP _{env_25} 450 g/m ² 0,8 MPa CAT = 16 min 4 meses	L1 – 11 L2 – 79 L3 – 1 L4 – 35 L5 – 41 L6 – 58	13,8 14,3 13,4 14,3 14,2 14,1	662 637 606 592 645 790	D1	655	0,2	6,4	20,6	7,9	22,6	
				D2	653	1,4	2,4	4,9	4,1	8,7	
				D3	650	0,0	7,6	22,9	8,5	25,5	
				D4	653	0,7	1,9	5,0	3,1	9,7	
				D5	671	0,2	4,9	11,6	5,8	14,6	
				D6	652	0,8	3,8	13,0	5,6	17,9	
				D7	661	0,3	1,2	4,5	2,9	8,1	
				D8	650	0,0	3,2	8,1	3,6	10,2	
				D9	640	0,5	4,0	5,6	4,3	6,8	
TMP _{env_26} 450 g/m ² 0,8 MPa CAT = 5 min 6 meses	L1 – 46 L2 – 5 L3 – 18 L4 – 26 L5 – 32 L6 – 52	14,5 13,9 14,2 14,6 14,2 13,3	657 627 619 605 612 798	D1	648	1,8	5,7	15,0	7,1	14,9	
				D2	645	2,4	2,5	6,9	3,6	10,7	
				D3	651	5,3	6,6	11,7	7,3	14,4	
				D4	668	2,2	8,5	21,0	9,6	24,3	
				D5	661	0,6	2,6	10,9	4,6	20,4	
				D6	660	0,5	0,3	1,7	1,3	6,4	
				D7	660	2,2	4,5	11,6	6,9	15,4	
				D8	656	2,2	2,1	5,6	3,6	6,8	
				D9	658	1,2	4,1	10,9	6,3	16,1	

Quadro D.12 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PRF-3 - TMP_{env} (continuação)

Elemento	Lamela	Teor de água (%)	Massa volúmica (kg/m ³)	Provete	Massa volúmica (kg/m ³)	Delaminação inicial (%)	2° Ciclo		3° Ciclo		
							total (%)	máximo (%)	total (%)	máximo (%)	
TMP _{env_31} 450 g/m ² 0,8 MPa CAT = 19 min 36 meses Solução aquosa	L1 – 102 L2 – 131 L3 – 107 L4 – 115 L5 – 101 L6 – 127	14,6 14,4 13,9 14,2 14,2 14,2	665 648 643 589 638 728	D1	-	-	-	-	-	-	-
				D2	-	-	-	-	-	-	-
				D3	-	-	-	-	-	-	-
				D4	-	-	-	-	-	-	-
				D5	-	-	-	-	-	-	-
				D6	-	-	-	-	-	-	-
				D7	-	-	-	-	-	-	-
				D8	-	-	-	-	-	-	-
				D9	-	-	-	-	-	-	-
TMP _{env_32} 450 g/m ² 0,8 MPa CAT = 5 min 18 meses	L1 – 97 L2 – 109 L3 – 48 L4 – 96 L5 – 100 L6 – 123	14,8 14,1 13,9 14,4 14,5 16,0	754 642 609 597 709 765	D1	664	2,0	6,8	22,3	8,9	30,3	
				D2	685	2,5	7,4	26,6	7,9	28,4	
				D3	63	1,6	5,2	17,4	7,3	21,8	
				D4	675	2,1	4,5	18,8	6,1	23,7	
				D5	681	2,9	3,0	15,1	4,2	20,8	
				D6	683	2,2	1,3	3,2	2,4	6,8	
				D7	682	1,1	2,4	7,8	2,4	7,8	
				D8	678	1,5	2,2	6,2	4,1	9,3	
				D9	682	1,7	3,8	12,3	4,8	12,9	
TMP _{env_42} 450 g/m ² 0,8 MPa CAT = 21 min 9 meses	L1 – 137,1 L2 – 174,1 L3 – 175,1 L4 – 156,1 L5 – 171,1 L6 – 144,1	13,5 14,9 15,3 15,0 15,7 15,2	664 660 632 624 635 697	D1	646	3,2	3,1	9,3	3,7	10,5	
				D2	649	3,8	3,0	5,5	3,6	5,4	
				D3	651	5,6	7,1	25,0	7,9	24,8	
				D4	656	4,2	6,8	14,7	8,0	14,8	
				D5	666	4,2	5,0	11,0	7,4	13,5	
				D6	659	7,7	6,5	13,6	7,3	14,1	
				D7	649	5,7	2,7	5,4	4,4	12,0	
				D8	664	5,7	4,9	9,7	5,8	10,8	
				D9	646	6,3	12,2	28,0	12,6	29,5	

Quadro D.13 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PUR-1+PR - TMP_{env}

Elemento	Lamela	Teor de água (%)	Massa volúmica (kg/m ³)	Provete	Massa volúmica (kg/m ³)	Delaminação inicial (%)	2º Ciclo		3º Ciclo	
							total (%)	máximo (%)	total (%)	máximo (%)
TMP _{env_29} 180 g/m ² 0,8 MPa CAT = 18 min 24 meses	L1 – 94	14,7	683	D1	-	-	-	-	-	-
	L2 – 120	14,3	613	D2	-	-	-	-	-	-
	L3 – 90	14,0	574	D3	-	-	-	-	-	-
	L4 – 98	14,0	575	D4	-	-	-	-	-	-
	L5 – 113	14,2	596	D5	-	-	-	-	-	-
	L6 – 87	14,6	717	D6	-	-	-	-	-	-
				D7	-	-	-	-	-	-
				D8	-	-	-	-	-	-
				D9	-	-	-	-	-	-
TMP _{env_30} 180 g/m ² 0,8 MPa CAT = 5 min 18 meses	L1 – 86	14,7	721	D1	652	6,9	5,9	16,0	7,9	21,4
	L2 – 69	14,3	669	D2	662	8,4	6,8	20,1	8,9	24,9
	L3 – 82	14,8	569	D3	664	10,4	4,4	9,8	6,5	17,9
	L4 – 61	14,4	551	D4	677	6,4	2,7	6,1	3,8	8,2
	L5 – 117	14,3	636	D5	657	5,5	1,0	3,5	2,6	10,7
	L6 – 67	13,3	793	D6	653	8,4	3,3	9,3	5,4	18,7
				D7	654	10,3	3,3	10,5	5,9	18,2
				D8	651	9,0	7,6	22,2	9,7	26,7
				D9	655	7,3	3,9	10,3	5,4	11,0
TMP _{env_33} 180 g/m ² 0,8 MPa CAT = 19 min 9 meses	L1 – 163,1	15,3	658	D1	643	2,2	3,9	15,5	5,1	17,3
	L2 – 173,1	15,1	622	D2	655	1,6	3,6	9,8	5,8	15,3
	L3 – 146,1	14,8	613	D3	645	2,7	7,4	16,8	9,8	20,0
	L4 – 140,1	16,3	586	D4	640	3,2	4,9	10,1	7,0	13,9
	L5 – 151,1	14,5	630	D5	633	2,6	4,7	8,3	6,7	10,3
	L6 – 160,1	14,5	667	D6	637	2,6	4,7	12,2	5,7	14,1
				D7	616	2,4	0,6	2,8	1,6	3,2
				D8	608	1,2	2,7	5,4	4,1	6,9
				D9	613	1,0	5,2	9,1	6,1	11,0
TMP _{env_34} 180 g/m ² 0,8 MPa CAT = 5 min 36 meses Sem proteção	L1 – 140,2	16,3	643	D1	-	-	-	-	-	-
	L2 – 151,2	14,5	635	D2	-	-	-	-	-	-
	L3 – 173,2	15,1	606	D3	-	-	-	-	-	-
	L4 – 146,2	14,8	599	D4	-	-	-	-	-	-
	L5 – 160,2	14,5	643	D5	-	-	-	-	-	-
	L6 – 163,2	15,3	655	D6	-	-	-	-	-	-
				D7	-	-	-	-	-	-
				D8	-	-	-	-	-	-
				D9	-	-	-	-	-	-

Quadro D.14 – Sumário de resultados das medições realizadas nas lamelas e ensaios de delaminação nos provetes colados com cola do tipo PUR-1+PR - TMP_{env} (continuação)

Elemento	Lamela	Teor de água (%)	Massa volúmica (kg/m ³)	Provete	Massa volúmica (kg/m ³)	Delaminação inicial (%)	2° Ciclo		3° Ciclo		
							total (%)	máximo (%)	total (%)	máximo (%)	
TMP _{env_35} 180 g/m ² 0,8 MPa CAT = 21 min 36 meses Solução Aquosa	L1 – 142,1 L2 – 148,1 L3 – 161,1 L4 – 152,1 L5 – 166,1 L6 – 145,1	15,3 15,1 15,7 15,6 15,8 14,9	691 638 617 596 632 703	D1	-	-	-	-	-	-	-
				D2	-	-	-	-	-	-	-
				D3	-	-	-	-	-	-	-
				D4	-	-	-	-	-	-	-
				D5	-	-	-	-	-	-	-
				D6	-	-	-	-	-	-	-
				D7	-	-	-	-	-	-	-
				D8	-	-	-	-	-	-	-
				D9	-	-	-	-	-	-	-
TMP _{env_36} 180 g/m ² 0,8 MPa CAT = 5 min 4 meses	L1 – 148,2 L2 – 145,2 L3 – 166,2 L4 – 161,2 L5 – 142,2 L6 – 152,2	15,1 14,9 15,8 15,7 15,3 15,6	605 637 595 591 634 667	D1	639	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
				D2	627	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
				D3	616	0,9	1,9	5,0	2,0	5,0	
				D4	608	0,0	0,4	2,1	0,5	2,4	
				D5	603	1,3	0,7	3,7	1,3	6,5	
				D6	630	0,0	0,3	1,5	0,3	1,5	
				D7	614	0,2	1,1	3,3	1,1	3,4	
				D8	616	0,2	1,4	4,1	1,7	4,5	
				D9	619	0,0	3,6	11,7	4,1	14,4	
TMP _{env_41} 180 g/m ² 0,8 MPa CAT = 20 min 6 meses	L1 – 167,2 L2 – 157,1 L3 – 158,1 L4 – 157,2 L5 – 167,1 L6 – 158,2	15,0 14,9 15,4 14,9 15,0 15,4	644 642 617 579 625 691	D1	645	0,0	0,5	1,2	0,8	1,3	
				D2	640	0,3	3,1	7,2	3,7	8,4	
				D3	651	1,4	2,4	8,7	2,6	9,7	
				D4	645	0,4	2,7	5,4	3,2	6,0	
				D5	652	0,8	0,3	1,7	0,4	1,9	
				D6	635	0,0	2,1	6,1	2,3	6,5	
				D7	626	0,0	1,5	5,1	1,6	5,1	
				D8	637	0,0	0,4	1,8	0,4	1,9	
				D9	618	0,0	1,6	3,4	2,0	4,7	

ANEXO E – Resultados dos ensaios experimentais e correlação entre propriedades das vigas de madeira lamelada colada

Quadro E.1 – Sumário de resultados dos ensaios não destrutivos e de flexão estática das vigas de Choupo (BP)

Viga	$E_{dyn_l_av}$ (MPa)	$E_{dyn_v_92}$ (MPa)	E_{dyn_TSM} (MPa)	E_{dyn_TIMO} (MPa)	E_{m,l_92} (MPa)	E_{m,g_92} (MPa)	f_m (MPa)	ρ (kg/m ³)	W (%)	$E_{12\%}$ (MPa)	f_{m_adj} (MPa)	$\rho_{12\%}$ (kg/m ³)
BP1	10489	10473	12120	12117	17786	12351	62,6	452	14,6	13001	59,2	446
BP2	9380	9536	10516	10519	14270	10842	62,2	427	14,3	11333	58,8	416
BP3	10167	10173	11374	11241	14396	11343	62,8	437	14,7	11962	59,3	435
BP4	9010	9214	9664	9657	11178	9573	36,4	426	14,4	10039	34,4	413
BP5	10674	10709	11829	11775	16409	12106	73,1	457	14,9	12796	69,1	454
BP7	9707	9845	11448	11433	15030	11186	60,1	430	14,3	11701	56,8	411
BP8	10898	11075	9706	9692	11439	9597	49,7	460	14,5	10071	46,9	455
BP9	8305	8337	9098	9069	10035	8610	37,9	386	14,2	8987	35,8	381
BP10	10052	10235	11897	11882	14613	11412	57,6	426	14,7	12027	54,4	417
BP11	10645	10543	11409	11403	12156	10715	57,6	429	13,7	11080	54,4	433
BP12	11106	11110	12090	12059	12768	11263	59,7	454	14,1	11746	56,4	458
BP13	10080	10004	10697	10685	10869	9916	53,9	425	13,7	10254	50,9	428
BP14	8852	9061	9562	9552	9871	8964	44,5	394	13,7	9265	42,1	386
BP15	10502	10722	11226	11195	13863	10225	58,7	460	14,7	10780	55,4	453
BP16	10280	10542	10943	10946	11653	10087	59,4	425	13,4	10362	56,1	426
BP17	9169	9253	9984	9981	9461	8890	46,9	430	14,2	9278	44,3	425
BP18	9181	9324	9756	9755	10331	9566	44,7	397	13,2	9800	42,2	398
BP19	12423	12617	13401	13365	13322	13401	72,4	474	13,2	13733	68,4	478
BP20	9124	9441	10741	10747	13268	10904	61,7	416	13,5	11241	58,3	411
BP21	9165	9415	10726	10687	11906	10738	54,4	404	14,2	11213	51,4	403
BP22	8583	8640	9677	9629	10118	9511	51,4	391	13,6	9811	48,6	388

Quadro E.2 – Sumário de resultados dos ensaios não destrutivos e de flexão estática das vigas de Choupo (MP)

Viga	$E_{dyn_l_av}$ (MPa)	$E_{dyn_v_92}$ (MPa)	E_{dyn_TSM} (MPa)	E_{dyn_TIMO} (MPa)	E_{m,l_92} (MPa)	E_{m,g_92} (MPa)	f_m (MPa)	ρ (kg/m ³)	W (%)	$E_{12\%}$ (MPa)	f_{m_adj} (MPa)	$\rho_{12\%}$ (kg/m ³)
MP1	13011	13804	13725	13678	14917	14553	69,8	633	15,5	15574	65,9	634
MP2	10251	10758	12580	12314	13572	12323	67,0	621	15,2	13105	63,3	612
MP3	10258	10595	11468	11346	11675	10995	43,8	642	15,3	11718	41,4	641
MP4	10646	11247	12713	12705	13863	12743	37,1	641	15,3	13585	35,0	639
MP5	10994	11294	12884	12859	12941	12639	68,0	609	14,8	13356	64,3	610
MP6	11955	12003	13653	13651	14062	13097	65,3	660	14,7	13791	61,7	674
MP7	12444	12983	13536	13452	15050	14056	82,7	665	14,1	14633	78,1	641

Quadro E.3 – Sumário de resultados dos ensaios não destrutivos e de flexão estática das vigas de Choupo (BG)

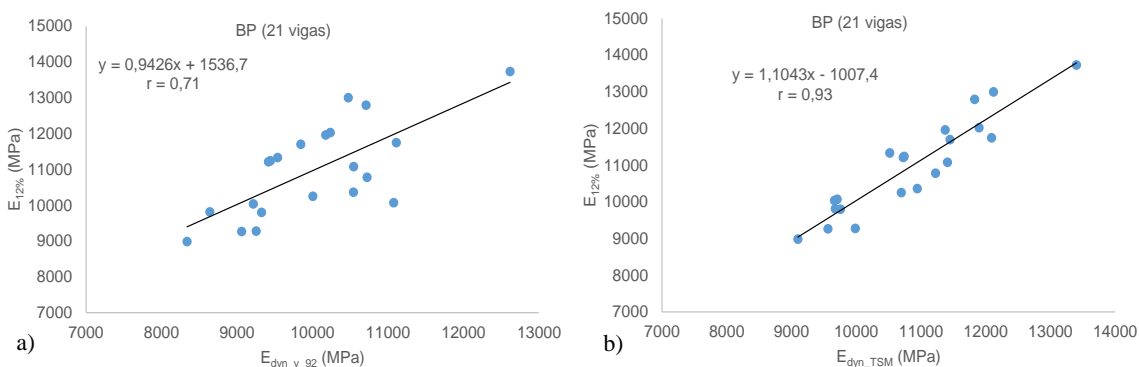
Viga	$E_{dyn_l_av}$ (MPa)	$E_{dyn_v_92}$ (MPa)	E_{dyn_TSM} (MPa)	E_{dyn_TIMO} (MPa)	$E_{m_l_92}$ (MPa)	$E_{m_g_92}$ (MPa)	f_m (MPa)	ρ (kg/m ³)	W (%)	$E_{12\%}$ (MPa)	f_{m_adj} (MPa)	$\rho_{12\%}$ (kg/m ³)
BG1	20840	21545	22593	22592	24577	21885	125,8	978	13,2	22417	118,8	971
BG2	21792	22167	24480	24406	28803	24829	130,7	996	13,0	25310	123,3	997
BG3	23661	24062	24605	24596	28394	24805	131,9	938	13,1	25367	124,0	925
BG4	21085	21400	23044	23013	27132	23332	127,6	980	12,6	23602	119,5	978

Quadro E.4 – Sumário de resultados dos ensaios não destrutivos e de flexão estática das vigas de Choupo (HMPBP)

Viga	$E_{dyn_l_av}$ (MPa)	$E_{dyn_v_92}$ (MPa)	E_{dyn_TSM} (MPa)	E_{dyn_TIMO} (MPa)	$E_{m_l_92}$ (MPa)	$E_{m_g_92}$ (MPa)	f_m (MPa)	ρ (kg/m ³)	W (%)	$E_{12\%}$ (MPa)	f_{m_adj} (MPa)	$\rho_{12\%}$ (kg/m ³)
HMPBP1	10820	11067	12283	12279	18798	12092	53,9	496	15,2	12855	50,9	495
HMPBP2	10474	10845	12993	12962	13404	12747	54,1	504	14,1	13282	51,1	500
HMPBP3	10050	10406	12160	12160	13002	12091	67,1	521	13,9	12553	63,4	503
HMPBP4	12332	12663	13549	13544	14969	13805	74,5	530	14,7	14557	70,4	528
HMPBP5	12345	12413	13071	13061	14551	13481	71,8	579	13,6	13910	67,8	567
HMPBP6	11824	12050	13537	13498	17304	12877	60,5	549	14,9	13613	57,2	549
HMPBP7	12149	12232	13562	13447	16998	13330	64,6	584	14,5	13995	61,0	571

Quadro E.5 – Sumário de resultados dos ensaios não destrutivos e de flexão estática das vigas de Choupo (HBGBP)

Viga	$E_{dyn_l_av}$ (MPa)	$E_{dyn_v_92}$ (MPa)	E_{dyn_TSM} (MPa)	E_{dyn_TIMO} (MPa)	$E_{m_l_92}$ (MPa)	$E_{m_g_92}$ (MPa)	f_m (MPa)	ρ (kg/m ³)	W (%)	$E_{12\%}$ (MPa)	f_{m_adj} (MPa)	$\rho_{12\%}$ (kg/m ³)
HBGBP1	14867	15304	19615	19543	22638	20010	107,0	654	13,6	20663	101,1	649
HBGBP2	14172	14409	18754	18725	29815	18768	88,9	678	12,8	19064	83,9	670
HBGBP3	14231	14438	18934	18902	27835	18601	93,6	657	13,1	19006	88,0	640

Figura E.1 – Correlações simples com o módulo de elasticidade estática ($E_{12\%}$) - 21 vigas BP:a) $E_{dyn_v_92}$; b) E_{dyn_TSM}

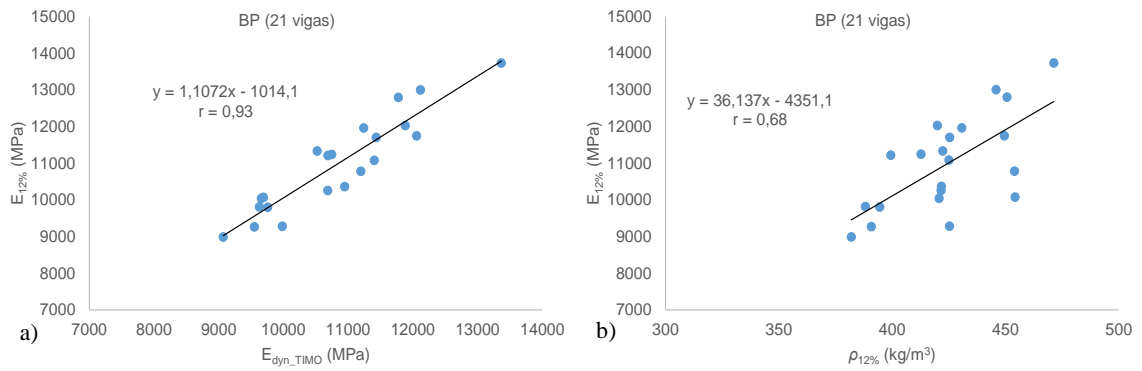


Figura E.2 – Correlações simples com o módulo de elasticidade estático ($E_{12\%}$) - 21 vigas BP:
a) E_{dyn_TIMO} ; b) $\rho_{12\%}$

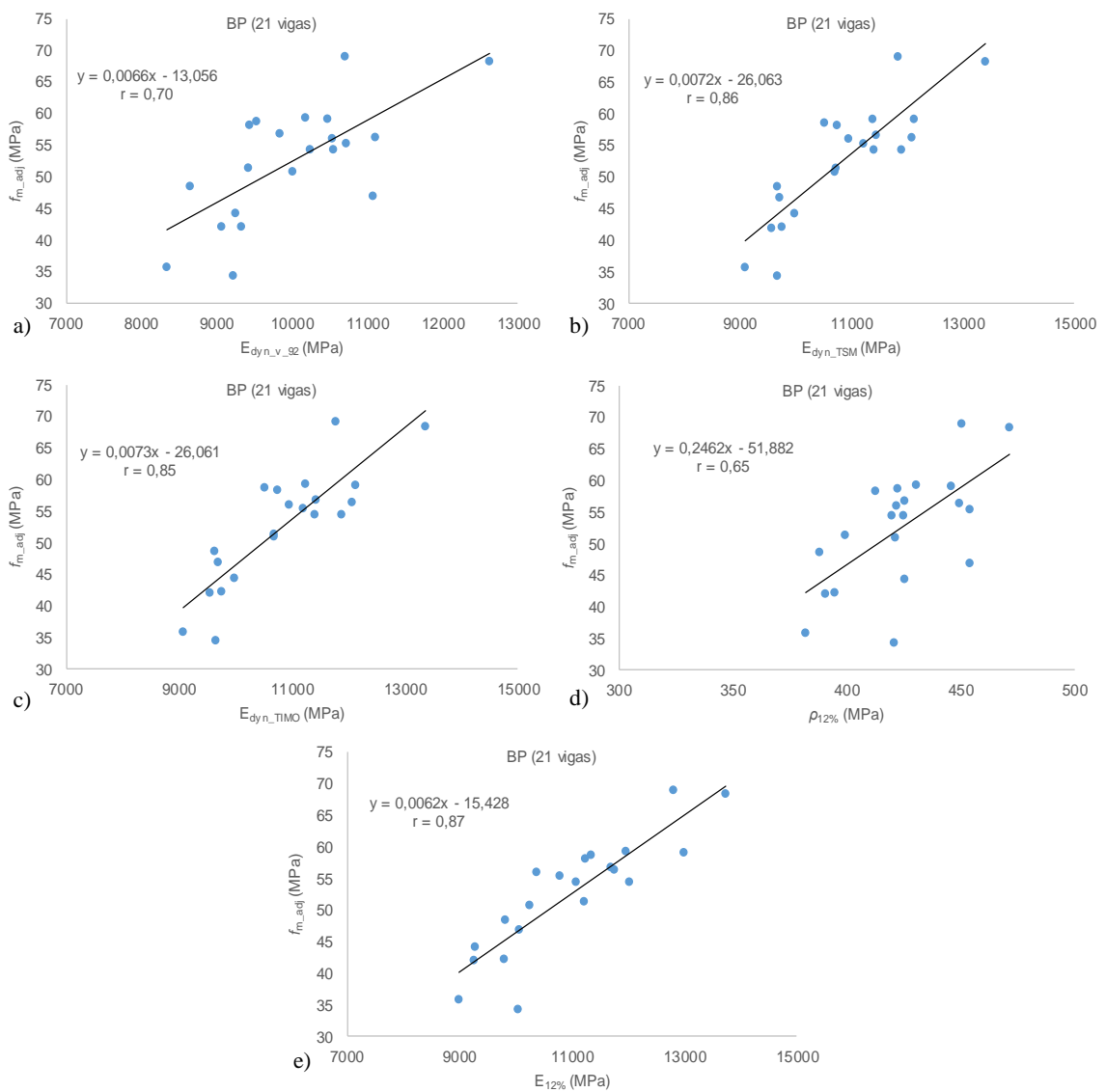


Figura E.3 – Correlações simples com a resistência à flexão (f_{m_adj}) - 21 vigas BP:
a) $E_{dyn_v_92}$; b) E_{dyn_TSM} ; c) E_{dyn_TIMO} ; d) $\rho_{12\%}$; e) $E_{12\%}$

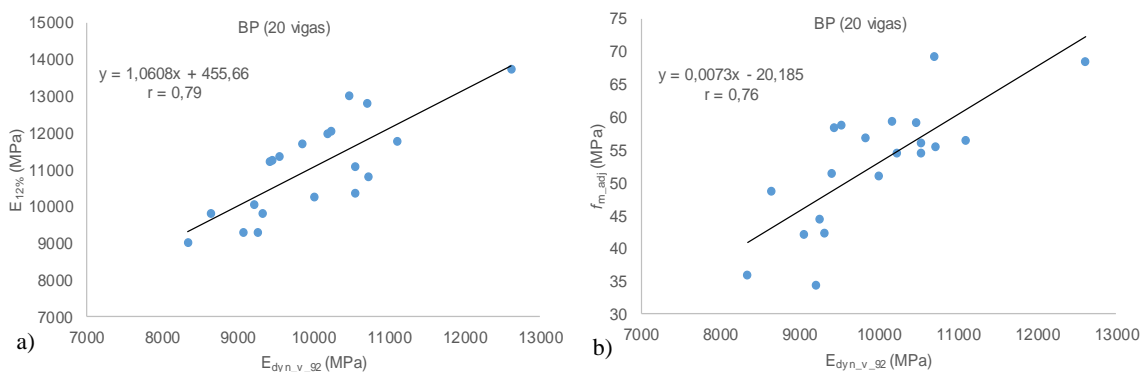


Figura E.4 – Correlações simples - 20 vigas BP: a) $E_{dyn_v_92}$ vs $E_{12\%}$; b) $E_{dyn_v_92}$ vs f_{m_adj}

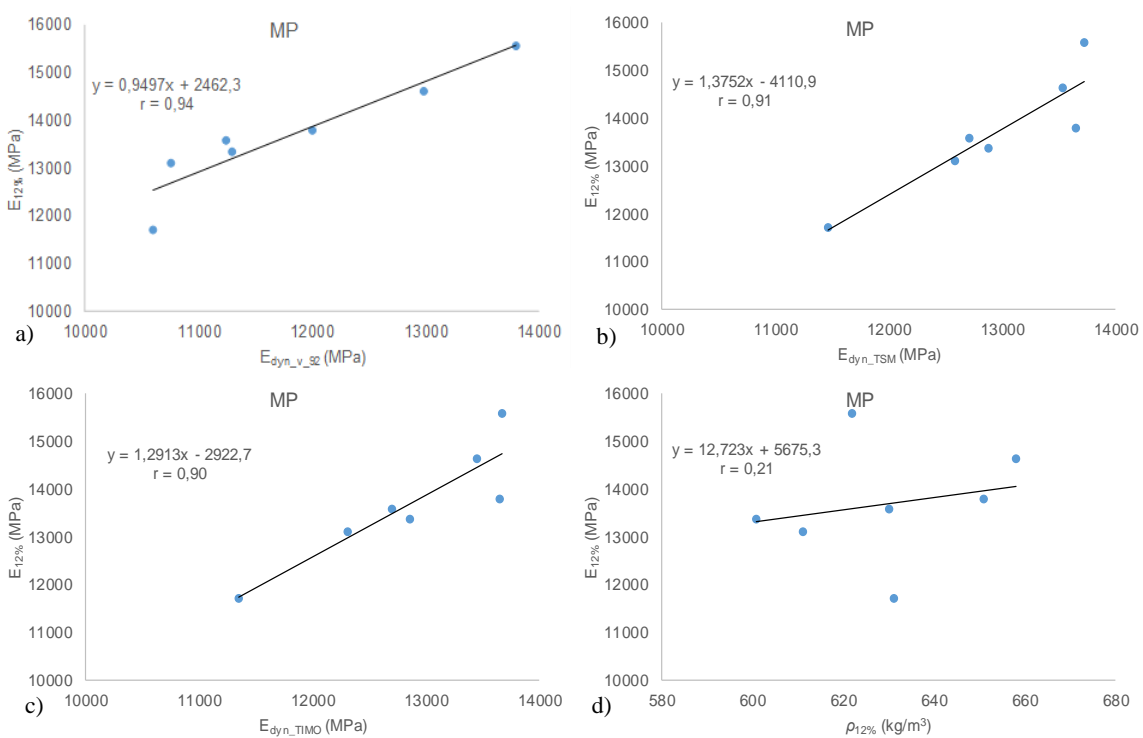


Figura E.5 – Correlações simples com o módulo de elasticidade estático ($E_{12\%}$) - vigas MP:
 a) $E_{dyn_v_92}$; b) E_{dyn_TSM} ; c) E_{dyn_TIMO} ; d) $\rho_{12\%}$

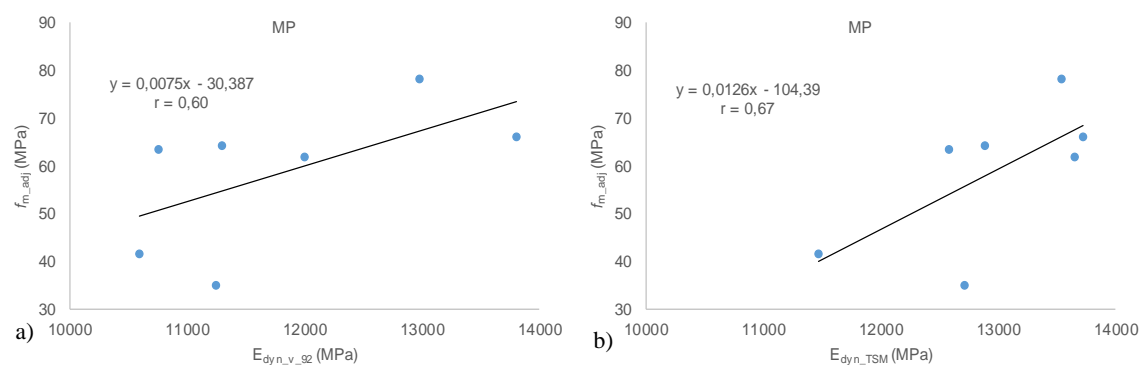


Figura E.6 – Correlações simples com a resistência à flexão (f_{m_adj}) - vigas MP: a) $E_{dyn_v_92}$; b) E_{dyn_TSM}

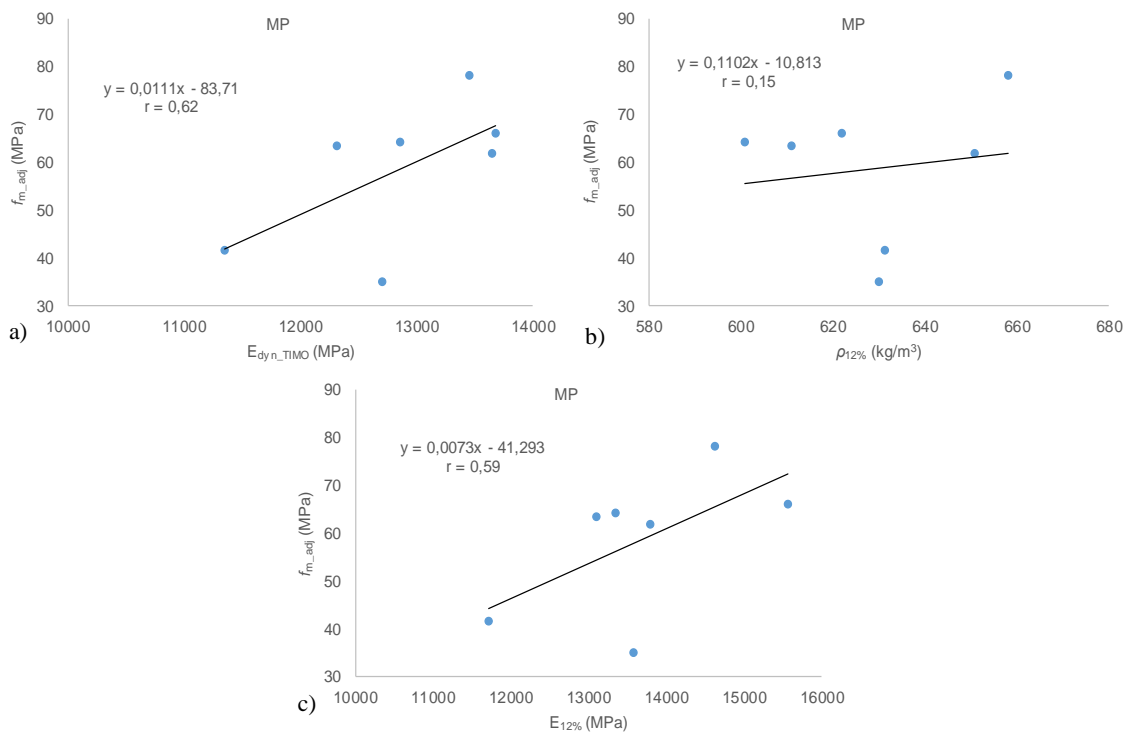


Figura E.7 – Correlações simples com a resistência à flexão (f_{m_adj}) - vigas MP:
a) E_{dyn_TIMO} ; b) $\rho_{12\%}$; c) $E_{12\%}$

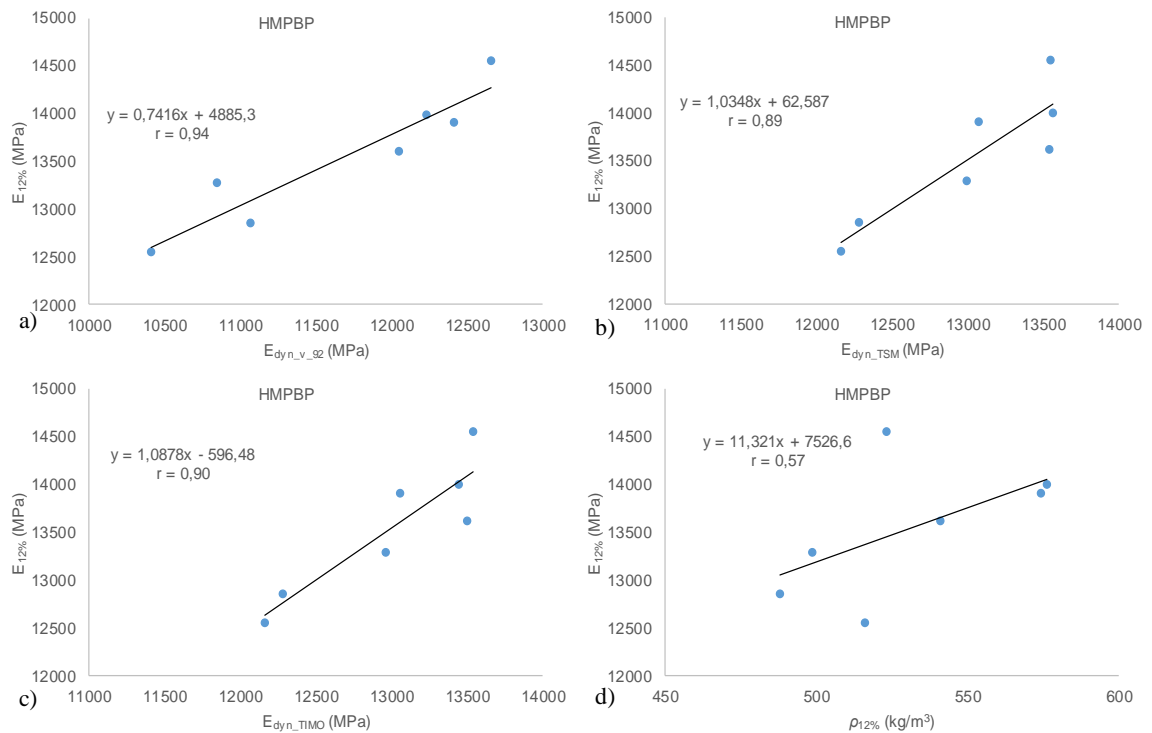


Figura E.8 – Correlações simples com o módulo de elasticidade estático ($E_{12\%}$) - vigas HMPBP:
a) $E_{dyn_v_92}$; b) E_{dyn_TSM} ; c) E_{dyn_TIMO} ; d) $\rho_{12\%}$

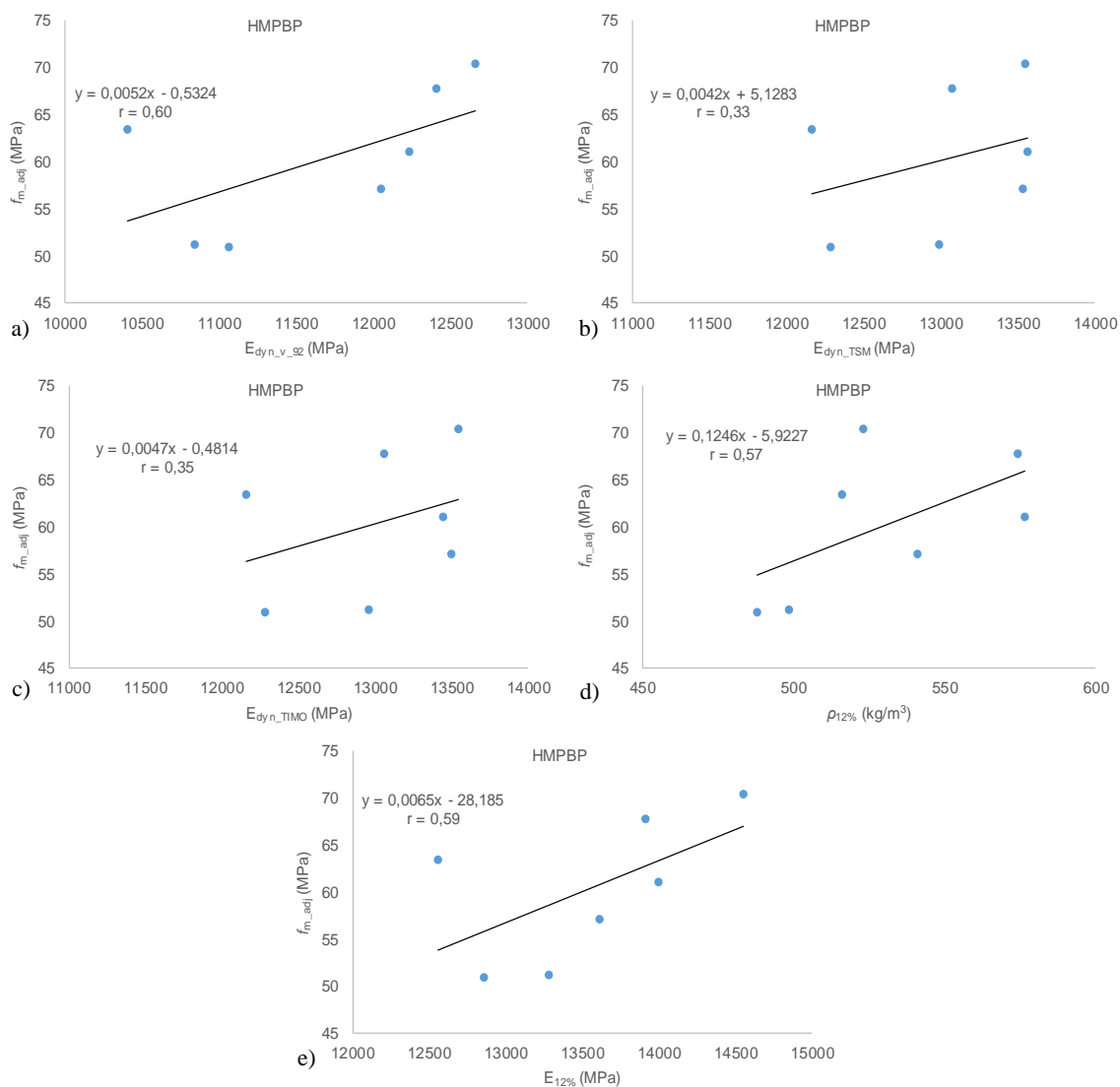


Figura E.9 – Correlações simples com a resistência à flexão (f_{m_adj}) - vigas HMPBP:
 a) $E_{dyn_v_92}$; b) E_{dyn_TSM} ; c) E_{dyn_TIMO} ; d) $\rho_{12\%}$; e) $E_{12\%}$

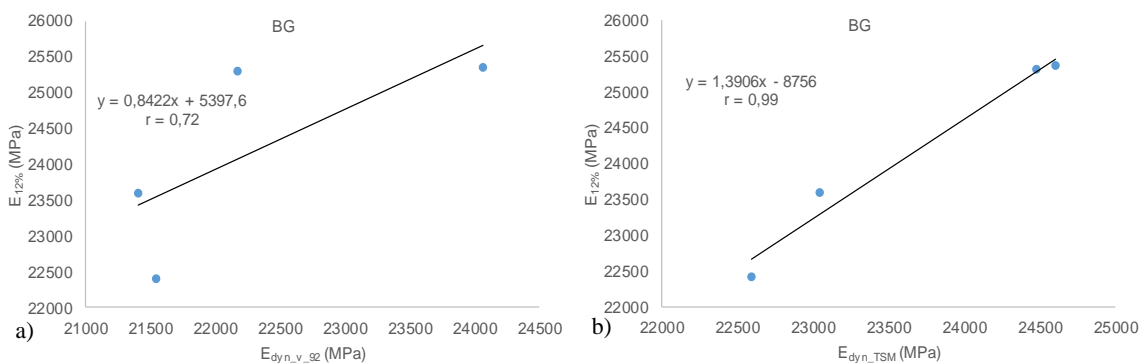


Figura E.10 – Correlações simples com o módulo de elasticidade estático ($E_{12\%}$) - vigas BG:
 a) $E_{dyn_v_92}$; b) E_{dyn_TSM}

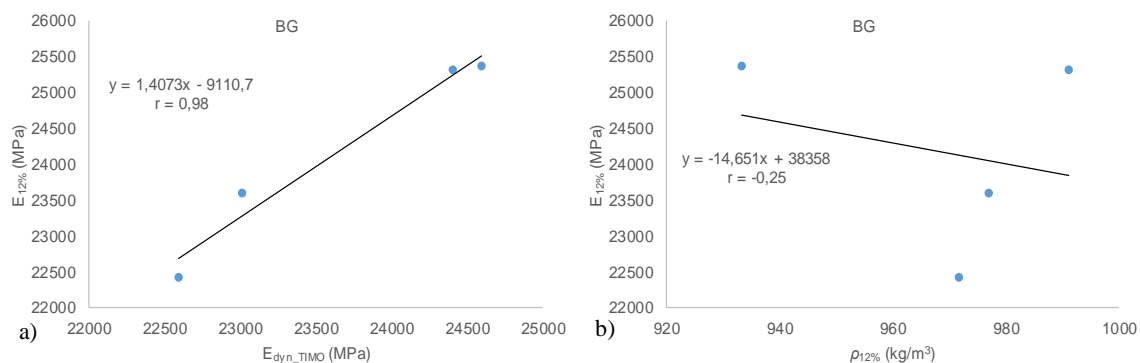


Figura E.11 – Correlações simples com o módulo de elasticidade estático ($E_{12\%}$) - vigas BG:
 a) E_{dyn_TIMO} ; b) $\rho_{12\%}$

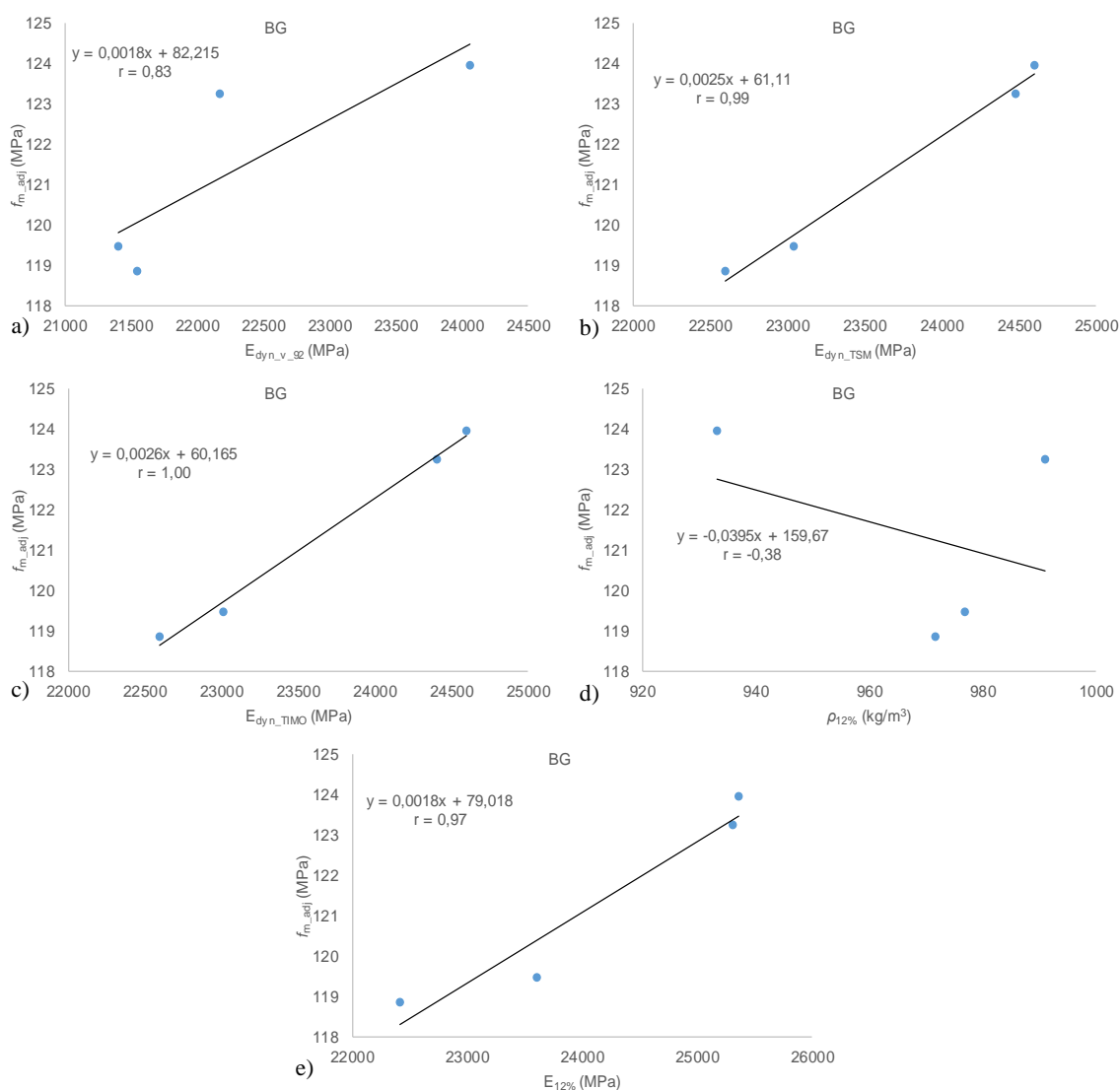


Figura E.12 – Correlações simples com a resistência à flexão (f_{m_adj}) - vigas BG:
 a) $E_{dyn_v_92}$; b) E_{dyn_TSM} ; c) E_{dyn_TIMO} ; d) $\rho_{12\%}$; e) $E_{12\%}$

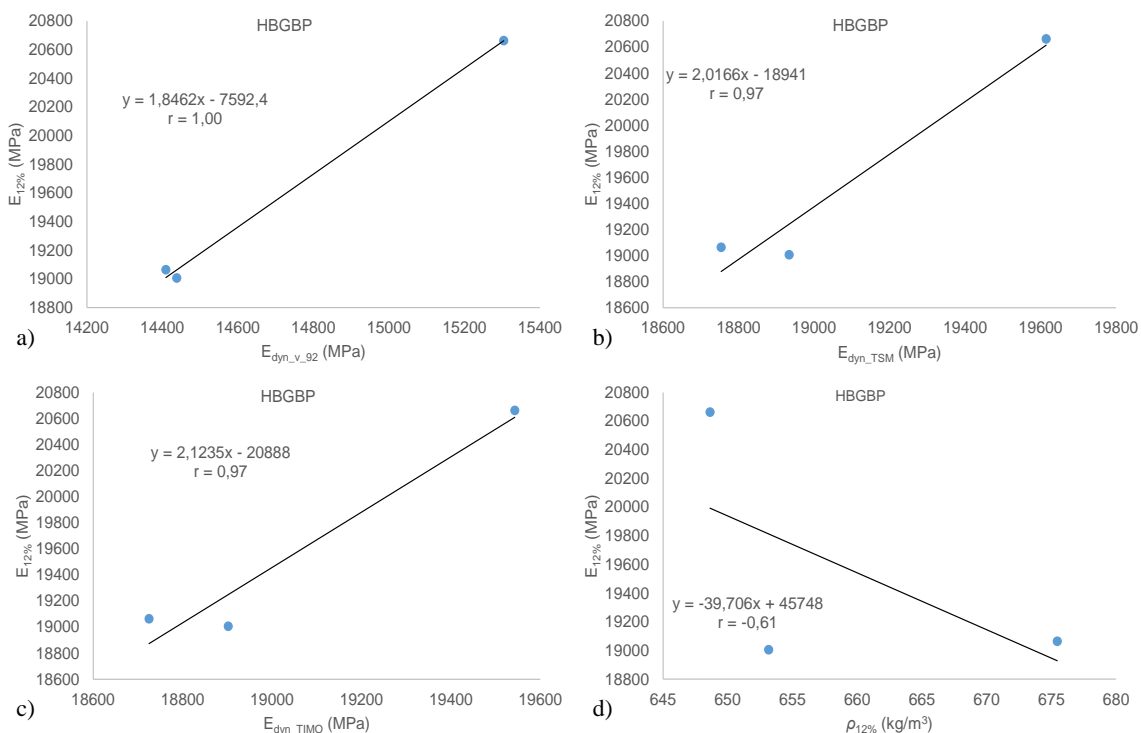


Figura E.13 – Correlações simples com o módulo de elasticidade estático ($E_{12\%}$) - vigas HBGBP:

a) $E_{dyn_v_92}$; b) E_{dyn_TSM} ; c) E_{dyn_TIMO} ; d) $\rho_{12\%}$

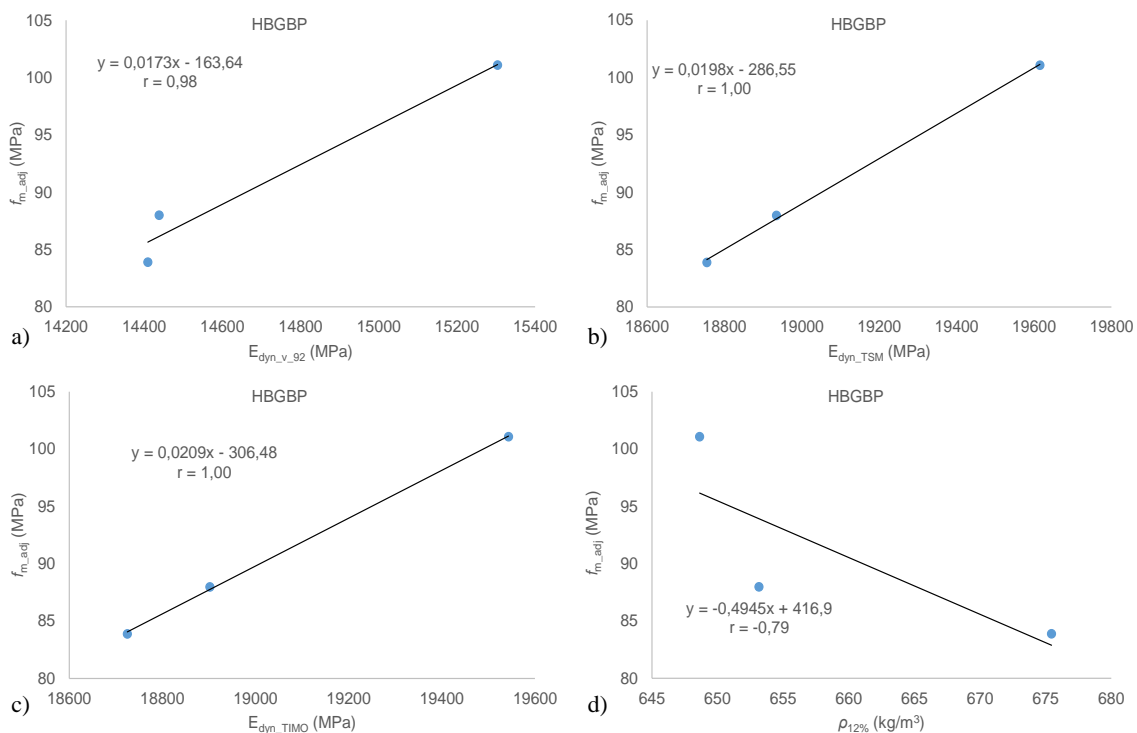
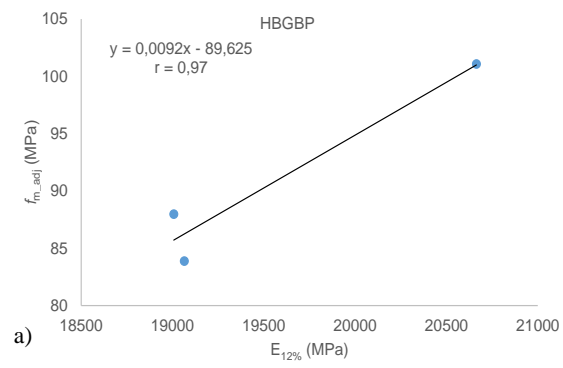


Figura E.14 – Correlações simples com a resistência à flexão ($f_{m,adj}$) - vigas HBGBP:

a) $E_{dyn_v_92}$; b) E_{dyn_TSM} ; c) E_{dyn_TIMO} ; d) $\rho_{12\%}$

Figura E.15 – Correlações simples com a resistência à flexão ($f_{m,adj}$) - vigas HBGBP: a) $E_{12\%}$

ANEXO F – Curvas força vs deslocamento: experimental vs modelo numérico

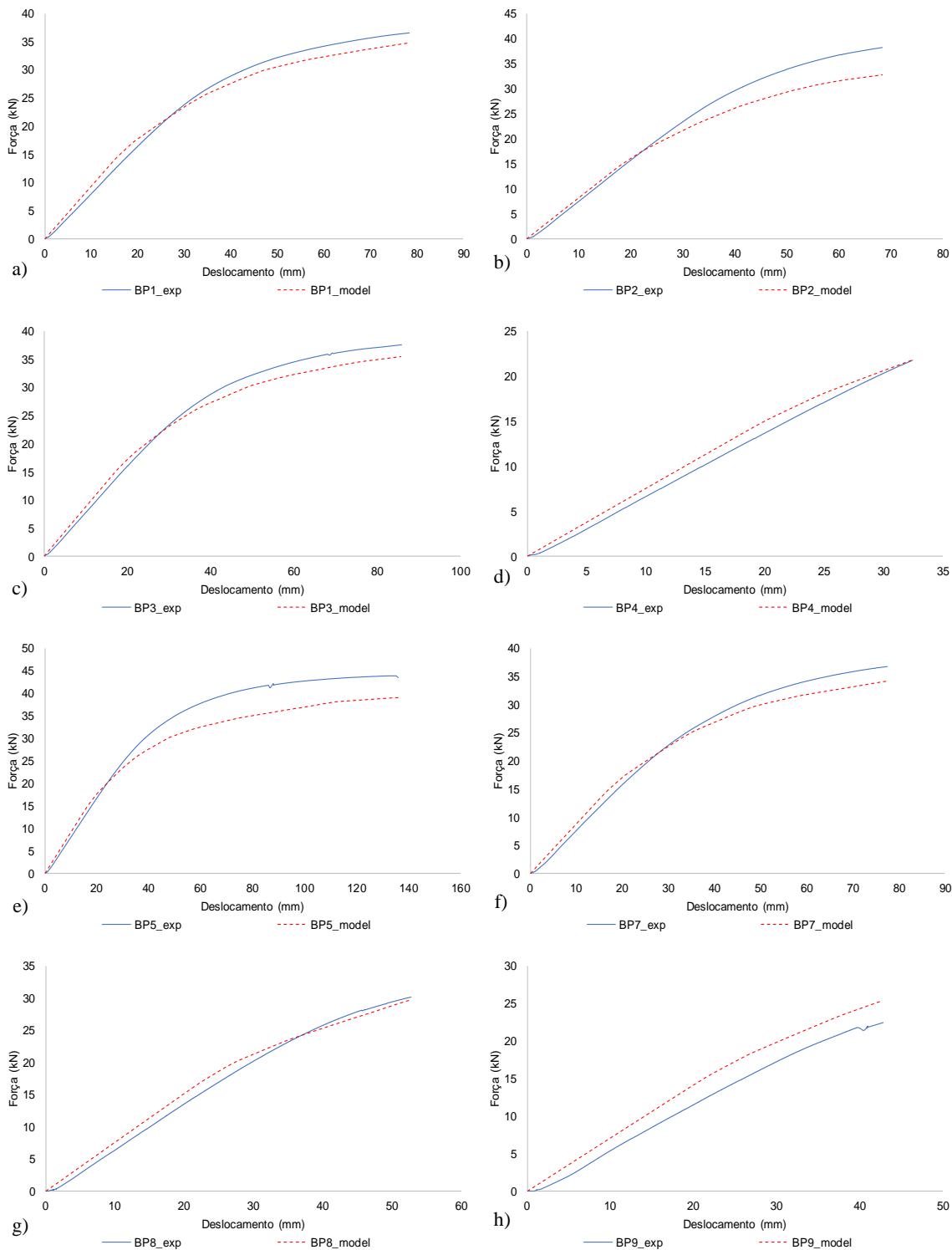


Figura F.1 – Curvas força vs deslocamento obtidas dos ensaios experimentais e do modelo numérico:
 a) BP1; b) BP2; c) BP3; d) BP4; e) BP5; f) BP7; g) BP8; h) BP9

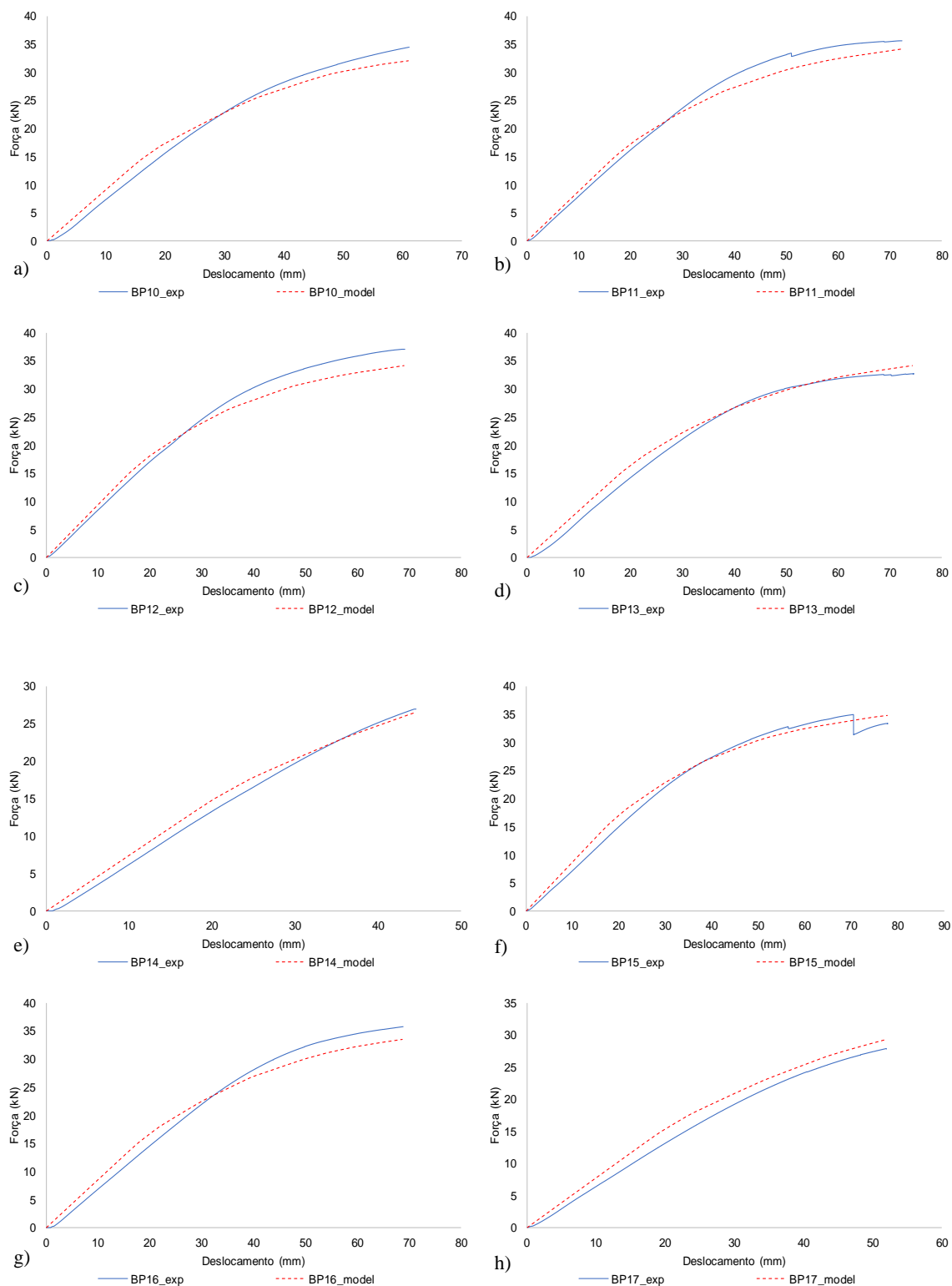


Figura F.2 – Curvas força vs deslocamento obtidas dos ensaios experimentais e do modelo numérico:
a) BP10; b) BP11; c) BP12; d) BP13; e) BP14; f) BP15; g) BP16; h) BP17

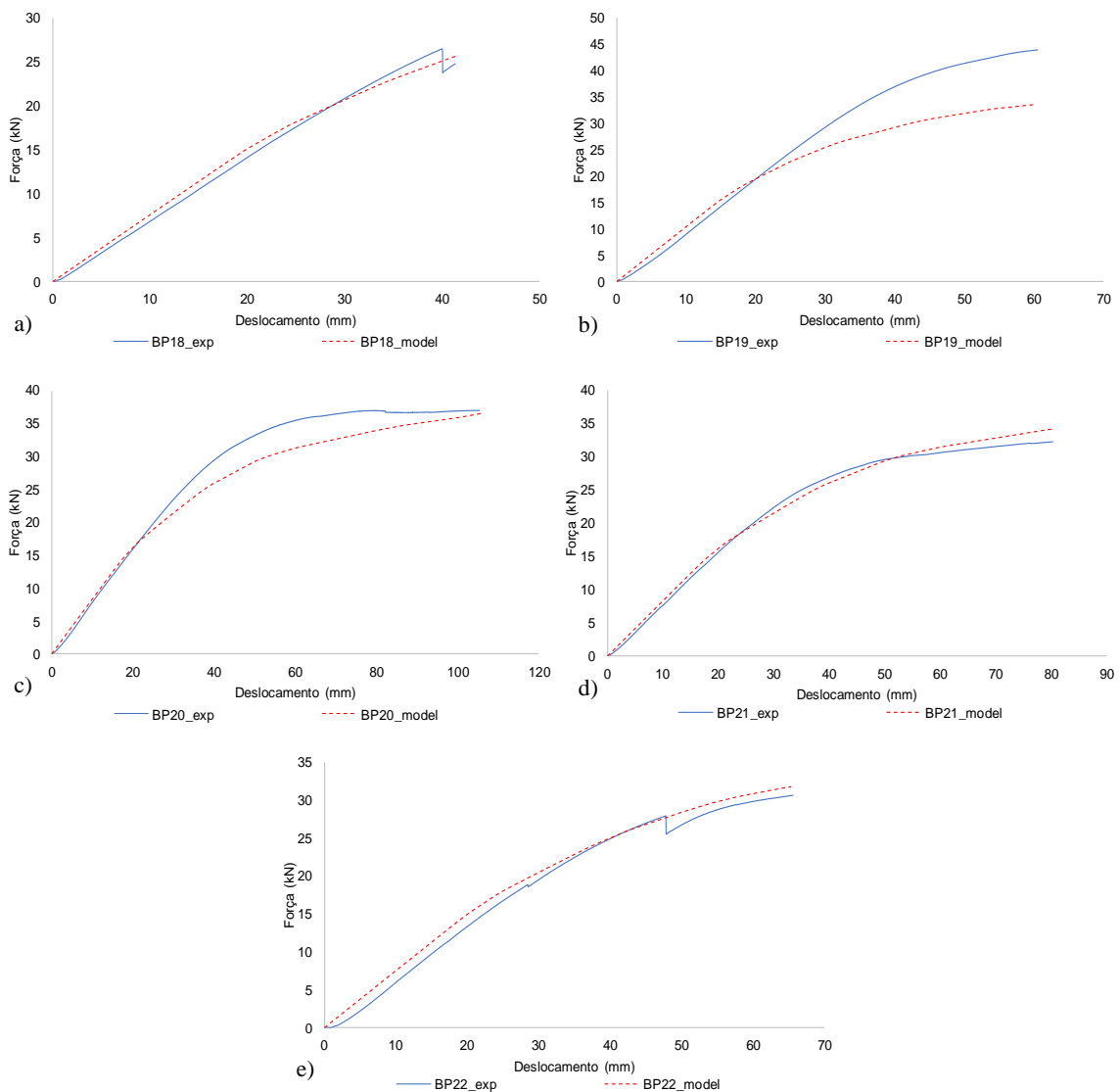


Figura F.3 – Curvas força vs deslocamento obtidas dos ensaios experimentais e do modelo numérico: a) BP18; b) BP19; c) BP20; d) BP21; e) BP22

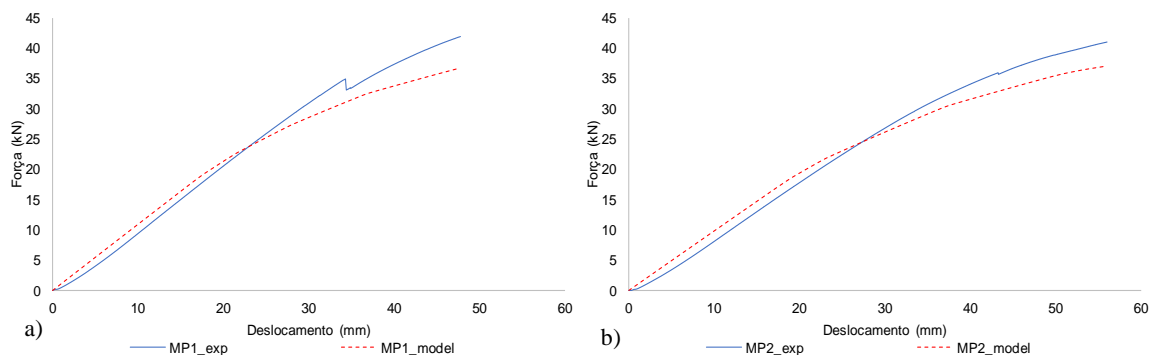


Figura F.4 – Curvas força vs deslocamento obtidas dos ensaios experimentais e do modelo numérico: a) MP1; b) MP2

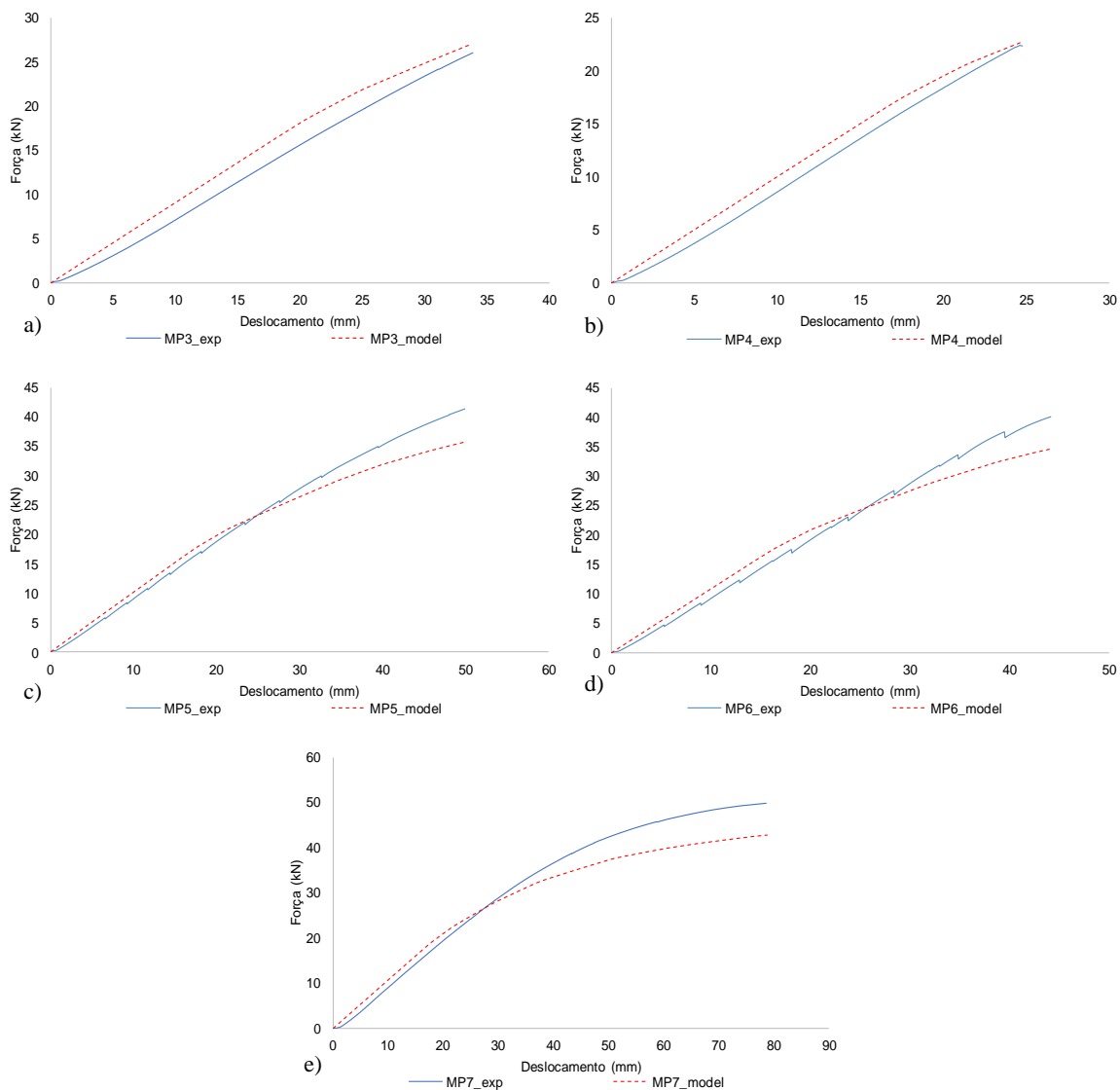


Figura F.5 – Curvas força vs deslocamento obtidas dos ensaios experimentais e do modelo numérico:
a) MP3; b) MP4; c) MP5; d) MP6; e) MP7

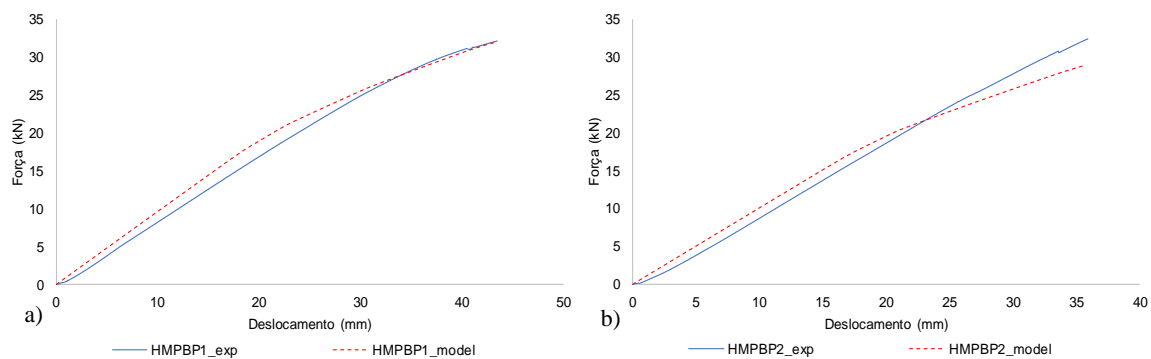


Figura F.6 – Curvas força vs deslocamento obtidas dos ensaios experimentais e do modelo numérico:
a) HMPBP1; b) HMPBP2

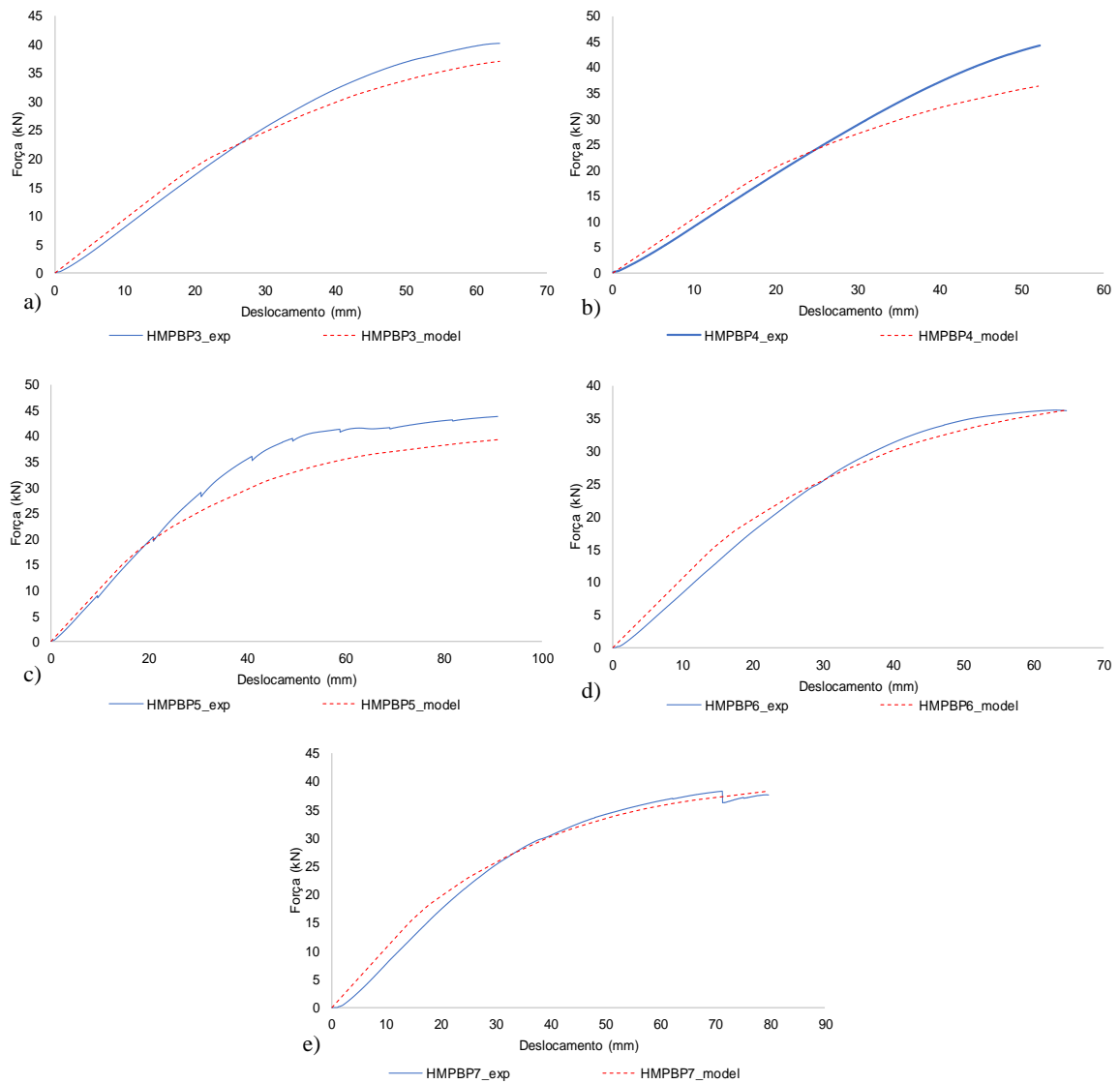


Figura F.7 – Curvas força vs deslocamento obtidas dos ensaios experimentais e do modelo numérico: a) HMPBP3; b) HMPBP4; c) HMPBP5; d) HMPBP6; e) HMPBP7

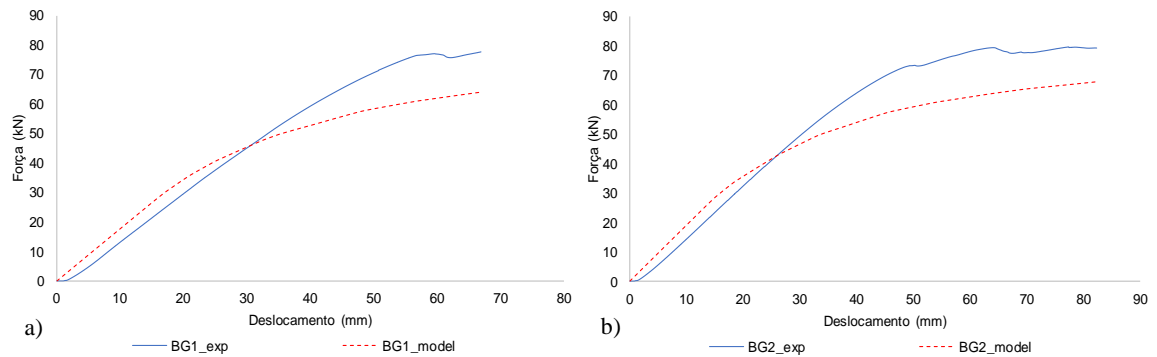


Figura F.8 – Curvas força vs deslocamento obtidas dos ensaios experimentais e do modelo numérico: a) BG1; b) BG2;

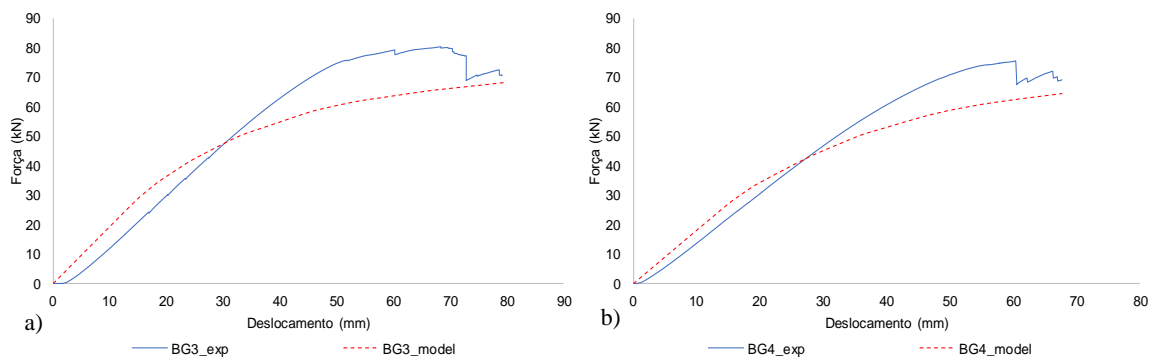


Figura F.9 – Curvas força vs deslocamento obtidas dos ensaios experimentais e do modelo numérico: a) BG3; b) BG4

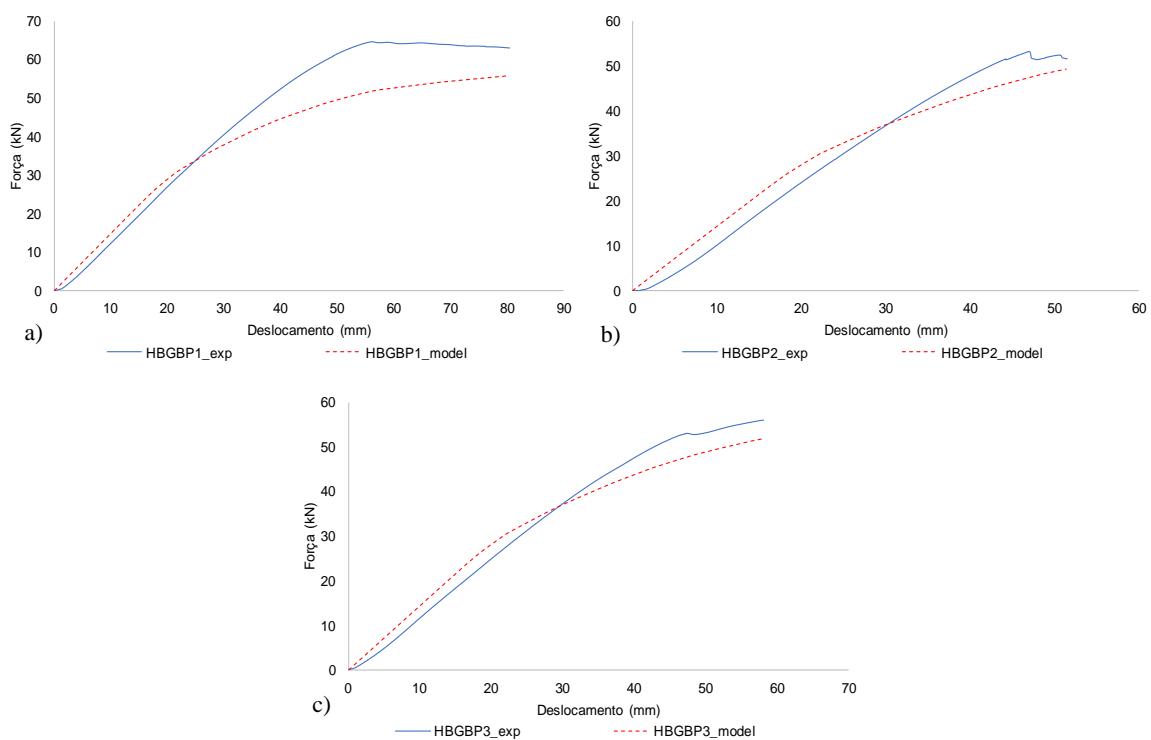


Figura F.10 – Curvas força vs deslocamento obtidas dos ensaios experimentais e do modelo numérico: a) HBGBP1; b) HBGBP2; c) HBGBP3