



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

# **Influência da fase de tratamento na qualidade de colagem de madeira de Pinheiro Bravo**

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

Autor

**André Manuel Alves Dias**

Orientadores

**Alfredo Manuel Pereira Geraldês Dias**

**Carlos Eduardo de Jesus Martins**

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

**Coimbra, Julho, 2016**

## AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação seria impossível sem o apoio, colaboração e motivação que recebi não só durante a sua execução, como durante todo o percurso académico que realizei até este momento. Gostaria assim de deixar um especial agradecimento às seguintes pessoas/entidades:

- Aos meus orientadores, Professor Doutor Alfredo Dias e Eng.º Carlos Martins, pela revisão, motivação e apoio incansável na elaboração deste documento;
- À direção do SerQ – Centro de Inovação e Competências da Floresta, pela disponibilização das instalações para realização dos ensaios e escrita desta dissertação;
- À empresa Pedrosa e Irmãos, Lda. pelo fornecimento de madeira de Pinheiro Bravo tratada e não tratada para realização dos ensaios;
- À empresa Colquímica que gentilmente forneceu a cola estrutural KOMARTEX M e o respetivo endurecedor KOMARTEX M;
- À empresa Dynea que gentilmente forneceu a cola estrutural Prefere 4040 e o respetivo endurecedor Prefere 5839;
- Aos meus pais, ao meu irmão, e restante família, pela educação, pelos valores que sempre me transmitiram, e pela motivação durante todo o meu percurso académico;
- À Sofia Dias, minha namorada, pelo carinho, suporte, apoio, e por todos os momentos de partilha vividos,
- Aos colegas que conheci nesta etapa, nomeadamente Telmo Morgado, André Marques e Carina pela ajuda na compreensão de alguns aspetos relacionados com a dissertação e por bons momentos de convivência;
- A todos os meus amigos, e em especial à Tertúlia Académica PpCe, pelos momentos de incentivo e motivação que proporcionaram, não só durante a realização desta dissertação como durante todo o percurso académico;
- Aos Professores que tive durante todo o meu percurso académico, por transmitirem o seu conhecimento e valores possibilitando assim a minha aprendizagem não só a nível académico como a nível pessoal.

## RESUMO

A Madeira Lamelada Colada (MLC) tem sido um dos produtos derivados de madeira com maior utilização na construção em madeira. O Pinheiro Bravo (*Pinus pinaster* Ait.) é a espécie resinosa com maior abundância na floresta portuguesa e está listada como uma das espécies aptas para produção de MLC. A possibilidade de receber tratamento confere uma vantagem ao Pinheiro Bravo relativamente a outras espécies europeias. São conhecidos alguns prós e contras das diferentes fases em que o tratamento pode ser aplicado, contudo a análise quantitativa da influência deste na qualidade de colagem não foi até ao momento alvo de estudo no Pinheiro bravo.

Nesta dissertação pretendeu-se avaliar a influência da fase em que o tratamento preservador foi aplicado no desempenho da colagem. Foram abordados três cenários: i) madeira sem tratamento, ii) madeira tratada anteriormente à colagem, e iii) madeira tratada posteriormente à colagem.

No decorrer dos trabalhos, foi realizada uma vasta campanha experimental que teve início na caracterização visual da matéria-prima, seguindo-se o fabrico de 22 elementos e consequente realização de ensaios para aferir a qualidade de colagem. Foram realizados ensaios de resistência ao corte e de delaminação de acordo com a EN 14080 (CEN, 2013). Foram considerados dois tipos de cola: PRF (Phenol-Resorcinol-Formaldeído) e MUF (Melanina-Ureia-Formaldeído).

Os resultados obtidos permitem concluir que quando a madeira é tratada depois de colada, os elementos de MLC apresentam delaminação inferior aos casos de madeira tratada antes de colada. Contudo a resistência ao corte da linha de cola e da madeira é superior nas situações de madeira tratada antes de colada. Verificou-se ainda que a delaminação ocorrida teve como origem diversos fatores tais como, i) a massa volúmica da madeira, ii) o tempo em fechado, iii) a presença de tratamento preservador na secção transversal e iv) a presença de lenho de Outono.

## ABSTRACT

Glued Laminated Timber (Glulam) has been one of the wood-based products with larger use in wood construction. The Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) is the softwood specie with the higher abundance in Portuguese forests and is included in the list of species suitable for the production of Glulam. The possibility of receiving treatment is a significant advantage of Maritime pine comparatively to others European species. There are several advantages and disadvantages for the phases that pressure preservative treatment might be applied to glulam, nevertheless, up to now no scientific information was made available regarding the influence of the stage treatment in the maritime pine bonding quality.

This study aimed to assess the influence of the phase in which the preservative treatment is applied in the bonding performance. Three scenarios were considered: i) untreated timber, ii) treated timber before bonding, and iii) treated timber after bonding.

During the work, an extensive experimental program was undertaken. This program started with a visual characterization of the timber, followed by a production of 22 elements and performance of tests to determine the bonding strength. To this end shear tests and delamination tests were carried out according to the EN 14080 (CEN, 2013). In this study two types of adhesives were used: PRF (Phenol-Resorcinol-Formaldehyde) and MUF (Melanin-Urea-Formaldehyde).

The results showed that when the timber is treated after bonding, the Glulam elements had lower delamination than when the timber is treated before bonding. However, the shear strength of the glue line and of the timber is higher in the specimens treated before bonding. It was also found that delamination was significantly influenced by some factors such as: i) the density of timber, ii) closed assembly time, iii) the presence of preservative treatment in the cross-section, and iv) the presence of latewood.

## ÍNDICE

AGRADECIMENTOS .....	i
RESUMO .....	ii
ABSTRACT .....	iii
ÍNDICE.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS .....	vi
ÍNDICE DE TABELAS .....	viii
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Considerações introdutórias .....	1
1.2 Âmbito e objetivos .....	2
1.3 Estrutura da dissertação .....	3
2 ESTRUTURAS DE MLC .....	4
2.1 Generalidades .....	4
2.1.1 Enquadramento histórico .....	4
2.1.2 Vantagens e desvantagens da MLC.....	5
2.1.3 Normalização.....	7
2.2 Fabrico de MLC .....	7
2.2.1 Introdução.....	7
2.2.2 Processo de fabrico.....	8
2.2.3 Controlo da qualidade.....	12
2.2.4 Fatores que influenciam a colagem .....	15
2.3 Produtos preservadores e fase de aplicação.....	19
2.4 MLC de Pinheiro Bravo .....	22
3 TRABALHO EXPERIMENTAL.....	26
3.1 Objetivos.....	26
3.2 Materiais .....	26
3.2.1 Madeira.....	26

---

3.2.2 Colas .....	28
3.3 Fabrico dos elementos .....	30
3.3.1 Planeamento e preparação das colagens .....	30
3.3.2 Aparelhamento, colagem e assemblagem.....	31
3.3.3 Madeira tratada depois da colagem .....	34
3.3.4 Obtenção de provetes.....	38
3.3.5 Análise de retenção de tratamento preservador .....	39
3.4 Ensaios realizados.....	41
3.4.1 Ensaios de delaminação .....	41
3.4.2 Ensaios de corte .....	44
4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS .....	48
4.1 Resultados.....	48
4.1.1 Ensaios de delaminação .....	48
4.1.2 Ensaios de resistência ao corte .....	49
4.2 Análise da Influência da fase de tratamento .....	50
4.2.1 Ensaios de delaminação .....	50
4.2.2 Ensaios de resistência ao corte .....	51
4.3 Análise por fase de tratamento .....	52
4.3.1 Madeira sem tratamento – MST .....	53
4.3.2 Madeira tratada antes de colada – MTAC .....	56
4.3.3 Madeira tratada depois de colada – MTDC .....	59
5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS .....	63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	66
ANEXOS .....	A-1
Anexo A – Parâmetros dos elementos colados.....	A-1

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – a) Cobertura do Meo Arena; e b) Pormenor construtivo do mesmo (Cruz, 2007)	5
Figura 2.2 – Ponte pedonal em MLC, Sertã .....	5
Figura 2.3 - Processo de fabrico de MLC (Martins, 2015).....	8
Figura 2.4 - Disposição recomendada para as lamelas na secção de MLC, para classes de serviço 1 e 2 (esquerda) e para classe de serviço 3 (direita) (Gaspar, 2010) .....	11
Figura 2.5 – a) Provete para ensaios de delaminação, e b) provete para ensaios de resistência ao corte pela linha de cola [mm] .....	15
Figura 3.1 - Determinação do teor de água das tábuas através do humidímetro de agulhas. ....	28
Figura 3.2 – a) Cola Prefere 4040 e o endurecedor Prefere 5839; e b) Cola KOMARTEX M e o endurecedor KOMARTEX M. ....	29
Figura 3.3 – a) Orientação das lamelas para classe de serviço 3; b) aplicação e espalhamento da cola numa lamela .....	32
Figura 3.4 – Sistema de prensagem dos elementos .....	33
Figura 3.5 – a) Colagem de um elemento de madeira sem tratamento com PRF; e b) Colagem de um elemento de madeira tratada antes da colagem com MUF. ....	33
Figura 3.6 – a) Câmara de secagem utilizada ; e b) disposição dos elementos para secagem .	36
Figura 3.7 – Aparência de um elemento tratado depois de colado, após a sua secagem.....	37
Figura 3.8 – a) Fissuração pela madeira; b) Fissuração pela linha de cola .....	37
Figura 3.9 – Corte dos elementos para obtenção de provetes de delaminação e provetes de resistência ao corte pela linha de cola .....	39
Figura 3.10 – a) Exemplo de provete de madeira tratada antes de colada, e b) Exemplo de provete de madeira tratada depois de colada .....	40
Figura 3.11 – a) Autoclave – equipamento usado para aplicação de ciclos de vácuo e pressão; b) Conduta de secagem dos provetes e correspondente disposição dos provetes; c) Pormenor de colocação dos provete no interior do Autoclave .....	42
Figura 3.12 – a) Exemplo de delaminações registadas em ambos os ciclos (azul – primeiro ciclo, verde – segundo ciclo; e vermelho – terceiro ciclo) ; e b) Exemplo de delaminação não considerada .....	43
Figura 3.13 – a) Esquema de ensaios de resistência ao corte; e b) Dispositivo para ensaios de resistência ao corte.....	45
Figura 3.14 – a) Provete de resistência ao corte pela linha de cola de elemento colado com PRF; e b) Provete de resistência ao corte pela linha de cola de elemento colado com MUF.....	46

Figura 3.15 – a) Película usada para determinar percentagem de rotura pela madeira; b) Aplicação do indicador de pH nas superfícies de rotura .....	47
Figura 4.1 – Delaminação total registada nos provetes dos elementos do lote MST .....	53
Figura 4.2 – a) Exemplo de linha de cola 2 do elemento PRF_19; e b) Exemplo de linha de cola 2 do elemento PRF_30 .....	54
Figura 4.3 – Tensão de corte média das lamelas da madeira (laranja) e da linha de cola (azul): a) dos elementos MST colados com PRF e b) dos elementos MST colados com MUF .....	55
Figura 4.4 - Delaminação total registada nos provetes dos elementos do lote MTAC .....	56
Figura 4.5 - Exemplo de delaminações devidas à presença de lenho de Outono no plano de colagem.....	57
Figura 4.6 - Tensão de corte média das lamelas da madeira (laranja) e da linha de cola (azul): a) dos elementos MTAC colados com PRF e b) dos elementos MTAC colados com MUF ...	58
Figura 4.7 - Delaminação total registada nos provetes dos elementos do lote MTDC .....	59
Figura 4.8 – (elemento PRF_31) - a) fissuração pela linha de cola após tratamento e antes dos ensaios de delaminação; e b) delaminação provocada pela fissuração existente na linha de cola, registada após os ensaios de delaminação .....	60
Figura 4.9 - Tensão de corte média das lamelas da madeira (laranja) e da linha de cola (azul): a) dos elementos MTDC colados com PRF e b) dos elementos MTDC colados com MUF ...	61

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Classes de risco de ataque por agentes biológicos (Lampreia, 2010) .....	20
Tabela 2.2 – Durabilidade natural e impregnabilidade do Pinheiro Bravo (adaptado de Gaspar (2006)) .....	20
Tabela 2.3 – Vantagens e desvantagens das diferentes fases de aplicação de Tratamento preservador .....	21
Tabela 3.1 - Composição química do tratamento preservador TANALITH E 8001 e respectivas quantidades. ....	27
Tabela 3.2 – Elementos fabricados nas diferentes condições.....	30
Tabela 3.3 – Teor de água dos elementos antes e após tratamento .....	35
Tabela 3.4 – Condições aplicadas à secagem dos elementos tratadas após colagem.....	36
Tabela 3.5 – Teor de água dos elementos quando cortados .....	36
Tabela 3.6 – Fissuração pela linha de cola, registada após secagem dos elementos [%].....	37
Tabela 3.7 – Variação dimensional registada em cada elemento tratado depois de colado [%] .....	38
Tabela 3.8 – Percentagem de madeira com tratamento nos elementos .....	40
Tabela 3.9 - Percentagem de rotura pela madeira permitida pela tensão última de resistência ao corte para cada provete e por valor individual de plano de corte. ....	47
Tabela 4.1 – Média das delaminações totais por elemento e por situação de tratamento e valor máximo de delaminação total registado por elemento ao fim do 2º e 3º ciclos para os elementos coladas com cola PRF. ....	48
Tabela 4.2 - Média das delaminações totais por elemento e por situação de tratamento e valor máximo de delaminação total registado por elemento ao fim do 2º e 3º ciclos para os elementos coladas com cola MUF .....	49
Tabela 4.3 – Valores médios de tensão de corte e rotura pela madeira registado por elemento e por situação de tratamento para elementos colados com cola PRF .....	49
Tabela 4.4 - Valores médios de tensão de corte e rotura pela madeira registado por elemento e por situação de tratamento para elementos colados com cola MUF .....	50
Tabela 4.5 – Percentagem de delaminação por linha de cola ao fim do 3º ciclo no lote MST	53
Tabela 4.6 – Massa volúmica média das lamelas do lote de MST e resistência ao corte média pela madeira e pela linha de cola.....	55
Tabela 4.7 - Percentagem de delaminação por linha de cola ao fim do 3º ciclo no lote MTAC .....	57

Tabela 4.8 - Massa volúmica média das lamelas do lote de MTAC e resistência ao corte média pela madeira e pela linha de cola.....	58
Tabela 4.9 - Percentagem de delaminação por linha de cola ao fim do 3º ciclo no lote MTDC .....	60
Tabela 4.10 - Massa volúmica média das lamelas do lote de MTDC e resistência ao corte média pela madeira e pela linha de cola.....	61
Tabela A.1 – Parâmetros de colagem adotados em cada elemento .....	A-1
Tabela A.2 – Massa volúmica por tábuas, por elemento e por lote .....	A-2

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Considerações introdutórias

A Madeira Lamelada Colada (MLC) é constituída por lamelas de madeira classificadas e selecionadas, unidas entre si longitudinalmente por uma cola apropriada para esse fim. Este produto apresenta-se como uma alternativa viável à madeira serrada otimizando por via da redução de variabilidade, diminuição de empenos e redução de problemas dimensionais associados à madeira serrada (Cachim, 2014).

A utilização de MLC distingue-se dos outros derivados de madeira pelas seguintes características: i) a possibilidade de fabrico de elementos de dimensões estruturais várias e formas diversas, ii) a redução da variabilidade das propriedades mecânicas, e iii) a boa resistência ao fogo (para secções de dimensões consideráveis). Uma das principais desvantagens apresentadas para este material é o elevado consumo de energia requerido para o seu fabrico em comparação com a madeira maciça.

A primeira utilização de MLC remonta a finais do século XIX, estando associado a uma patente de fabrico registada em 1901 na Suíça. Este material começou por ser inicialmente comercializado na Europa, acabando por chegar aos Estados Unidos da América no Pós-depressão económica, sendo a primeira estrutura construída em 1934 (em 2008 ainda se encontrava em serviço). Com a reestruturação da economia americana e com o desenvolvimento científico sentido na segunda-guerra mundial as estruturas de MLC ganharam relevo por apresentarem uma alternativa viável como material de construção em aplicações interiores e exteriores (APA, 2008).

Em Portugal, até à década de 90, por consequência do aparecimento de novos materiais como o aço e o betão, a utilização da madeira como material de construção estrutural estava em declínio. A construção do Pavilhão da Utopia (atual Meo Arena) veio expor a MLC como uma alternativa na construção em madeira em Portugal. Desde então, a construção em MLC no nosso país tem aumentado significativamente e apresenta-se atualmente como uma alternativa para coberturas e estruturas de médio vão (Negrão, 2010).

Com o crescente fabrico e utilização da MLC, surgiu a necessidade por parte das entidades reguladoras de controlar o fabrico e garantir a qualidade do produto. Inicialmente foi criada a EN 14080 (CEN, 2005b), sendo que recentemente foi aprovada a sua versão revista, a EN 14080

(CEN, 2013), que reúne num só documento a informação relativa à MLC que se encontrava até à data dispersa por várias outras: EN 386; EN 14080; EN 385; EN 391; EN 392 etc. .

Em Portugal, para a produção de MLC é utilizada, regra geral, madeira de Espruce (*Picea abies*) e Casquinha (*Pinus sylvestris*) ambas importadas, sendo que, algumas empresas têm começado a utilizar madeira de Pinheiro Bravo para fabrico de MLC. Sendo esta uma das espécies em maior abundância na floresta portuguesa, é essencial o estudo da viabilidade do uso desta espécie na MLC (Martins, 2015).

Foram assim desenvolvidos, no final do século passado, vários estudos de análise da viabilidade de MLC com Pinheiro Bravo tais como: Franco da Costa (1978), Cruz (1985) e Pontífice de Sousa (1990). Estes estudos afirmaram a MLC de Pinheiro Bravo como um material com potencialidade para ser aplicada apenas em classes de serviço 1 e 2. Surge assim a necessidade de aumentar a durabilidade da MLC de Pinheiro Bravo para que esta possa ser aplicada em classe de serviço 3. Este fator levou a que na ultima década tenham surgido os estudos de Gaspar (2006), Gaspar (2010) e Lampreia (2010) com o objetivo de avaliar a viabilidade do fabrico de MLC com Pinheiro Bravo tratado. Silva (2010) levou a cabo um estudo onde analisou a viabilidade do uso de MLC de Pinheiro Bravo tratado com creosote em travessas do caminho de ferro. Em todos estes estudos o tratamento preservador foi aplicado antes da colagem da madeira.

## 1.2 Âmbito e objetivos

Neste estudo pretende-se avaliar a influência da fase em que o tratamento preservador é aplicado no desempenho mecânico de elementos estruturais. Serão abordados três cenários: i) madeira colada sem tratamento, ii) madeira previamente tratada antes da colagem e iii) madeira tratada posteriormente à colagem.

Nesse sentido serão considerados dois tipos de colas comercialmente disponíveis. Será considerada uma cola do tipo PRF (Phenol-Resorcinol-Formaldeído) para estabelecer uma comparação com estudos anteriores e uma cola tipo MUF (Melanina-Ureia-Formaldeído), a qual é utilizada na produção nacional de MLC com Pinheiro bravo, mas que apesar disso não existem estudos publicados que comprovem a viabilidade desta madeira sem ou com tratamento. No âmbito deste estudo serão ainda analisados os resultados por forma a tentar apurar a influência dos fatores relativos à colagem dos elementos na qualidade da colagem.

### **1.3 Estrutura da dissertação**

A presente dissertação encontra-se dividida em dois capítulos. Neste primeiro capítulo são apresentadas primeiramente as linhas orientadoras e motivadoras da presente dissertação. Inicialmente será feita uma contextualização do tema, seguida da apresentação do âmbito e objetivos e da apresentação da estrutura da presente dissertação.

No capítulo dois é feita uma análise do estado da arte de MLC. Primeiramente são abordadas algumas generalidades da MLC, como o enquadramento histórico, as vantagens e desvantagens e a normalização em vigor para fabrico de MLC. De seguida abordam-se os processos de fabrico de MLC, bem como os ensaios de controlo de qualidade e os parâmetros que influenciam a qualidade da MLC (espécie de madeira, colas). Segue-se uma análise aos aspetos referentes à durabilidade da madeira, onde são estudados os produtos preservadores existentes e a análise da influência da fase de aplicação do produto preservador. Por ultimo, neste capítulo, é feita uma análise do estado da arte da viabilidade da MLC em Pinheiro Bravo tratado e não tratado.

No capítulo três é descrito todo o trabalho experimental realizado, começando por descrever os materiais usados (madeira e colas) seguindo-se as várias fases de fabrico dos elementos. A descrição dos processos de fabrico consiste nos aspetos tidos em conta no planeamento e preparação das colagens, nos trabalhos de aparelhamento, colagem e assemblagem dos elementos, bem como a obtenção dos provetes e procede-se ainda a uma análise da quantidade de produto preservador presente em cada elemento. Segue-se a descrição dos ensaios realizados (delaminação e resistência ao corte), os limites estabelecidos pela EN 14080 (CEN, 2013) .

No capítulo quarto é feita a análise e discussão dos resultados. Primeiramente são apresentados os resultados obtidos e é feita a comparação por situação de tratamento para os ensaios de delaminação e resistência ao corte pela linha de cola e pela madeira. Seguidamente são apresentados por situação de tratamento, primeiro para a madeira sem tratamento, e em seguida para madeira tratada antes de colada e por último para madeira tratada depois de colada. Com esta discussão é feita uma análise dos resultados de forma a identificar possíveis fatores causadores de delaminação.

No quinto capítulo apresentam-se as conclusões obtidas deste estudo e são feitas sugestões para futuros trabalhos na continuidade deste tema. Seguem-se as referências bibliográficas e por último os Anexos.

## 2 ESTRUTURAS DE MLC

### 2.1 Generalidades

#### 2.1.1 Enquadramento histórico

A MLC começou a ser utilizada na Europa nos fins do Séc. XIX, contudo, a primeira patente registada de colagem de lamelas de madeira, usada como material de construção, remonta ao ano de 1901 e pertence ao alemão Otto Hetzer, que acabaria por formar uma empresa especializada neste tipo de material (APA, 2008). Estas estruturas receberam um relevo importante durante e após a Primeira Guerra Mundial, que com a otimização das colas utilizadas passou a ser um material usado na construção de aeronaves e em estruturas de edifícios (Simpson, 1999).

Com o desenvolvimento tecnológico sentido na Segunda Guerra Mundial, a evolução das colas sintéticas conduziu a que a MLC pudesse ser aplicada em ambiente exterior, o que originou um reaparecimento das estruturas de madeira, vincando a sua vertente estrutural. Paralelamente, com vista a conservar este tipo de estruturas, desenvolveram-se também os tratamentos preservadores de madeira (Cachim, 2014).

Nos Estados Unidos da América, desde a década de 30 do século XX, que começaram a aparecer estruturas de MLC, as quais surgiram por influência de um arquiteto e engenheiro de seu nome Max Hanisch. Hanisch aprendeu, na empresa formada por Hetzer, as várias técnicas de construção em MLC que lhe foram bastante uteis quando emigrou para os Estados Unidos da América onde acabaria por criar uma fábrica. Até ao fim da década de 50, os Estados Unidos da América contariam com cerca de uma dezena de fábricas dedicadas à produção de MLC. Em 1952, foi criado, com uma união de várias empresas, o American Institute of Timber (AITC), que teve o intuito de desenvolver técnicas de MLC e criar documentos reguladores, e que ainda hoje representa a maioria dos fabricantes de MLC do continente americano (Gaspar, 2006).

De forma a promover a utilização de estruturas de MLC, foram também criados na Europa alguns organismos. Por exemplo, em 1974 foi criado em França o Syndicat National des Constructeurs et Fournisseurs de Charpentes en Bois Lamellé Collé (SNCCBLC) e em Inglaterra a Glued Laminated Timber Association (GLTA) (Lampreia, 2010).

Em Portugal, tradicionalmente, a construção em madeira referia-se a coberturas e/ou pavimentos em construção mista de madeira-alvenaria de pedra, bloco ou adobe. Contudo, o aparecimento de novos materiais, como o betão armado e vigotas pré-esforçadas, levou a que nas décadas 50 e 60 do século XX a madeira enquanto material de construção caísse em desuso. Anos mais tarde, por volta das décadas de 80 e 90 houve um conjunto de fatores que levaram a que a madeira, em especial a MLC, adquirisse algum relevo e protagonismo no sector da construção. Um desses fatores foi a construção do Pavilhão da Utopia (atual MEO Arena) da Expo-98, (Figura 2.1). Neste pavilhão, com a utilização de MLC foi construído um arco com um comprimento de 114 m, o que veio a desmistificar a ideia criada na sociedade portuguesa de que a madeira era um material de fraca qualidade (Negrão, 2010). Negrão (2010) refere também que desde a década de 90 até ao ano de 2010 a percentagem de construção em MLC em relação ao total de toda a construção em madeira é de cerca de 70%. Este valor representa o elevado relevo que as estruturas de MLC têm recebido nos últimos anos em Portugal. Na Figura 2.2 é visível um exemplo uma ponte pedonal construída em MLC na vila de Sertã.

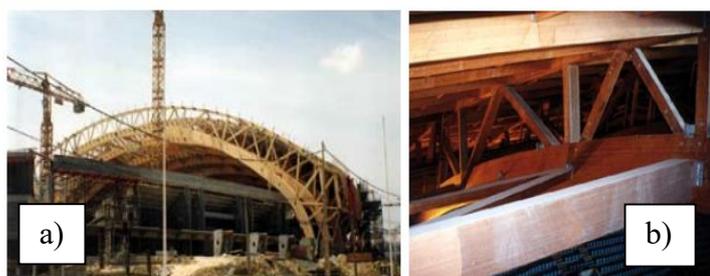


Figura 2.1 – a) Cobertura do Meo Arena; e b) Pormenor construtivo do mesmo (Cruz, 2007)



Figura 2.2 – Ponte pedonal em MLC, Sertã

### 2.1.2 Vantagens e desvantagens da MLC

Nas últimas décadas a madeira maciça e os produtos derivados da madeira, têm tido um crescente interesse por parte do mercado da construção. Comparativamente com os materiais aço e betão, a madeira destaca-se por: ser um material mais ecológico, apresentar uma relação resistência-peso interessante, ser dotado de uma boa resistência química (possível de evitar

corrosão), possuir uma baixa condutibilidade térmica, deter aspecto natural agradável. (Gaspar, 2006).

Uma das grandes desvantagens da madeira maciça é apresentar dimensões limitadas pelo tamanho da árvore que lhe deu origem. Para colmatar este e outros inconvenientes, a colagem de elementos de madeira com menores dimensões tem levado a que se possa obter elementos de madeira com várias dimensões. Sabendo que “a necessidade aguça o engenho”, facilmente se compreende que consoante o problema/dificuldade que se pretenda ultrapassar existem produtos derivados de madeira que melhor se adequam à solução ideal.

A MLC insere-se neste leque de produtos, e apresenta um conjunto de vantagens que a diferenciam dos restantes derivados de madeira:

Dimensões estruturais: a MLC consiste na sobreposição longitudinal de lamelas com espessura de 6 mm a 35 mm (classe de serviço 3) ou 45 mm (classe de serviço 1 ou 2) coladas entre si, obtendo assim secções que podem ter até 2 m de altura e 240 mm de largura. O comprimento dos elementos de MLC é limitado no seu valor máximo pelas condições de fabrico e transporte, sendo possível fabricar vigas até 40 m (Lampreia, 2010). Podem também ser fabricados elementos com secção variável e até elementos de configuração curva.

Menor variabilidade das propriedades: No fabrico de MLC a presença de defeitos naturais existentes na madeira (p. ex. nós, descaios, bolsas de resina) é minimizada através dos processos de corte e colagem aleatória das lamelas, resultando assim um material mais homogéneo e com melhores propriedades mecânicas (Lampreia, 2010).

Resistência ao fogo: a combustão da madeira conduz à criação de uma camada carbonizada que retarda o avanço da combustão das fibras interiores. Quanto maior a secção transversal dos elementos de MLC maior será a resistência ao fogo dos mesmos. É importante referir que as colas estruturais utilizadas no fabrico da MLC não devem sofrer alterações abaixo da temperatura de carbonização da madeira, 300 °C (Cruz, 2007).

As principais desvantagens da MLC em relação à madeira maciça são: i) o maior consumo de energia em algumas fases de produção; ii) a necessidade de recorrer a equipamentos especializados para esse fim, o que pode encarecer o fabrico do elemento e/ou da estrutura; iii) os elevados custos e os problemas de operacionalização que podem surgir do fabrico e transporte de vigas de grandes dimensões, devendo ser necessário um cuidado especial na análise deste factor; e iv) os riscos para a saúde e ambiente consequentes dos químicos usados no fabrico de MLC.

Muitas vezes a durabilidade da madeira é também vista como uma desvantagem quando comparada com o betão e o aço. Contudo, com o desenvolvimento da indústria é possível fabricar MLC com tratamento preservador, o qual pode ser aplicado na madeira antes ou depois da colagem. A durabilidade da MLC está também dependente da impregnabilidade das espécies usadas e na utilização, ou não, de pinturas/velaturas. Devem também, em todas as fases do projeto, ser respeitadas todas as regras de boa execução e conceção de estruturas de MLC (por exemplo: proteção contra a corrosão das ligações, e escolha de colas adequadas às condições de exposição) (Martins, 2015).

### **2.1.3 Normalização**

No panorama europeu, as estruturas de MLC encontram-se bastante divulgadas, e com isso o European Committee for Standardization (CEN), num intuito de regular o fabrico e controlar o produto final, desenvolveu normalização para este tipo de produto. A norma que atualmente regulamenta os processos de fabrico é a EN 14080 (CEN, 2013). Esta norma reúne em si informação alusiva a elementos de MLC e de madeira maciça colada que se encontrava dispersa por diversas normas, nomeadamente: EN 387 (CEN, 2001c), EN 390 (CEN, 1994b), EN 1194 (CEN, 1999), EN 14080 (CEN, 2005b), EN 385 (CEN, 2001a), EN 386 (CEN, 2001b), EN 391 (CEN, 2001d) e EN 392 (CEN, 1995).

A EN 14080 (CEN, 2013) tem por objetivo definir requisitos mínimos que garantam a obtenção de colagens fiáveis e duráveis de madeira lamelada colada. Os requisitos definidos incidem sobre: a resistência mecânica da MLC; a resistência e durabilidade da resistência das colagens, quer transversalmente, quer longitudinalmente; a durabilidade relativamente a ataques biológicos; a resistência ao fogo; a emissão de formaldeídos e desvios permitidos. Estão também englobadas nesta norma: a avaliação da conformidade, e a marcação e etiquetagem dos produtos.

Evitando nesta subsecção uma descrição exaustiva e descontextualizada das regras normativas, será analisada paralelamente em cada subsecção a forma como as normas interferem com o âmbito em estudo na subsecção em causa.

## **2.2 Fabrico de MLC**

### **2.2.1 Introdução**

No presente subcapítulo procede-se à exposição das várias etapas do fabrico de MLC, desde a obtenção da matéria-prima até à embalagem e expedição do produto final. Serão analisados os

processos de fabrico, os requisitos normativos a estes associados e os processos de controlo da qualidade do produto final. Por último, analisar-se-á a influência da espécie de madeira e da cola escolhida na qualidade do produto final.

### 2.2.2 Processo de fabrico

O processo de fabrico da MLC tem início com o processamento da matéria-prima prosseguindo com as etapas que se apresentam de seguida, estando ilustradas as várias etapas na Figura 2.3.

1. Obtenção da matéria-prima (toros de madeira);
2. Serragem dos toros de madeira em forma de tábuas;
3. Secagem das pranchas e aplicação do tratamento preservador (opcional, mas se aplicado é necessário secar de novo as pranchas);
4. Classificação visual/mecânica das pranchas;
5. Execução de ligações de topo (fabrico de lamelas, aumentando o comprimento dos elementos);
6. Aparelhamento das faces das lamelas;
7. Aplicação de cola na superfície das lamelas a colar;
8. Aplicação de pressão de aperto nas lamelas assembladas;
9. Aparelhamento e acabamento das vigas (poderá ainda ser aplicado tratamento preservador, se for o caso);
10. Embalagem e expedição.

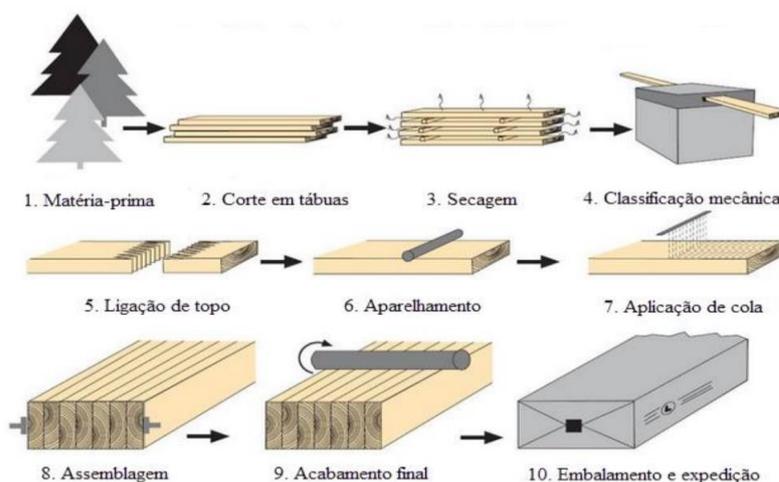


Figura 2.3 - Processo de fabrico de MLC (Martins, 2015)

#### Obtenção de matéria-prima, corte, classificação

Quando se tem por objetivo o fabrico de um elemento em MLC, o primeiro passo é a escolha da matéria-prima. Segundo o subcapítulo 5.5.2 da EN 14080 (CEN, 2013), para o fabrico de elementos lamelados colados deve ser escolhida para esse efeito uma única espécie de um total de 17 espécies listadas como aptas para o fabrico de MLC.

Após a obtenção da matéria-prima e sua serragem sob a forma de tábuas deve-se proceder à secagem destes elementos. Para que esta secagem seja eficaz, as instalações de secagem/armazenamento devem estar providas de equipamentos com capacidade de controlar a humidade e temperatura requeridas para a secagem pelo anexo I da EN 14080 (CEN, 2013).

Consoante a classe de risco a que o elemento vai estar sujeito e consoante a durabilidade natural da espécie e sua impregnabilidade, a madeira poderá ser sujeita a tratamento nesta fase caso se pretenda que a colagem seja realizada com madeira já tratada.

Seguidamente à secagem das tábuas, deve proceder-se à sua classificação visual e/ou mecânica. A classificação visual das tábuas pode ser feita tendo por base o procedimento apresentado na secção 5.2 da EN 14081-1 (CEN, 2005c). A classificação mecânica recorre ao procedimento apresentado na secção 5.3 da EN 14081-1 (CEN, 2005c). Segundo a respetiva norma, a classificação mecânica deverá ser feita por métodos não destrutivos, através dos quais é possível obter uma previsão de certas propriedades mecânicas. As propriedades mecânicas deverão estar contempladas pelos parâmetros definidos pela EN 14081-4 (CEN, 2009) que farão correspondência com as classes de resistência apresentadas na Tabela 1 da EN 14080 (CEN, 2013) (Martins, 2015).

#### Fabrico de *Finger joints* e determinação de teor de água

O passo seguinte passa por executar ligações de topo, também conhecidas por *finger joints*. As ligações de topo consistem no fabrico de um entalhe em cada um dos topos das tábuas a unir e aplicando cola nos entalhes, com recurso a equipamentos específicos, aplicar pressão de forma a obter uma ligação rígida. O procedimento de fabrico e condições de colagem dos *finger joints* devem respeitar o estipulado na secção I.4 do Anexo I da EN 14080 (CEN, 2013).

É importante referir que quando se procedem a colagens com tábuas de madeira, tanto para ligações de topo como para colagem de lamelas, o teor de água das tábuas deve ser controlado. Para madeira não tratada, o teor de água da madeira deverá situar-se entre 6% e 15% e para madeira tratada entre 11% e 18%. Requer também especial atenção o facto de que a diferença entre duas tábuas coladas não deve ser superior a 5%. Sempre que se utiliza cola no fabrico de MLC, para além de respeitar os pressupostos apresentados pelas normas, deve-se consultar a ficha técnica da cola utilizada e ter em especial atenção os preceitos por esta referida.

Para determinar o teor de água da madeira, o Anexo G da EN 14080 (CEN, 2013) refere que para medição do teor de água, os equipamentos utilizados deverão ter uma precisão de  $\pm 2\%$ . Segundo a mesma norma, todas as tábuas deverão ser alvo de uma correta medição do teor de água. A medição do teor de água poderá ser feita recorrendo a humidímetros de resistividade (humidímetro de agulhas) (EN 13183-2 (CEN, 2002b)) ou de contacto (humidímetro de chapa

plana) (EN 13183-3 (CEN, 2005a)). Sempre que possível, deverá ser feita uma verificação dos resultados de ambos os métodos com os resultados obtidos pela medição de massas em estufa a  $103\pm 2^\circ\text{C}$  (EN 13183-1 (CEN, 2002a))

#### Aparelhamento das tábuas

A fim de obter a espessura pretendida para as lamelas, deve-se proceder ao aparelhamento destas. Para além da redução da espessura, o aparelhamento tem ainda por objetivos: i) a remoção de contaminantes físicos ou químicos, ii) a preparação da superfície para receber a cola, e iii) a remoção de desigualdades dimensionais, que poderão ter sido provocadas por variação do teor de água (Gaspar, 2006).

Bourreau et al (2013) conduziram um estudo onde, entre outros fatores, analisaram a influência que o tempo entre o aparelhamento das tábuas e a sua colagem tinha na delaminação da linha de cola para a espécie de Laba-laba (*Qualea rosea*). Foram analisadas duas situações: i) tempo que decorria desde aparelhamento até colagem menor ou igual a 8 h e ii) tempo que decorria desde aparelhamento até colagem superior a 24 h. Dos resultados, os autores concluíram que para a espécie analisada, se obteve menor delaminação para o caso em que tempo desde o aparelhamento até à colagem foi inferior a 8h. Regra geral, em processos industriais, a colagem dá-se logo após o aparelhamento.

A espessura das lamelas, segundo a EN 14080 (CEN, 2013), está dependente das classes de serviço estipuladas pela EN 1995-1 (CEN, 2003). As classes de serviço são caracterizadas pelo teor de água de equilíbrio da madeira quando sujeita a diferentes condições ambiente de temperatura e humidade relativa. A classe 1 corresponde a uma temperatura ambiente de  $20^\circ\text{C}$  e uma humidade relativa superior a 65% num pequeno número de semanas no ano (para resinosas, regra geral, teor de água inferior a 12%). A classe 2 corresponde a uma temperatura ambiente de  $20^\circ\text{C}$  e uma humidade relativa superior a 85% também num pequeno número de semanas no ano (para resinosas, regra geral, teor de água inferior a 20%). Para a classe 3 deverão ser consideradas todas as condições que levem a teores de água superiores ao teor de água de equilíbrio da classe 2.

A EN 14080 (CEN, 2013) recomenda que em classes de serviço 1 e 2, a espessura das lamelas deverá ser superior a 6 e inferior a 45 mm, já em classes de serviço 3, a espessura das lamelas deverá ser superior a 6 mm e inferior a 35 mm.

#### Colagem e montagem das lamelas

O processo que se segue é a colagem das lamelas. As colas usadas devem ter capacidade de oferecer ao elemento de MLC uma ligação que seja capaz de resistir às condições da classe de

serviço correspondente durante a vida útil da estrutura. Assim, a EN 14080 (CEN, 2013) divide as colas existentes em dois tipos. O tipo I engloba as colas que se podem utilizar nas classes de serviço 1, 2 e 3. O tipo II, por sua vez, corresponde a colas que apenas se podem utilizar nas classes de serviço 1. Ambos os tipos de cola devem cumprir os requisitos estipulados pela EN 301 (CEN, 2006). Segundo esta Norma os provetes devem de ser sujeitos a ensaios de corte, delaminação, dano provocado nas fibras (por pH baixo) e corte pelas tensões que surgem da retração da madeira.

Em ambiente laboratorial, a cola é aplicada com recurso a uma trincha que permite um espalhamento uniforme da cola sobre toda a superfície da lamela. Em ambiente fabril, a cola é aplicada por extrusão, aplicada com recurso a um tubo com vários furos que vai libertando cola à medida que as lamelas avançam (Gaspar, 2006).

A orientação das lamelas é também alvo de análise por parte da EN 14080 (CEN, 2013). Esta norma estipula que para classes de serviço 1 e 2 as orientações das medulas das várias lamelas a unir deverão estar todas para o mesmo lado. Para a classe de serviço 3, a norma exige que as lamelas exteriores estejam orientadas de forma a que a orientação da medula seja para o exterior. Ambas as disposições podem ser observadas na Figura 2.4.

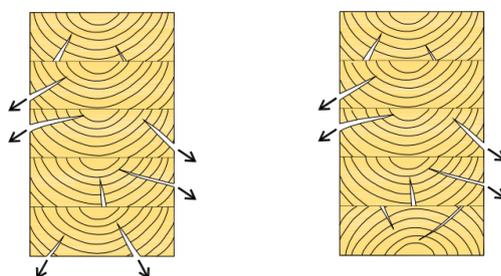


Figura 2.4 - Disposição recomendada para as lamelas na secção de MLC, para classes de serviço 1 e 2 (esquerda) e para classe de serviço 3 (direita) (Gaspar, 2010)

A adoção desta disposição leva a que se consiga um aumento da durabilidade dos elementos. As fendas de retração surgem, regra geral, na aresta da lamela contrária à localização da medula e com esta disposição consegue-se uma redução da possibilidade de infiltração de água no interior do elemento (Gaspar, 2010).

A quantidade mínima de cola a aplicar na união de cada lamela deverá ser fornecida pelo fabricante da cola, bem como os tempos em aberto, tempos em fechado, tempos de pressão e pressão de aperto ideais. O tempo em aberto corresponde ao tempo que decorre desde a aplicação da cola na lamela até à junção da lamela a colar a esta. O tempo em fechado é o tempo que decorre desde que se selou a junta de cola até que é aplicada a pressão de aperto. O tempo

de pressão é o tempo em que a pressão de aperto é aplicada nas lamelas. A pressão de aperto é a pressão que se aplica nas lamelas para que a colagem seja bem executada. Esta pressão é recomendada pela EN 14080 (CEN, 2013) sendo que para lamelas de espessura inferior a 35 mm a pressão deve situar-se entre 0,6 MPa e 0,8 MPa; e para lamelas com espessura entre 35 mm e 45 mm deverá ser de 0,8 MPa para lamelas com ranhuras e 1,0 MPa para lamelas sem ranhuras; e para lamelas com espessura entre 45 e 85 mm a pressão recomendada é de 0,8 MPa a 1 MPa.

#### Cura dos elementos, acabamento final e expedição

Após terminado o processo de colagem das lamelas deve-se proceder à cura dos elementos. O tempo de cura tem como principal objetivo garantir a cura das colas para que estas permitam uma utilização estrutural viável. A obtenção de uma colagem resistente à água é o requisito de desempenho que mais condiciona o tempo de cura, sendo que esta só é obtida após alguns dias (Gaspar, 2006). A EN 14080 (CEN, 2013) exige que durante os processos de cura a temperatura do ambiente envolvente não deverá ser inferior a 15 °C. As condições de cura dependem principalmente da espécie e da cola utilizada, sendo assim recomendada a consulta da ficha técnica da cola para garantir a viabilidade da colagem. Caso o tratamento preservador seja aplicado nos elementos de MLC, estes deverão ser devidamente secos nas condições requeridas para esse efeito. A expedição do material deve ser feita protegendo a MLC contra poeiras, humidades e/ou chuvas, sendo usualmente para isso usados filmes de polietileno (Lampreia, 2010).

A EN 14080 (CEN, 2013) indica no capítulo 6 que, no âmbito da avaliação da conformidade dos produtos lamelados colados, os fabricantes deverão estabelecer um sistema de controlo de produção, de tal modo que consigam assegurar os valores pela norma referida (resistência dos elementos, durabilidade e resistência das colagens, reação ao fogo, durabilidade contra ataques biológicos, libertação de substâncias perigosas (formaldeídos)) (Gaspar, 2006).

#### **2.2.3 Controlo da qualidade**

Qualquer produto aplicado na construção é alvo de verificação de conformidade, sendo que a marcação CE exige controlo continuado das características declaradas na linha de produção às entidades competentes. Aquando da alteração de procedimentos da linha de colagem estas devem ser verificadas se produziram alterações em relação aos ensaios de tipo inicial que deram lugar à marcação CE da mesma linha de produção.

Segundo Dietsch and Tannert (2015), a qualidade estrutural dos elementos de MLC depende principalmente de: i) qualidade individual das lamelas, ii) qualidade das ligações de topo, e iii) qualidade das linhas de cola. Com o intuito de garantir a qualidade do produto final e o seu

correto desempenho estrutural, de forma a evitar intervenções futuras, deve ser analisada a qualidade individual dos fatores atrás referidos.

A qualidade individual das lamelas deve ser avaliada através dos processos de classificação mecânica e visual. A sua classificação deverá seguir os pressupostos indicados na EN 14081-1 (CEN, 2005c) e normas complementares aí mencionadas.

Para avaliar a qualidade das ligações de topo recorre-se a ensaios de resistência à flexão das mesmas. O Anexo E da EN 14080 (CEN, 2013) estipula as regras e os procedimentos que devem ser seguidos para que se possa proceder à determinação da resistência de flexão das lamelas. Esse procedimento não será aqui apresentado, uma vez que não será tido em consideração neste trabalho.

A qualidade das linhas de cola está dependente principalmente da espécie de madeira, da cola usada e dos parâmetros da colagem (p. ex. pressão de aperto). A resistência da linha de cola poderá então ser avaliada através de ensaios de delaminação e ensaios de resistência ao corte pela linha de cola.

#### Ensaio de delaminação

Os ensaios de delaminação têm como princípio base criar um gradiente de teor de água na madeira, gerando assim tensões internas perpendiculares à linha de cola que potenciem a rotura da linha de cola.

No Anexo C da EN 14080 (CEN, 2013) encontra-se o procedimento que se deverá seguir para que se realizem os ensaios de delaminação da linha de cola. Os provetes a ensaiar deverão ter segundo a dimensão paralela às fibras de madeira  $75 \pm 5$  mm, devendo nas restantes dimensões ter dimensão igual à secção transversal da viga. Se a viga tiver uma largura superior a 300 mm, a secção transversal deverá ser dividida em dois ou mais elementos, tendo cada um no mínimo 130 mm de largura. Se a altura da secção tiver mais de 600 mm, esta deverá também ser cortada em dois ou mais elementos, devendo a altura mínima da secção ser igual ou superior a 300 mm. Na Figura 2.5 a) é apresentado um exemplo de um provete para ensaios de delaminação.

Os provetes deverão ser submetidos a um de três métodos normalizados (A, B e C), sendo os métodos A ou B aplicados caso o elemento de MLC seja para aplicar em classe de serviço 3. A base dos ensaios consiste na imersão dos provetes em água e consequente aplicação de vácuo e pressão recorrendo a um equipamento de Autoclave. De seguida os provetes devem ser colocados numa câmara de ventilação onde são alvo de secagem. Após término do ciclo de secagem devem ser registados os valores de delaminação dos provetes. O número de ciclos

realizados, as condições de secagem e as condições do Autoclave dependem do método usado e encontram-se estipuladas pela EN 14080 (CEN, 2013).

As medições de delaminações deverão ser realizadas no máximo uma hora após o término do período de secagem, de forma a evitar alterações do teor de água dos provetes. Para medição das delaminações é recomendável que se use uma lupa, uma lanterna e um apalpa-folga de 0,08 mm a 0,1 mm de forma a verificar se existe separação das lamelas pela linha de cola. Após medição, dever-se-á verificar se a delaminação registada é inferior aos limites de delaminação presentes na EN 14080 (CEN, 2013).

#### Ensaios de resistência ao corte

O princípio dos ensaios de resistência ao corte pela linha de cola consiste na aplicação de tensões de corte na linha de cola, na direção paralela às fibras de madeira, até que se atinga a rotura.

Os ensaios de corte devem seguir o estipulado no Anexo D da EN 14080 (CEN, 2013). Os provetes deverão ter dimensões de 40 a 50 mm de largura e 40 a 50 mm de espessura e uma altura igual à da secção transversal. Os provetes podem também ser obtidos por carotes retirados do elemento de MLC na face perpendicular às fibras de madeira.

Segundo a norma referida, no decorrer dos ensaios, a aplicação da carga deverá ser constante em controlo de movimento, não devendo a rotura ser atingida antes dos 20 s. A largura da secção transversal condiciona o número de provetes a extrair por secção transversal. Se a largura for inferior a 100 mm deverá ser extraído um provete; se a largura for entre 100 mm e 160 mm deverão ser extraídos dois provetes; se a largura for superior a 160 mm deverão ser extraídos três provetes. A norma refere também que, por secção transversal, deverão ser ensaiados pelo menos três linhas de colagem de diferentes zonas (superior, meio, inferior). Caso os provetes tenham menos de dez planos de colagem, devem ser ensaiados a totalidade dos planos de colagem. Na Figura 2.5 b) é apresentado um exemplo de um provete para ensaios de resistência ao corte pela linha de cola.

Para determinar a resistência ao corte, os provetes devem ser colocados num dispositivo de ensaio, de forma a que a carga seja exercida na direção das fibras de madeira e que a sua aplicação diste no máximo 1 mm do plano da colagem. Deverão ser medidas as dimensões do provete, de forma a quantificar a área colada por plano de colagem. Após o ensaio deverá ser registada a carga última do plano de colagem, bem como a percentagem de rotura pela madeira (arredondada aos 5%). Por último, consoante a resistência de corte, dever-se-á verificar se a percentagem mínima de rotura pela madeira verifica os limites impostos pela EN 14080 (CEN, 2013).

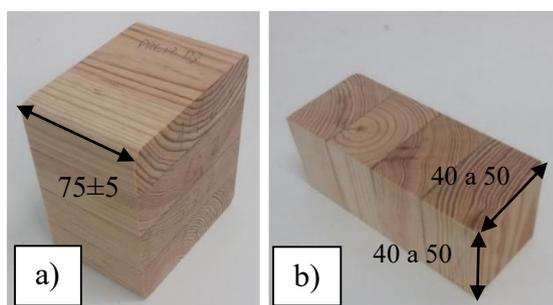


Figura 2.5 – a) Provete para ensaios de delaminação, e b) provete para ensaios de resistência ao corte pela linha de cola [mm]

#### 2.2.4 Fatores que influenciam a colagem

Segundo Gaspar (2006), não é possível estabelecer regras gerais de colagem, porque os resultados dependem não só das características de fabrico (p. ex. tempo em aberto, tempo em fechado, pressão de aperto, tempo de pressão), como também dependem das características intrínsecas de cada espécie de madeira e do tipo de cola usado. Segue-se uma apresentação de estudos que analisaram a influência na qualidade de colagem: i) das características de cada espécie, e ii) do tipo de cola usado.

##### Espécie

A espécie de madeira a usar na produção de MLC tem grande influência na qualidade/facilidade da colagem. Associados a cada espécie existem diversos parâmetros, tanto físicos como mecânicos, que têm influência na qualidade da colagem, tais como: massa volúmica, teor de água, porosidade, coeficientes de retração, preparação da superfície, extrativos, defeitos e pH (Gaspar, 2006).

Podem-se criar dois grandes grupos de espécies: espécies folhosas e espécies resinosas. De uma forma geral, as espécies resinosas caracterizam-se por serem espécies de madeira branda, por outro lado, as espécies folhosas são espécies de madeira mais dura.

Na EN 14080 (CEN, 2013) constam uma lista de 17 espécies que, devido à recente investigação nesse sentido, foram dadas como aptas ao fabrico de MLC. As espécies enunciadas são as seguintes: 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*), Choupo (*Populus x euroamericana* cv “Robusta”, “Dorskamp”, “I214” e “I4551”), Pinheiro radiata (*Pinus radiata*), Espruce americano (*Picea sitchensis*), “Southern Yellow pine” (*Pinus palustris*), Tuia-gigante (*Thuja plicata*), e “Yellow Cedar” (*Chamaecyparis nootkatensis*).

Como se pode observar, o Pinheiro Bravo (*Pinus pinaster*) consta desta lista, sendo que é uma das espécies com maior percentagem na floresta portuguesa e será a espécie objeto neste estudo. Também o Choupo está nesta lista, contudo os clones de Choupo existentes em Portugal não correspondem aos que constam da lista (Martins, 2015). Em Custodio et al (2009) é apresentada uma tabela, onde para diversas espécies são expostas as propriedades que poderão causar problemas nas colagens. Para o Pinheiro Bravo, os autores relatam uma forte presença de resina e uma elevada acidez natural da espécie.

Com o intuito de estudar a viabilidade de cada espécie, têm sido realizados diversos estudos, que analisam a influência dos parâmetros dependentes de cada espécie na colagem. Na bibliografia consultada, são tidos como mais relevantes: a influência da massa volúmica, dos coeficientes de retração e das condições de superfície.

Vick (1999) refere que, até valores de massa volúmica entre 700 a 800 kg/m<sup>3</sup>, a resistência da linha de cola aumenta com o aumento da massa volúmica, para valores superiores, o aumento da massa volúmica leva a um decréscimo da resistência da linha de cola. Gaspar (2006) afirma que, para valores elevados de massa volúmica, existe menor penetração de cola na madeira levando assim a que a rotura passe a ocorrer pela linha de cola. É também referido que o comportamento de uma dada espécie está também dependente da cola usada. Plaster et al (2008) conduziram a um estudo onde analisaram a influência da variação da massa volúmica na qualidade da colagem através de ensaios de resistência ao corte e avaliação da percentagem de rotura pela madeira. Para madeira de Eucalipto (*Eucalyptus sp.*) foram agrupadas as colagens por 3 classes distintas entre si pela massa volúmica,  $\rho$ , ( $700 \leq \rho_1 < 800$  kg/m<sup>3</sup>;  $800 \leq \rho_2 < 900$  kg/m<sup>3</sup> e  $900 \leq \rho_3 < 1000$  kg/m<sup>3</sup>) e pelas combinações entre dois grupos possíveis. Foi também analisada a resistência ao corte da madeira maciça, que apresentou melhores resultados para a classe  $\rho_3$ . As classes  $\rho_1$  e  $\rho_2$ , nos ensaios de resistência ao corte das linhas de cola, foram aquelas que apresentaram melhores resultados. A rotura pela madeira foi claramente superior para as classes de massa volúmica inferiores.

Variações do teor de água levam a retrações ou inchamentos diferenciais que se podem quantificar pelos coeficientes de retração da espécie em causa. Nos elementos de MLC, quanto menores forem os coeficientes de retração, menores serão as tensões que podem resultar, na linha de colagem, devido a variações do teor de água. Nos estudos realizados por Bourreau et al (2013), para espécies: Laba-laba (*Qualea rosea*), Tapaiuna (*Dicorynia guianensis*) e Purpleheart (*Peltogyne venosa*), foram realizados ensaios de delaminação para analisar a influência que os coeficientes de retração de cada espécie tinham na colagem. Os autores concluíram que a maior delaminação ocorreu para a espécie com coeficientes de retração mais elevados (*Q. rosea*).

Para uma boa colagem, as superfícies devem apresentar-se planas, lisas e livres de defeitos, não devendo também apresentar queimaduras, óleos ou outros detritos (Gaspar, 2006). A forma como é realizado o acabamento das superfícies influencia a integridade das células na camada superficial da madeira. Knorz et al (2015) estudaram a influência que o acabamento superficial tinha na qualidade da colagem. Para madeira de Freixo (*Fraxinus Excelsior*) e para diversas colas (PRF, MUF, PUR e EPI) foram realizados ensaios de delaminação e resistência ao corte para três acabamentos diferentes de superfície: aplainadas, lixadas e serradas. Os resultados obtidos por delaminação variaram consoante o tipo de cola usado na colagem, sendo a menor delaminação registada para as colas PRF e MUF para uma superfície lixada. A maior delaminação registou-se nas superfícies aplainadas. Nos ensaios de corte, os melhores resultados foram obtidos, uniformemente para todos tipos de cola, para uma superfície serrada. Embora o aplainamento não seja o acabamento que conduza a uma colagem mais resistente este é o mais utilizado pela indústria dos lamelados colados devido às características económicas/operacionais relativamente a outros métodos.

#### Colas estruturais

As colas são o elemento mais importante no fabrico de MLC, pois são estas que garantem que as lamelas, quando devidamente coladas funcionam como um só elemento. As colas podem ser divididas em colas estruturais e colas não estruturais. Segundo Ebnesajjad (2008), as colas estruturais são colas que, para além de apresentarem resistência ao envelhecimento, apresentam uma resistência ao corte superior a 7 MPa. As colas não estruturais têm resistência inferior às colas estruturais, e são vulgarmente utilizadas para fins não estruturais.

Como já referido anteriormente, segundo a EN 301 (CEN, 2006), as colas podem ser divididas em dois grupos consoante a sua utilização. As colas do Tipo II são destinadas a uso em situações cujas temperaturas são inferiores ou iguais a 50°C e as humidades relativas inferiores a 85 %. As colas do Tipo I são habilitadas para uso nas condições não englobadas pelas do Tipo II.

Os principais componentes das colas são: ligantes, solventes, catalisadores (retardadores ou aceleradores), endurecedores, cargas e aditivos (Lampreia, 2010). O principal constituinte das colas é o ligante, pois é este que concede à cola a propriedade de adesão. Estes são, regra geral, constituídos por polímeros que tanto podem ser de origem natural como sintética. Os endurecedores levam a que se consiga uma distribuição uniforme dos componentes da cola pela superfície a colar (Lampreia, 2010). As funções dos restantes componentes das colas podem ser consultadas na bibliografia mencionada.

A utilização de cada tipo de cola, em uso industrial, requer sempre um conhecimento do comportamento da mesma com as espécies a colar. Para cada cola dever-se-á consultar a ficha técnica e/ou o fornecedor da cola em causa de forma a entender os procedimentos a seguir.

As colas usadas no fabrico de MLC são, regra geral, colas sintéticas e são classificadas por:

- i) Colas fenólicas e aminoplásticas (reações de condensação com o formaldeído)
  - a. Fenol-formaldeído (PF)
  - b. Resorcinol-formaldeído (RF)
  - c. Fenol- resorcinol-formaldeído (PRF)
  - d. Melanina-formaldeído (MF)
  - e. Ureia-formaldeído (UF)
  - f. Melanina-ureia-formaldeído (MUF)
- ii) Colas de formaldeído (único componente) (PUR)
- iii) Colas de emulsão de isocianato polimérico (EPI)

Segundo Gaspar (2006), as colas com maior relevo no mercado são as colas PRF, MUF e UF. As colas RF são as que têm melhor durabilidade e apresentam um bom desempenho em colagens difíceis, mas apresentam um custo elevado. As PRF são uma alternativa menos dispendiosa e com uma durabilidade aceitável, sendo estas as mais apreciadas no mercado. As colas PF, embora apresentem bons resultados, regra geral, necessitam de temperaturas elevadas para atingir a cura. As colas MUF, embora apresentem uma durabilidade inferior à da cola PRF, são uma boa alternativa a usar em ambientes com uma exposição mais exigente. Estas últimas apresentam uma vantagem significativa perante as outras, a sua cor clara, o que do ponto de vista estético tem bastante interesse.

Segue-se uma apresentação muito sucinta de estudos que fizeram variar o tipo de cola. Knorz et al (2015) analisaram a viabilidade de colagem de Freixo com PRF, MUF, PUR e EPI. Os ensaios de delaminação e de resistência ao corte indicaram que os melhores resultados (menor delaminação) se obtiveram para as colagens com a cola PRF, sendo os piores resultados obtidos para as colagens com a cola PUR.

Ammann et al (2016), no seu estudo, para as colas MUF, PUR, PRF e EPI e para madeira de Freixo, analisaram a influência da cola nos resultados de delaminação e resistência ao corte dos elementos. Os valores mais elevados de delaminação obtiveram-se para as colas PUR e os mais baixos para as colas MUF (não analisadas PRF). As maiores tensões de corte obtidas nos ensaios foram para as MUF, sendo as menores obtidas pelos ensaios para as PUR.

No estudo realizado por Bourreau et al (2013), estes referem que, para condições tropicais, a escolha das colas a usar, de entre as permitidas pela EN 301 (CEN, 2006), fica reduzida a apenas duas colas: MUF e PRF. Referindo ainda que as colas MUF são bastante sensíveis ao ambiente envolvente. Neste estudo, os autores procuraram ainda quantificar os parâmetros que permitem obter a melhor colagem, sendo estes: quantidade de cola, tempo em fechado e pressão de aperto.

Da análise dos diversos estudos aqui apresentados é possível verificar que não existe uma cola que seja a ideal para as colagens. Deve-se sempre ter em consideração o comportamento entre a cola e a espécie em causa, bem como dos diversos parâmetros da colagem que conduzem a uma colagem mais eficaz. São exemplo desses parâmetros: a pressão de aperto, a quantidade de cola, o tempo em fechado, e as condições de cura.

## **2.3 Produtos preservadores e fase de aplicação**

### Produtos preservadores

Os produtos preservadores são substâncias químicas que têm como objetivo conceder aos elementos de madeira uma maior durabilidade face a ataques biológicos. Consoante as condições de serviço em que os elementos de madeira sejam aplicados, o risco de ataques biológicos difere. A NP EN 335-2 (IPQ, 2011) estabelece classes de risco relativamente aos agentes biológicos que podem atacar a madeira. Na Tabela 2.1 apresenta-se um quadro resumo das classes de risco para madeira.

No entanto, algumas espécies de madeira apresentam diferente capacidade natural para resistir ao ataque de agentes biológicos sem qualquer recurso a tratamentos de preservação, chamada durabilidade natural. Na EN 350-2 (CEN, 1994a) podem ser consultadas as durabilidades naturais e impregnabilidade natural das espécies que se comercializam na Europa. Na Tabela 2.2 apresenta-se a durabilidade natural e impregnabilidade da espécie de Pinheiro Bravo.

Os produtos preservadores podem ser classificados em três grupos: oleosos, aquosos e em solvente orgânico.

Os produtos oleosos têm as particularidades de terem um odor forte, provocarem manchas e não permitirem que seja aplicado um produto de acabamento. Devido às razões apresentadas estes produtos não são apropriados para aplicação no interior de edifícios, sendo habitual o seu uso no exterior e/ou em contacto com a água salgada, onde têm um bom desempenho (Gaspar, 2006). São exemplos destes produtos o creosote e o óleo de antraceno.

Os produtos aquosos não apresentam os inconvenientes dos anteriores, podem ser aplicados no interior dos edifícios (Gaspar, 2006). Estes produtos são soluções com sais minerais dissolvidos em água, sendo as suas principais substâncias ativas: o cobre, o arsénio, o boro e o flúor, na maior parte das vezes misturados com sais de crómio para fixação. São exemplos destes produtos o cobre-crómio-arsénio (CCA), o cobre-crómio-boro (CCB), entre outros.

Os produtos em solventes orgânicos são geralmente utilizados com solventes voláteis. O produto mais importante deste género é o pentaclorofenol, geralmente dissolvido em óleos ou

hidrocarbonetos leves. É exemplo deste tipo de produto, o produto usado neste estudo, o TANALITH E 8001.

Tabela 2.1 - Classes de risco de ataque por agentes biológicos (Lampreia, 2010)

Classe de risco		Situações gerais de serviço	Exposição à humidade Teor de água da madeira	Agentes biológicos relevantes
1	Interior seco	Pavimentos, lambris	Seca 20 % no máximo	Carunchos
2	Interior com risco de humificação	Estruturas de cobertura, estruturas de paredes	Ocasionalmente > 20 %	Carunchos, Térmitas, Fungos cromogéneos e bolores Podridão castanha
3	3.1 Exterior, sem contacto com o solo e protegido	Caixilharias e portas exteriores	Ocasionalmente > 20 %	Carunchos, Térmitas, Fungos cromogéneos Podridão castanha Podridão branca
	3.2 Exterior, sem contacto com o solo e não protegido	Decks sem contacto com o solo, pérgulas, painéis de vedação	Ocasionalmente > 20 %	
4	4.1 Exterior, junto de/em contacto com o solo e/ou água doce	Decks em contacto com o solo ou junto de piscinas	Predominantemente ou permanentemente > 20 %	Carunchos, Térmitas, Fungos cromogéneos Podridão castanha Podridão branca Podridão mole
	4.2 Exterior, enterrado no solo (severo) e/ou água doce	Fundações em água doce, postes de vedação, postes de transmissão aérea	Predominantemente ou permanentemente > 20 %	
5	Na água salgada	Pontões, fundações em água salgada	Permanentemente > 20 %	Xilófagos marinhos (= CR4, na parte dos elementos fora de água)

Tabela 2.2 – Durabilidade natural e impregnabilidade do Pinheiro Bravo (adaptado de Gaspar (2006))

Espécie	Durabilidade natural				Impregnabilidade	
	Fungos <sup>1</sup>	<i>Hylotrupes</i> <sup>2</sup>	<i>Anobium</i> <sup>2</sup>	Térmitas <sup>3</sup>	Cerne	Borne
<b>Pinheiro Bravo</b>	Pouco a medianamente durável	Suscetível de sofrer ataque	Suscetível de sofrer ataque	Suscetível de sofrer ataque	Extremamente difícil	Fácil
1 – Relativamente ao cerne. Borne é considerado não durável 2 – Relativamente ao borne. Cerne é considerado durável 3 – Relativamente ao cerne. Borne é considerado suscetível NOTA: <i>Hylotruoes e Anobium</i> são espécies de caruncho						

No final do século XX, havia grande variedade de produtos preservadores. Contudo, com uma crescente consciencialização de preservação do ambiente e da saúde humana, levou a que a normalização que englobava estes materiais fosse mais exigente levando a que muitos deles acabassem por sair do mercado, como por exemplo o produto CCA (cobre-crómio-arsénio) (Gaspar, 2010). Recentemente, a investigação neste campo tem levado a que surjam novos produtos sem grandes perigos, quer para a saúde humana, quer para o ambiente. Especial

atenção para os produtos preservadores orgânicos à base de azóis de cobre (CuAz), recentemente desenvolvidos, e que proporcionam uma durabilidade bastante aceitável aos elementos de madeira, como por exemplo o produto TANALITH E 8001, usado neste trabalho.

#### Fase de aplicação do tratamento

O tratamento aplicado poderá ser superficial (pinturas) ou em profundidade (impregnação). Este último é recomendado para classes de serviço 3, ou seja, para condições ambientais mais adversas (Martins, 2015). Para que se aplique tratamento em profundidade de forma eficaz é necessário garantir que a madeira usada é facilmente impregnável, como é o caso do Pinheiro Bravo (borne). A aplicação de tratamento em profundidade faz-se, regra geral, recorrendo a um equipamento de Autoclave, através do qual se aplicam ciclos de vácuo e pressão em que a madeira a tratar é imersa em produto preservador.

De forma a garantir a durabilidade da MLC surgem duas hipóteses relativas à fase de aplicação do tratamento: i) madeira tratada antes da colagem, e ii) madeira tratada depois da colagem como produto final. Ambas as situações apresentam aparentemente vantagens e desvantagens que passarão a ser elencadas na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Vantagens e desvantagens das diferentes fases de aplicação de Tratamento preservador

	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
<b>Madeira tratada antes da colagem</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Variedade alargada de dimensões e formas que os elementos podem ter;</li> <li>• Em operações de corte ou afagamento, o material exposto está protegido.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diminuição da resistência à delaminação para taxas de retenção de produto preservador elevadas;</li> <li>• Incompatibilidades existentes entre colas e produtos preservadores;</li> <li>• Perda de madeira tratada com o aparelhamento (necessário definir uma penetração de produto preservador mínima);</li> <li>• Risco para a saúde que as poeiras levantadas com o aparelhamento podem causar.</li> </ul>
<b>Madeira tratada depois da colagem</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Proteção adequada da madeira (se tratada após furação e corte);</li> <li>• Menor desperdício de madeira tratada;</li> <li>• Tratamento não afeta os processos de colagem.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alterações dimensionais e empenos durante a secagem (se o tratamento for aquoso);</li> <li>• Alteração do teor de água dos elementos finais;</li> <li>• Impedimento de penetração de produto preservador pelas linhas de cola;</li> <li>• Possíveis incompatibilidades entre as dimensões dos elementos e sistemas de aplicação de produto preservador em profundidade.</li> </ul>

Se o tratamento for aplicado antes da colagem, o tratamento é aplicado na madeira posteriormente à obtenção de tábuas por corte dos toros de madeira. Após aplicação do

tratamento é necessário que ocorra a secagem da madeira, de forma a que o teor de água da madeira diminua. Após o teor de água atingir os limites estabelecidos, as tábuas de madeira entram no ciclo de fabrico de MLC, apresentado na Figura 2.3, antes do procedimento de classificação mecânica.

Nas situações de tratamento aplicado depois da colagem, deve-se proceder ao ciclo completo de fabrico de MLC em que as lamelas são coladas sem qualquer tipo de tratamento. Após aparelhamento do produto final de MLC, esses elementos deverão ser sujeitos a aplicação de tratamento preservador. Após sua aplicação, dever-se-á proceder à cura e/ou secagem dos elementos.

## 2.4 MLC de Pinheiro Bravo

Em Portugal, segundo Gaspar (2010), a MLC pode ter dois tipos de proveniência. A primeira passa por importar o produto acabado sob dimensões comuns, que geralmente são fabricados em Espruce. A segunda alternativa passa pela aquisição de matéria-prima, regra geral da espécie Espruce, e seguinte fabrico dos elementos em unidades para tal preparadas. Contudo, recentemente a indústria portuguesa tem dado alguns passos na iniciação de fabrico de MLC com Pinheiro Bravo (Martins, 2015). Segue-se assim nesta subsecção uma análise dos estudos realizados para a MLC de Pinheiro Bravo tratado e não tratado.

Com o intuito de estudar a viabilidade do Pinheiro Bravo no fabrico de MLC nas últimas décadas foram desenvolvidos alguns estudos, alguns já com a variante do Pinheiro Bravo ter sofrido tratamento anterior à colagem. São exemplo desses estudos: Franco da Costa (1978), Cruz (1985), Pontífice de Sousa (1990), Gaspar (2006), Gaspar (2010), Lampreia (2010) e Silva (2010).

### Madeira de Pinheiro Bravo não tratado

Citado por Lampreia (2010), Franco da Costa (1978) levou a cabo um estudo para avaliar a resistência à tração transversal, delaminação e corte da linha de cola de elementos de MLC de Pinheiro Bravo colados com cola do tipo PRF. O autor observou neste estudo que, para a cola utilizada a colagem foi mais eficiente em zonas onde havia menor quantidade de resina. Os ensaios de corte permitiram concluir que a resistência ao corte cola foi 30 % superior à da madeira, o que permitiu concluir que a cola possui características mecânicas superiores às da madeira.

Também citado por Lampreia (2010), Cruz (1985) produziu em laboratório 15 vigas de MLC de Pinheiro Bravo não tratada, com uma cola do tipo RF, com dimensões - 0,15 m x 0,12 m x 0,75 m, com 6 lamelas de 2 cm de espessura cada e com uma pressão de aperto de 0,6 MPa.

Foram realizados neste estudo ensaios de corte pela linha de cola e ensaios de delaminação para avaliar a influência da massa volúmica da madeira nas colagens, bem como a relação entre a carga de rotura ao corte pela madeira e pela linha de cola. Os resultados obtidos permitiram concluir do bom comportamento deste tipo de cola no fabrico de MLC com madeira de Pinheiro Bravo tanto a nível de delaminação como de rotura pela madeira.

Pontífice de Sousa (1990) realizou um estudo com 15 vigas de MLC de Pinheiro Bravo de dimensões – 3,75 m x 0,08 m x 0,18 m - coladas com cola do tipo PRF, com 6 lamelas de 3 cm de espessura cada e com uma pressão de aperto de 0,6 MPa. Primeiramente foram realizados ensaios de flexão estática e de seguida foram retirados provetes para ensaios de delaminação e de corte pela linha de cola. Foram também realizados ensaios de flexão sobre as ligações de topo. Com este estudo, o autor aferiu a viabilidade tanto a nível mecânico como a nível económico do fabrico de estruturas de MLC com Pinheiro Bravo.

Até então, nenhum dos estudos realizados tinha verificado a viabilidade de colagem de MLC de Pinheiro Bravo tratado, o que limitava a utilização desta espécie em classes de serviço 1 e 2. Sabendo das boas características do Pinheiro Bravo para receber tratamento, surgiram os estudos de Gaspar (2006), Gaspar (2010) e Lampreia (2010), que vieram analisar a viabilidade do uso de MLC de Pinheiro Bravo tratado em classe de serviço 3. Silva (2010) conduziu a um estudo onde analisou a viabilidade do uso de vigas de MLC de Pinheiro Bravo, tratado com creosote, em caminhos de ferro.

#### Madeira de Pinheiro Bravo tratado

Gaspar (2006) conduziu um estudo com MLC de Pinheiro Bravo tratado com produto preservador TANALITH E 3492 (grupo dos azóis de cobre) com aptidão para ser utilizado em classes de risco 3 e 4. De um total de 27 vigas, foram criados 3 subgrupos variando a taxa de retenção de tratamento: i) sem tratamento; ii) tratamento com taxa de retenção de 7,1 kg/m<sup>3</sup> e iii) tratamento com taxa de retenção de 16,4 kg/m<sup>3</sup>. Dentro de cada subgrupo o autor fez ainda variar a pressão de aperto para os valores: 0,6 MPa, 0,9 MPa, e 1,12 MPa. As vigas fabricadas tinham dimensões – 2,88 m x 0,15 m x 0,08, com 5 lamelas de 30 mm de espessura cada, e foram coladas com uma cola do tipo PRF (Prefere 4099 e endurecedor Prefere 5824). Foram para isso realizados ensaios de flexão das vigas, flexão das ligações de topo, ensaios de delaminação e ensaios de resistência ao corte. De forma geral, com o estudo o autor verificou que os maiores valores de delaminação ocorreram em provetes onde tinha sido utilizada uma maior pressão de aperto na junção das lamelas e em provetes onde a taxa de retenção de tratamento foi mais elevada (16,4 kg/m<sup>3</sup>).

Como os resultados anteriores não foram os propícios ao uso de MLC de Pinheiro Bravo em classe de risco mais severas, o mesmo autor desenvolveu um estudo, Gaspar (2010), onde

avaliou o efeito da temperatura de cura no desempenho das colagens e avaliou também o efeito da variação da taxa retenção de produto preservador no desempenho das colagens. Foram para isso fabricadas 12 vigas de MLC de Pinheiro Bravo variando entre si, as taxas de retenção de tratamento: i) sem tratamento, ii) 7,1 kg/m<sup>3</sup> e iii) 16,4 kg/m<sup>3</sup> e variando também as temperaturas de cura: i) 20 °C, ii) 30 °C, iii) 40 °C, e iv) 45 °C. As vigas tinham dimensões – 1,0 m x 0,112 m x 0,08 m, 4 lamelas de 28 mm cada, sendo para o seu fabrico utilizada uma cola do tipo PRF (Prefere 4099 e endurecedor Prefere 5829) e a pressão de aperto aplicada foi de 0,6 MPa. Foram realizados ensaios de resistência da linha de cola face à delaminação e ao corte. Dos resultados dos ensaios de corte o autor observou que a variação dos parâmetros avaliados não influenciou os resultados. Quanto à delaminação, o autor observou que o aumento da temperatura de cura levou a uma diminuição da delaminação. Ainda neste estudo, o autor colocou vigas de MLC sujeitas a um envelhecimento natural (vigas de MLC expostas a ambientes atmosféricos), de onde observou que, quando sujeitas a condições naturais, as colagens das vigas iam diminuindo significativamente a sua resistência ao corte e a resistência à delaminação.

O estudo de Lampreia (2010), tendo por referência os resultados obtidos por Gaspar (2006) e Gaspar (2010), avaliou a possibilidade e a eficácia do uso de primários na qualidade de fabrico de elementos de MLC de Pinheiro Bravo tratado (TANALITH E 3492 (18,0 kg/m<sup>3</sup>) e TANALITH E NB (15,6 kg/m<sup>3</sup>)) e não tratado. Foram assim usadas 18 vigas de MLC de dimensões – 1,0 m x 0,12 m x 0,12 m, constituídas com 4 lamelas de 30 mm cada e fabricadas com uma pressão de aperto de 0,6 MPa, uma temperatura ambiente durante todos os processos de 20 °C e humidade relativa de 65 %. A cola usada nestes estudos foi do tipo PRF (Prefere 4040 e endurecedor Prefere 5839). No estudo foi variada a condição dos primários, criando as seguintes situações: sem primário, primário n-HMR com 5% de concentração e primário n-HMR com 10% de concentração. No seu estudo, para colagens sem aplicação de primário, a autora obteve para madeira sem tratamento uma delaminação média de 1,3% e uma resistência ao corte da linha de cola média de 13,4 MPa. Para a madeira com tratamento TANALITH E 3492, a autora registou uma delaminação total média de 0,9% e uma resistência média ao corte pela linha de cola de 14,6 MPa. Para madeira com tratamento TANALITH E NB uma delaminação total média de 1,3% e uma resistência média ao corte pela linha de cola de 14,0 MPa. Deste estudo, a autora concluiu com os ensaios de resistência à delaminação e ao corte, que para a cola utilizada e para as diversas condições de tratamento, os resultados são igualmente satisfatórios, quer se utilize primários ou não. A autora concluiu ser desnecessário o uso de primários na obtenção de resultados que cumpram os estipulados pela normalização em vigor.

O estudo de Silva (2010), surge da necessidade de procurar uma alternativa para as travessas de madeira maciça tradicionais dos caminhos de ferro. Assim, este estudo pretendeu avaliar o comportamento da MLC de Pinheiro Bravo quando sujeita a um tratamento industrial com

creosote. Distintamente dos estudos anteriores mencionados, neste estudo foram adquiridos os elementos de MLC já fabricados, colados com cola do tipo MUF (10 elementos) e RF (10 elementos). Os elementos tinham dimensões de 0,14 m x 0,26 m x 0,35 m e antes de submetidos a ensaios de resistência ao corte e delaminação foram submetidos a tratamento por Autoclave com creosote. Após tratamento, o autor observou que as vigas apresentavam algumas fissuras pela linha de cola e fissuras de secagem na madeira. Com o decorrer dos ensaios, constatou-se que as colagens tinham ocorrido de forma deficiente, o que poderá ter influenciado os resultados. Foram realizados ensaios de delaminação a provetes sem tratamento e com tratamento. Para ambas as colas estudadas, na situação de MLC sem tratamento, alguns provetes já apresentavam uma delaminação superior aos limites estabelecidos, que o autor associou à colagem deficiente observada. Os resultados de delaminação em madeira tratada com ambas colas foram muito semelhante, sendo que aproximadamente 40% dos provetes apresentavam uma delaminação superior ao limite estabelecido. Dos ensaios de resistência ao corte, as colagens realizadas com MUF apresentaram uma menor resistência da linha de cola. Mais uma vez o autor salienta que os resultados desfavoráveis ao bom desempenho das colagens se deveram a uma colagem deficiente. O autor concluiu que a viabilização do uso de MLC em travessas de caminho de ferro tratadas com creosote está dependente de um apertado controlo de produção de MLC.

De momento está a ser realizado o estudo de Martins (2015), que visa, entre outros objetivos, levar a cabo uma análise da qualidade de colagem de Pinheiro Bravo tratado e não tratado. Neste estudo o autor pretende avaliar a possibilidade de utilizar outras colas disponíveis no mercado que não as já validadas em estudos anteriores, bem como alguns parâmetros relacionados com a colagem.

Como se viu nos estudos anteriores, a MLC de Pinheiro Bravo tratado apresenta alguns entraves ainda no seu fabrico. Com a necessidade de obter um produto possível de ser aplicado em classe de serviço 3, deve-se assim analisar a viabilidade de procedimentos alternativos de tratamento de madeira. Será assim, complementarmente ao estudo de Lampreia (2010) analisada a viabilidade de colagem de Pinheiro Bravo tratado com colas PRF (Prefere 4040 e endurecedor Prefere 5839) e MUF (KOMARTEX M e endurecedor KOMARTEX M), através de ensaios delaminação e resistência ao corte da linha de cola. Em todos os estudos anteriores, foram estudadas as seguintes condições: i) colagem de madeira sem tratamento e ii) colagem de madeira cujo tratamento é aplicado anteriormente à colagem das lamelas, contudo neste trabalho, para além das condições anteriores, será ainda estudada a viabilidade da aplicação do tratamento após a colagem das lamelas.

## 3 TRABALHO EXPERIMENTAL

### 3.1 Objetivos

O principal objetivo do trabalho experimental foi avaliar a influência que a fase de aplicação de tratamento preservador em profundidade, tem na qualidade de colagem de madeira de Pinheiro Bravo. Este estudo é complementar à Tese de Doutorado que está a ser desenvolvida atualmente por Martins (2015) que tem como tema: “Avaliação estrutural de elementos de madeira lamelada colada”. O trabalho experimental foi realizado no laboratório do SerQ – Centro de Inovação e Competências da Floresta, e utilizando os equipamentos presentes neste laboratório.

Foram criadas três situações de aplicação do tratamento na madeira: i) madeira sem tratamento (MST); ii) madeira tratada antes da colagem (MTAC), e iii) madeira tratada depois da colagem (MTDC). O tratamento preservador aplicado em profundidade por Autoclave foi realizado com o produto TANALITH E 8001, de modo a garantir proteção adequada à Classe de Risco 4.

O trabalho experimental desenvolvido compreendeu o fabrico em laboratório de 22 elementos, com 1m de comprimento. Estes foram fabricados com dois tipos de colas distintos na sua composição base e sujeitos às diferentes condições de tratamento já referidas. A qualidade das colagens foi avaliada através de ensaios de resistência à delaminação e de resistência ao corte pelas linhas de cola, de acordo com a EN 14080 (CEN, 2013). Foi também avaliada a resistência ao corte pela madeira.

### 3.2 Materiais

#### 3.2.1 Madeira

Para execução deste trabalho foi solicitada madeira de Pinheiro Bravo não tratada e tratada com um tratamento adequado para aplicação em classe de serviço 3. Foram assim gentilmente fornecidas pela empresa Pedrosa e Irmãos, Lda. dois lotes de tábuas serradas de madeira de Pinheiro Bravo (*Pinus Pinaster* Ait.), um deles com madeira sem tratamento e outro com madeira com o tratamento TANALITH E 8001.

Solicitou-se à empresa fornecedora que o tratamento aplicado nas tábuas fosse indicado para Classe de Risco 3, tal como nos trabalhos desenvolvidos por Gaspar (2006), Gaspar (2010) e Lampreia (2010). Tal situação não foi possível, visto que atualmente a empresa só tinha possibilidade de aplicar o produto com uma taxa de retenção indicado para aplicação em Classe de Risco 4, o TANALITH E 8001. O tratamento TANALITH E 8001 é caracterizado por ser hidrossolúvel, sendo adquirido pela entidade que aplicou o tratamento em estado concentrado e a sua impregnação na madeira ser realizada em autoclave sob ação de vácuo e pressão. Segundo a empresa que realizou a impregnação do tratamento, a quantidade de produto retido na madeira, tanto nas tábuas como nos elementos sujeitas a tratamento posterior à sua colagem, foi de 31,2 kg/m<sup>3</sup>. A composição química do produto TANALITH E 8001 apresenta-se na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Composição química do tratamento preservador TANALITH E 8001 e respectivas quantidades.

Composição do Produto	Quantidade [% m/m]
Carbonato de Cobre	14,55 (8% Cu)
Cloreto de Didecildimetilamónio [DDAC]	0,5
Tebuconazole	0,16
Propiconazole	0,16

Após receção das tábuas em laboratório, tanto da madeira não tratada como da madeira tratada, foram armazenadas numa sala climatizada às condições de 20°C de Temperatura (T) e 65% de Humidade Relativa (HR). Procedeu-se à identificação das tábuas, medição das dimensões (secção transversal e comprimento) e à sua pesagem, para que fosse possível determinar a massa volúmica de cada elemento. Procedeu-se também à medição do teor de água de cada tábua, sendo que para isso se recorreu a um humidímetro de agulhas (Figura 3.1). A medição do teor de água com um humidímetro de agulhas foi feita seguindo o procedimento apresentado na norma EN 13183-2 (CEN, 2002b), onde se indica que a medição deverá ser feita no mínimo a 0,3 m do topo e cravado a uma profundidade de 30% da espessura da tábua. Por tábua foram realizadas 3 medições de teor de água, a 0,6 m de cada topo e a meio vão. Foi também nesta fase feito um levantamento dos defeitos mais evidentes (nós, bolsas de resina e descaio) e que pudessem afetar a qualidade da colagem.

As tábuas de ambos os lotes apresentavam dimensões médias de 0,04 x 0,11 x 2,50 [m], espessura, largura e comprimento, respetivamente. O lote MST apresentava um teor de água médio de 13 %. Por outro lado, o lote MTAC apresentava um teor de água médio de 18 % (medido com o humidímetro de agulhas). Com o intuito de aferir a validade das medições realizadas no lote MTAC com o humidímetro de agulhas foram recolhidas algumas amostras de tábuas em que foram realizadas medições com o referido equipamento e de seguida

determinado o teor de água em estufa (ver procedimento em 3.3.1). Dos resultados obtidos verificou-se que o humidímetro indica valores de teor de água superiores aos determinados em estufa (3,5% em média). Esta verificação permitiu concluir que todas as tábuas do lote se encontravam em condições de serem coladas.



Figura 3.1 - Determinação do teor de água das tábuas através do humidímetro de agulhas.

A EN 384 (CEN, 2004) indica que sempre que o teor de água seja superior a 12%, a massa volúmica deverá ser reduzida 0,5% do seu valor por cada ponto percentual de teor de água. Se o teor de água for inferior a 12%, a massa volúmica deverá ser aumentada 0,5% por cada ponto percentual de teor de água. Após correção de teor de água, o lote de madeira sem tratamento apresentava uma massa volúmica média de  $630 \text{ kg/m}^3$  com mínimo e máximo de  $530 \text{ kg/m}^3$  e  $737 \text{ kg/m}^3$ , respetivamente. O lote de madeira com tratamento apresentava uma massa volúmica média de  $638 \text{ kg/m}^3$  com mínimo e máximo de  $570 \text{ kg/m}^3$  e  $734 \text{ kg/m}^3$ , respetivamente.

De modo a reduzir a influência da massa volúmica nos elementos a colar, optou-se por distribuir as diversas tábuas de cada lote de modo a que a média das 4 tábuas se aproximasse da massa volúmica média do respetivo lote. Para que tal ocorresse optou-se pela seguinte distribuição de massas volúmicas por lamela: i) lamela 1:  $<600 \text{ kg/m}^3$ ; ii) lamela 2 e lamela 3:  $600 \text{ kg/m}^3$  a  $650 \text{ kg/m}^3$ ; e iii) lamela 4:  $> 650 \text{ kg/m}^3$ .

### 3.2.2 Colas

A colagem das lamelas de madeira foi feita utilizando duas colas estruturais do tipo I, uma do tipo PRF (Phenol-Resorcinol-Formaldeído) e a outra do tipo MUF (Melamina-Ureia-Formaldeído). Ambas as colas com possibilidade de serem aplicadas em ambiente exterior, ou seja, classe de serviço 3. A qualidade das colagens de madeira de Pinheiro Bravo com cola PRF tem sido alvo de diversos estudos e caracteriza-se por apresentar resultados favoráveis ao seu uso. Devido à sua cor branca, as colas MUF apresentam uma alternativa interessante no fabrico de MLC, contudo na bibliografia consultada nenhum dos estudos anteriores avaliou a qualidade das colagens com essa cola na espécie de Pinheiro Bravo.

Com o intuito de utilizar a mesma cola que Lampreia (2010), procurou-se contactar a empresa Dynea que gentilmente forneceu a cola Prefere 4040 e o endurecedor Prefere 5839 (Figura 3.2 a)). Para obtenção da cola do tipo MUF foi contactada a empresa Colquímica que também gentilmente forneceu a cola KOMARTEX M e o respetivo endurecedor KOMARTEX M (Figura 3.2 b)). A mistura das colas com os endurecedores será daqui em diante designada apenas por cola PRF e cola MUF (respetivamente).



Figura 3.2 – a) Cola Prefere 4040 e o endurecedor Prefere 5839; e b) Cola KOMARTEX M e o endurecedor KOMARTEX M.

Ambas as colas requeriam que, antes da colagem, fosse feita a mistura com o Endurecedor. Tal como indicado pela ficha técnica de ambas as colas, a relação entre cola/endurecedor na mistura foi de 100/20. Todo o processo de colagem (mistura cola/endurecedor, aplicação de cola e prensagem) foi realizado em ambiente climatizado à temperatura de 20°C e humidade relativa de 65%.

Para a cola PRF, a ficha técnica recomenda que o rendimento da cola seja entre 200 g/m<sup>2</sup> e 500 g/m<sup>2</sup> quando a cola seja aplicada em apenas uma superfície das duas lamelas a colar. Adotou-se o valor médio entre os dois limites, ou seja, 350 g/m<sup>2</sup>. A mesma ficha técnica recomenda que o tempo em aberto seja o mínimo possível e que um tempo em fechado entre 5 e 10 minutos é benéfico para a colagem. Ainda na ficha técnica, é recomendado que a pressão de aperto seja entre 0,6 MPa e 1,0 MPa e que para a temperatura de 20 °C o tempo de pressão seja de 240 minutos.

A ficha técnica da cola MUF recomenda um rendimento entre 300 g/m<sup>2</sup> e 500 g/m<sup>2</sup>. À semelhança da cola PRF, adotou-se o valor médio entre os dois limites, ou seja, 400 g/m<sup>2</sup>. Segundo a mesma ficha técnica, o tempo em aberto recomendado é também o mínimo possível e o tempo em fechado é recomendado que este seja entre 10 e 15 minutos. Em relação á pressão de aperto, é recomendada uma pressão entre 0,6 MPa e 1,0 MPa e deve ser aplicada durante 540 minutos se a temperatura ambiente for 20 °C.

### 3.3 Fabrico dos elementos

#### 3.3.1 Planeamento e preparação das colagens

Com o intuito de avaliar a fase de tratamento na qualidade da colagem foram fabricados no laboratório do SerQ (Centro de Inovação e Competências da Floresta) 22 elementos, cada uma constituída pela colagem de 4 lamelas devidamente preparadas e organizadas.

Para cada tipo de cola foram fabricados: i) 3 elementos de madeira sem tratamento (MST), ii) 4 elementos de madeira tratada antes da colagem (MTAC), e iii) 4 elementos madeira tratada depois da colagem (MTDC). A numeração/nomenclatura dos elementos fabricadas foi a descrita na Tabela 3.2.: A nomenclatura adotada justifica-se pelo enquadramento do presente trabalho num outro estudo a decorrer em paralelo por Martins (2015).

Tabela 3.2 – Elementos fabricados nas diferentes condições

	Cola PRF	Cola MUF
MST	PRF_19	MUF_23
	PRF_29	MUF_39
	PRF_30	MUF_40
MTAC	PRF_T15	MUF_T1
	PRF_T16	MUF_T2
	PRF_T17	MUF_T3
	PRF_T18	MUF_T4
MTDC	PRF_31	MUF_35
	PRF_32	MUF_36
	PRF_33	MUF_37
	PRF_34	MUF_38

Em primeiro lugar foram aparelhadas as tábuas e só depois cortadas nas dimensões requeridas para o fabrico. À semelhança de trabalhos anteriores (Lampreia, 2010), foi considerado fabricar elementos com comprimento de 1,00 m, e para a secção transversal, as dimensões de 0,12 m de altura (4 lamelas de 0,03 m) e 0,11 m de largura. As tábuas apresentavam um comprimento médio de 2,50 m, e após o aparelhamento de cada tábua, foram obtidas, duas lamelas de 1,00 m que foram usadas para fabricar os elementos. Neste processo houve tábuas das quais só resultou uma lamela, eliminando a outra lamela devido à presença excessiva de defeitos que poderiam afetar a qualidade de colagem.

As tábuas foram agrupadas de forma a ser possível obter dois elementos por cada processo de fabrico. Para cada grupo de dois elementos, os processos de aparelhamento, colagem e prensagem (assemblagem) das tábuas foi todo realizado no mesmo dia.

### 3.3.2 Aparelhamento, colagem e montagem

À semelhança de estudos anteriores, procurou-se obter uma espessura de 0,03 m para cada lamela. Procedeu-se assim ao aparelhamento das tábuas recorrendo a uma aparelhadora. Observou-se que, após o aparelhamento, nos topos de algumas tábuas, a espessura era ligeiramente inferior à restante tábua. De forma a garantir uma colagem eficaz em todo o comprimento do elemento, após o aparelhamento, os topos que apresentavam um valor de espessura diferente da espessura da restante tábua foram cortados. O tempo que decorreu desde o aparelhamento até à colagem foi sempre o menor possível, nunca superior a 6 h, valor limite estipulado pela EN 14080 (CEN, 2013).

Com o intuito de garantir um controlo eficiente do teor de água das lamelas a colar, como indicado pelo Anexo G da EN 14080 (CEN, 2013), foi realizada uma verificação do teor de água pelo método de secagem em estufa exposto na norma EN 13183-1 (CEN, 2002a). As peças a colocar no forno foram cortadas das tábuas após o seu aparelhamento com uma dimensão média na direção das fibras de 0,05 m e cortada a uma distância nunca inferior a 0,3 m de um dos topos. De cada tábua aparelhada foi retirada uma peça para ensaio. Antes de colocadas no forno foi realizada a medição das dimensões das peças e a medida a sua massa ( $m_1$ ). Foram então colocadas as peças num tabuleiro no interior do forno a uma temperatura de 103°C ( $\pm 2^\circ\text{C}$ ). Sempre que possível, num intervalo de tempo superior a 2 h, foi feita a pesagem das peças recorrendo a uma balança com precisão de 0,01 g. Quando a diferença entre duas pesagens consecutivas foi inferior a 0,1%, deu-se por terminado o ensaio e registou-se a massa seca de cada peça ( $m_0$ ). Através da equação (1) determinou-se o teor de água ( $w$ ) de cada peça de madeira. Observou-se portanto que todas as tábuas de madeira utilizadas nas colagens cumpriam com os limites de teor de água estipulados pela EN 14080 (CEN, 2013).

$$w (\%) = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100 \quad (1)$$

O processo de aparelhamento e corte das tábuas em duas lamelas de 1m conduziu a que fosse feita nova medição de massas e dimensões para reajustar a distribuição das massas volúmicas das 4 lamelas afetas a cada elemento. Com o intuito de minimizar a influência da massa volúmica nos resultados e criar condições semelhantes de massas volúmicas em cada plano de colagem, as lamelas foram ordenadas de forma a respeitar uma disposição alternada de massas volúmicas. Poderão observar-se as massas volúmicas de cada lamela, de cada elemento e de cada lote de madeira na Tabela A.2 do Anexo B. Procurou-se que a orientação das lamelas fosse a referida pela EN 14080 (CEN, 2013) para classes de serviço 3, cujo um exemplo se apresenta na Figura 3.3 a).

O processo de colagem iniciou-se com a mistura da cola com o endurecedor de forma a obter uma mistura homogénea. A cola foi aplicada apenas numa superfície de cada lamela, recorrendo a uma espátula denteada para espalhar a cola de forma uniforme e uma balança (16000g± 0,1g) de forma a contabilizar a quantidade de cola aplicada. Na Figura 3.3 b) é visível o processo de espalhamento de cola numa das lamelas a colar.

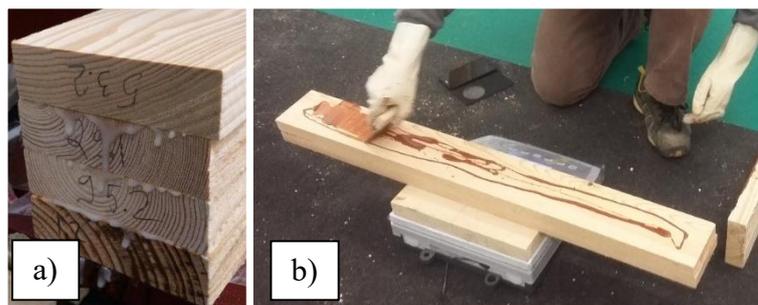


Figura 3.3 – a) Orientação das lamelas para classe de serviço 3; b) aplicação e espalhamento da cola numa lamela

Após aplicar a cola na superfície da lamela uniu-se a lamela seguinte e realizou-se o mesmo procedimento de colagem. Realizou-se este procedimento para as 4 lamelas até perfazer um elemento. Seguidamente realizou-se o mesmo procedimento para outro elemento e colocaram-se os dois elementos no sistema de prensagem. Em cada grupo de dois elementos, procurou-se que o segundo elemento a ser colado tivesse um tempo em fechado de acordo com o recomendado, o que levou a que o primeiro elemento ultrapassasse ligeiramente o tempo de fechado recomendado.

O sistema de aplicação da pressão de aperto nos elementos consistiu num conjunto de 6 atuadores de carga, cada um com capacidade máxima de aproximadamente 50 kN, controlados por uma central hidráulica, como se mostra na Figura 3.4. A pressão de aperto em cada elemento foi aplicada através de dois cilindros hidráulicos, sendo que, cada atuador de carga tinha uma área de contacto com a madeira de aproximadamente 0,05 m<sup>2</sup>. Durante todo o processo de prensagem a pressão de aperto foi monitorizada através de duas células de carga “RTN0.05/4.7t” nos dois atuadores livres, efetuando ajustes na força dos atuadores sempre que necessário.

Escolheu-se a pressão de aperto tendo por base os resultados obtidos no estudo complementar de Martins (2015) para colagens de madeira de Pinheiro Bravo com MUF e PRF. Foi adotada para este trabalho a pressão de aperto que levou a uma menor delaminação dos provetes de madeira e Pinheiro Bravo não tratada nesse mesmo estudo, ou seja, 0,8 MPa para os elementos

coladas com cola PRF (comparativamente a 0,6 MPa) e 0,6 MPa para os elementos coladas com cola MUF (comparativamente a 0,8 MPa).



Figura 3.4 – Sistema de prensagem dos elementos

A pressão de aperto diferiu consoante o tipo de cola. Nos elementos do tipo PRF a pressão de aperto aplicada foi de 0,8 MPa durante 240 minutos. Nos elementos do tipo MUF a pressão de aperto foi de 0,6 MPa e foi aplicada durante 540 minutos. Todos os parâmetros de colagem dos elementos podem ser consultados na Tabela A.1 no Anexo B. Quando a pressão de aperto foi aplicada verificou-se uma libertação de cola pela junta de colagem, o que indica que a quantidade de cola aplicada foi suficiente para cobrir toda a área a colar. Na Figura 3.5 a) é possível observar a colagem de um elemento de MST colada com PRF e na Figura 3.5 b) uma colagem realizada com cola MUF num elemento de MTAC.

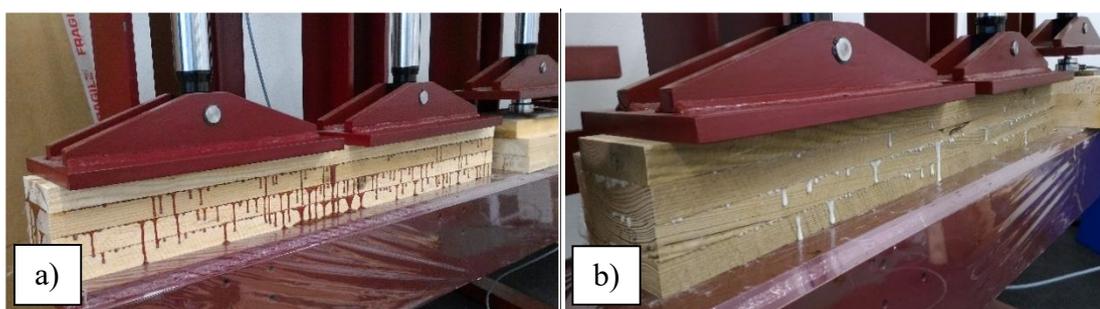


Figura 3.5 – a) Colagem de um elemento de madeira sem tratamento com PRF; e b) Colagem de um elemento de madeira tratada antes da colagem com MUF.

No fim do tempo previsto para a prensagem foram retirados os elementos do sistema de prensagem e foram mantidas na sala climatizada durante aproximadamente uma semana às condições de 20 °C de Temperatura e 65% de Humidade Relativa.

### 3.3.3 Madeira tratada depois da colagem

Os elementos sujeitos a tratamento depois da colagem, foram, após a cura das linhas de cola, sujeitos à aplicação de tratamento preservador por impregnação em Autoclave. Antes do envio dos elementos para tratamento, foram medidas as dimensões da secção transversal e comprimentos e foram realizadas pesagens aos elementos. Segundo a empresa responsável, o tratamento preservador foi aplicado com uma taxa de retenção de 31,2 kg/m<sup>3</sup>.

Após o tratamento, os elementos foram mantidos junto da empresa responsável pela aplicação do tratamento durante uma semana. Quando recebidos em laboratório os elementos foram colocados durante uma semana em condições de humidade e temperatura ambientes de forma a diminuírem o teor de água, visto que estas aparentavam possuir um elevado teor de água.

Tendo em conta as exigências de teor de água para realização de ensaios, nomeadamente nos ensaios de corte pela linha de cola, procedeu-se à secagem dos elementos. Para tal foi necessário determinar o teor de água aproximado dos elementos tratados depois de colados, embora esta situação não seja prevista na EN 14080 (CEN, 2013) recorreu-se à EN 131831-1 (CEN, 2002a), onde é apresentada a equação (1), já usada para determinação do teor de água das lamelas coladas.

Começou-se por se obter uma estimativa do teor de água dos elementos antes do tratamento ( $w_1$ ). Essa estimativa foi calculada através do valor médio do teor de água (calculado no método de secagem em estufa) das lamelas que constituem cada elemento apresentavam antes da colagem.

Após determinado o teor de água de cada elemento antes da colagem ( $w_{ant.col}$ ) e conhecida a massa de cada elemento após a colagem ( $m_{ap.col}$ ), determinou-se a massa seca de cada elemento ( $m'_0$ ) através da formulação apresentada na equação (2). A massa seca do elemento corresponde ao peso do elemento com teor de água nulo.

$$w_{ant.col} = \frac{m_{ap.col} - m'_0}{m'_0} \rightarrow m'_0 = \frac{m_{ap.col}}{(w_{ant.col} + 1)} \quad (2)$$

Conhecendo a quantidade de produto preservador retido (31,2 [kg/m<sup>3</sup>]), através das dimensões de cada elemento ( $V_{elemento}$ ) determinou-se a massa de produto preservador retido em cada elemento ( $m_{p.pres}$  [g] =  $V_{elemento}$  [m<sup>3</sup>] x 31200 [g/ m<sup>3</sup>]). A massa seca dos elementos após tratamento ( $m''_0$ ) calcula-se pela soma da massa seca dos elementos antes do tratamento ( $m'_0$ ) com a massa retida de produto preservador ( $m_{p.pres}$ ) (ou seja,  $m''_0 = m'_0 + m_{p.pres}$ ).

Conhecendo a massa do elemento no instante em que se quer determinar o teor de água aproximado ( $m_{inst}$ ) e conhecendo a massa seca do elemento somada de produto preservador ( $m''_0$ ), foi então possível através da equação (3) determinar o valor do teor de água estimado dos elementos após tratamento ( $w_{est}$ ).

$$w_{est} = \frac{m_{inst} - m''_0}{m''_0} \quad (3)$$

Assim, através da equação (3), conhecendo a massa do elemento tratada depois de colada foi possível determinar o teor de água aproximado da mesma ( $w_{inst}$ ). Admitiu-se que os elementos estavam aptos para serem cortados quando o teor de água estimado fosse o mais próximo possível do teor de água aproximado dos elementos antes do tratamento. Com as dificuldades de secagem de alguns elementos, optou-se por retirar os elementos de secagem quando o teor de água fosse inferior a 15 %, sendo que este último é o teor de água máximo permitido para colagem de madeira não tratada.

Após uma semana em secagem às condições ambiente, foram pesados os elementos com o intuito de determinar o teor de água estimado. Apresenta-se na Tabela 3.3 o teor de água estimado dos elementos, calculado antes de tratamento e duas semanas após tratamento dos elementos.

Tabela 3.3 – Teor de água dos elementos antes e após tratamento

Elemento	PRF_31	PRF_32	PRF_33	PRF_34	MUF_35	MUF_36	MUF_37	MUF_38
$w_{est}$ [%] Antes tratamento	13,2	13,4	13,4	13,4	13,5	13,5	14,1	14,1
$w_{est}$ [%] 2 semanas após tratamento	40,8	37,1	18,3	21,1	21,8	24,0	26,9	20,5

Da Tabela 3.3 destaca-se o elevado teor de água apresentado pelos elementos PRF\_31 e PRF\_32. Os teores de água apresentavam-se acima do limite estabelecido, pelo que foi necessário iniciar um processo de secagem dos elementos na câmara de secagem apresentada na Figura 3.6. Na Tabela 3.4 são apresentadas as condições de Temperatura e Humidade Relativa a que os elementos foram sujeitos e a sua duração. A escolha das condições aplicadas incidiu sobre a tabela 3-4 de Simpson (1999).

Assim que o teor de água teórico dos elementos atingiu valores inferiores a 15 %, os elementos apresentados na última linha da Tabela 3.4, foram colocadas na sala climatizada às condições de T=20 °C e HR=65 %.

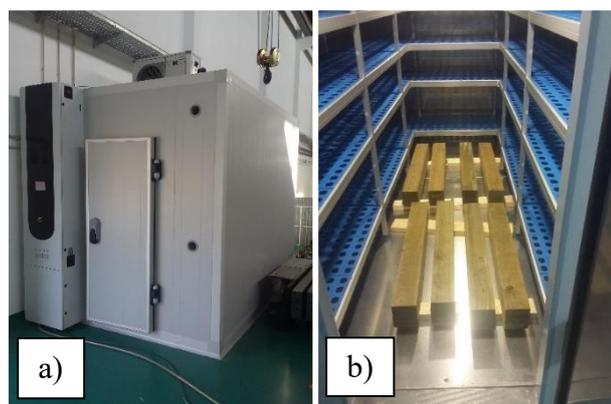


Figura 3.6 – a) Câmara de secagem utilizada ; e b) disposição dos elementos para secagem

Tabela 3.4 – Condições aplicadas à secagem dos elementos tratadas após colagem

Dias após inicio da secagem	0	14	20	21	22	28
Temperatura [°C]	20	25	25	40	40	-
Humidade Relativa [%]	65	60	50	70	60	-
Elementos colocadas na sala climatizada (T=20°C; HR=65%)	-	-	PRF_33 ;PRF_34 MUF_35; MUF_38	MUF_36 MUF_37	-	PRF_31 PRF_32

Após 28 dias de secagem nas condições descritas, os elementos apresentavam o teor de água estimado que se apresenta na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Teor de água dos elementos quando cortados

Elemento	PRF_31	PRF_32	PRF_33	PRF_34	MUF_35	MUF_36	MUF_37	MUF_38
West [%]	21,2	14,0	12,3	13,2	13,6	13,6	14,3	12,3

Dos resultados apresentados na Tabela 3.5 destaca-se o teor de água estimado do elemento PRF\_31 que é superior a 15%. Este elemento deveria ter permanecido mais tempo em secagem, contudo, para que fossem realizados os ensaios de delaminação deste elemento, não foi possível continuar com a secagem. Para os ensaios de resistência ao corte a EN 14080 (CEN, 2013) estabelece que o teor de água dos provetes deverá ser no máximo 13%. Com o intuito de garantir o teor de água necessário, após o corte do elemento, os provetes foram dispostos de forma a garantir a sua secagem, durante 30 dias.

Antes de obter os provetes, foi feito um levantamento das patologias que os elementos tratados após a colagem apresentavam. Quando secas, foi possível observar que os elementos apresentavam uma cor verde seca, com algumas diferenças de cor entre as lamelas, como visível na Figura 3.7. Observou-se ainda que os elementos apresentavam algumas fissuras, quer pela

madeira (Figura 3.8 a)), quer pela linha de cola (Figura 3.8 b)). Procedeu-se então à quantificação da percentagem de fissuração pela linha de cola de cada elemento, considerando como comprimento de linha de cola o comprimento longitudinal do elemento. As fissuras pela linha de cola registadas são apresentadas na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Fissuração pela linha de cola, registada após secagem dos elementos [%]

Elemento	PRF_31	PRF_32	PRF_33	PRF_34	MUF_35	MUF_36	MUF_37	MUF_38
Fissuração pela linha de cola [%]	6,23	2,91	1,08	2,60	2,60	0,20	1,10	0,42



Figura 3.7 – Aparência de um elemento tratado depois de colado, após a sua secagem

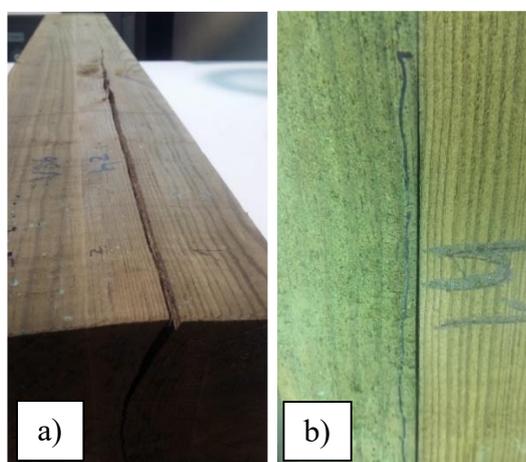


Figura 3.8 – a) Fissuração pela madeira; b) Fissuração pela linha de cola

Da Tabela 3.6 destaca-se a elevada percentagem de fissuração pela linha de cola registada no elemento PRF\_31. Foram ainda calculadas, em percentagem, as variações dimensionais de cada elemento sofridas durante o tratamento, em altura e em largura, medidas nos topos e a meio vão dos elementos. Apresentam-se os resultados na Tabela 3.7. As variações de comprimento registadas não foram relevantes quando comparadas com as restantes.

Tabela 3.7 – Variação dimensional registada em cada elemento tratado depois de colado [%]

Elemento	PRF_31		PRF_32		PRF_33		PRF_34		MUF_35		MUF_36		MUF_37		MUF_38	
	b	h	b	h	b	h	b	h	b	h	b	h	b	h	b	h
<b>Topo 1</b>	2,1	1,5	2,2	2,4	1,5	1,0	1,8	1,6	0,8	2,2	1,3	3,1	1,1	1,0	0,8	1,3
<b>1/2 Vão</b>	2,0	2,3	2,3	1,7	1,3	1,2	2,1	1,4	0,4	1,8	0,6	1,8	1,8	2,5	1,4	0,6
<b>Topo 2</b>	2,2	1,6	1,2	0,9	1,5	1,0	1,8	1,1	0,6	2,5	2,2	2,0	1,6	1,0	1,1	0,6

**Nota:** b - largura da secção do elemento;  
h - altura da secção do elemento

Em média, os elementos sofreram um aumento de 1,5 % na largura e de 1,6 % na altura dos elementos. No comprimento dos elementos a diferença registada foi de cerca de 0,1% em todos os elementos. Gaspar (2006) indica que a retração total para madeira maciça de pinheiro bravo é de cerca de 4,9% e 8,6% para as retrações de radiais (altura dos elementos) e tangenciais (largura dos elementos), respetivamente. Dos resultados obtidos na Tabela 3.7 observa-se que a retração registada nos elementos de MLC é menor aos valores tabelados para madeira maciça. Esta verificação vai de encontro com uma das vantagens da utilização de MLC uma vez que utiliza elementos de menor dimensão no processo de fabrico, e que por sua vez foram alvo de um processo de secagem mais eficaz conduzindo a menores variações dimensionais no produto final (MLC).

### 3.3.4 Obtenção de provetes

Após a cura dos elementos estes foram sujeitos a um aparelhamento das faces laterais, retirando o mínimo possível de material. De cada elemento foi possível obter 7 provetes para realizar ensaios de delaminação e 14 provetes para determinar a resistência ao corte (10 para determinação de resistência ao corte da linha de cola e 4 para determinação de resistência ao corte pela madeira). Os provetes de delaminação foram numerados antecidos da letra D e os de corte numerados antecidos da letra C.

Sempre que era visível a existência de nós ou bolsas de resina na madeira, os cortes foram feitos de forma a evitar a influência destes nos provetes de delaminação. Dos elementos foram descartados em ambos os topos os 3cm iniciais de modo a evitar defeitos de colagem, seguindo o corte de um provete para resistência ao corte e de seguida um provete para ensaio de delaminação, intercalando no restante comprimento do elemento. Na Figura 3.9 apresenta-se a forma como foram obtidos os provetes pelos elementos de 1 m de comprimento.

Durante o período que decorreu desde a obtenção dos provetes até serem efetuados os devidos ensaios (delaminação e resistência ao corte) estes foram devidamente acondicionados numa sala climatizada às condições de T= 20 °C e HR= 65%.



Figura 3.9 – Corte dos elementos para obtenção de provetes de delaminação e provetes de resistência ao corte pela linha de cola

### 3.3.5 Análise de retenção de tratamento preservador

Nos elementos de madeira tratada antes da colagem, após o aparelhamento, era visível exteriormente a existência de zonas onde não existia produto preservador retido. Na Figura 3.10 a) é visível a existência dessas zonas num provete de topo de madeira tratada antes da colagem. Após o corte do elemento em provetes, na secção transversal dos elementos de madeira tratada antes de colada, como o tratamento foi aplicado isoladamente em cada tábuas, era claramente visível a retenção de tratamento preservador na zona do borne e a não existência de produto preservador na zona do cerne. Observou-se que, exteriormente, as zonas em que os elementos não apresentavam tratamento preservador eram zonas onde transversalmente se encontrava madeira de cerne.

Com o corte dos provetes nos elementos de madeira tratada depois da colagem observou-se que, embora o tratamento preservador estivesse disperso de forma uniforme em toda a superfície, na secção transversal denotam-se algumas zonas onde a impregnação de tratamento na madeira foi ineficaz. Na Figura 3.10 b) apresenta-se o exemplo de um provete de onde se pode observar que embora na superfície exterior o tratamento esteja disperso de forma uniforme, na secção transversal nem toda a área foi recebeu de tratamento (sinónimo da presença de cerne).

Um dos fatores que pode conduzir a um insuficiente tratamento da secção transversal é o facto do cerne ser impregnável, o que levanta problemas em Pinheiro Bravo, visto que o cerne é suscetível ao ataque de fungos e térmitas como referido pela EN 350-2 (CEN, 1994a).

Foi feita uma estimativa da percentagem de madeira com tratamento e sem tratamento presente em cada elemento. Com recurso a um software computacional, foi quantificada a percentagem de madeira com tratamento e sem tratamento em cada um dos topos e calculada a média entre estes valores. Os valores médios de percentagem apresentam-se na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 – Percentagem de madeira com tratamento nos elementos

	Elemento	Madeira com tratamento [%]		
		/elemento	/tipo de cola	/lote
MTAC	PRF_T15	63	44	69
	PRF_T16	60		
	PRF_T17	25		
	PRF_T18	26		
	MUF_T1	92	92	
	MUF_T2	96		
	MUF_T3	85		
	MUF_T4	97		
MTDC	PRF_31	97	66	57
	PRF_32	79		
	PRF_33	47		
	PRF_34	42		
	MUF_35	48	48	
	MUF_36	50		
	MUF_37	55		
	MUF_38	41		

Da Tabela 3.8 destaca-se a elevada percentagem de madeira com tratamento nos elementos MUF\_T1, MUF\_T2, MUF\_T3, MUF\_T4, PRF\_31. Da totalidade dos elementos, os que apresentavam menor percentagem de madeira com tratamento eram os elementos PRF\_T17 e PRF\_T18. Por tipo de cola, destaca-se a elevada percentagem de madeira com tratamento dos elementos colados com MUF com MTAC. Relativamente aos lotes, a MTAC apresenta uma maior percentagem de madeira com tratamento.

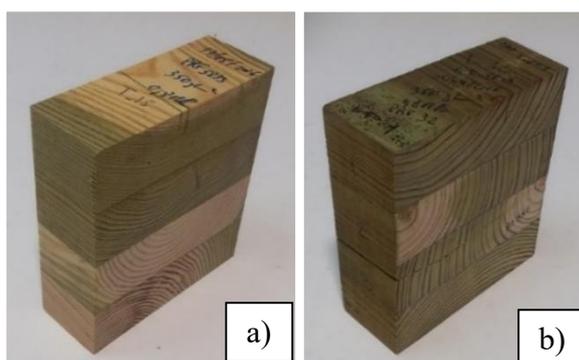


Figura 3.10 – a) Exemplo de provete de madeira tratada antes de colada, e b) Exemplo de provete de madeira tratada depois de colada

### 3.4 Ensaios realizados

#### 3.4.1 Ensaios de delaminação

Os ensaios de delaminação têm por objetivo criar um gradiente de teor de água na madeira gerando tensões perpendiculares aos planos de colagem que poderão provocar rotura das linhas de cola.

##### Procedimento

Todo o procedimento dos ensaios, desde a obtenção dos provetes até à análise das delaminações é regulado pelo Anexo C da EN 14080 (CEN, 2013). Os provetes foram cortados com um comprimento na direção das fibras de  $75 \pm 5$  mm. Após o corte, os provetes para delaminação apresentavam assim dimensões médias de 110 mm de largura, 120 mm de altura e 75 mm de comprimento.

Sendo este um estudo da viabilidade de aplicação de MLC em classes de serviço 3, dos métodos apresentados pela EN 14080 (CEN, 2013), apenas poderão ser aplicados os métodos A e/ou B. À semelhança de estudos anteriores que avaliaram a qualidade de colagem em classe de serviço 3, no decorrer deste estudo foi utilizado o método A, cujo procedimento adotado será apresentado seguidamente.

- 1) Mediu-se o comprimento total das linhas de cola;
- 2) Colocaram-se os provetes no sistema de Autoclave, Figura 3.11 a), imersos em água a uma temperatura entre 10°C e 20°C;
- 3) Aplicou-se na Autoclave vácuo entre 70 kPa a 80 kPa durante 5 minutos;
- 4) Aplicou-se na Autoclave pressão entre 500 kPa a 600 kPa durante 60 minutos;
- 5) Repetiram-se os passos 3) e 4)
- 6) Colocaram-se os provetes numa conduta de secagem, Figura 3.11 b), durante 21h, submetidos a uma temperatura de 65°C, com uma humidade relativa inferior a 15% e uma velocidade do ar entre 2 m/s e 3 m/s;
- 7) Deu-se por concluído o 1º ciclo, e repetiram-se os passos 2) a 6);
- 8) Analisaram-se e registaram-se as delaminações observadas nas linhas de cola (2º Ciclo);
- 9) Repetiram-se os passos 2) a 8) (3ª ciclo).

A EN 14080 (CEN, 2013) refere que o terceiro ciclo é um ciclo adicional e que apenas será necessária a sua realização se a percentagem de delaminação total ao fim do segundo ciclo for superior à regulamentada. Contudo, em contexto de investigação e de modo a comparar com estudos anteriores foi realizado o terceiro ciclo para todos os provetes.

Os provetes foram colocados no Autoclave garantindo que as peças não estavam em contacto entre si. Foram para isso colocados os provetes dentro de compartimentos de rede fina, fabricados para esse propósito, como ilustrado na Figura 3.11 c). Quando colocados na câmara de secagem os provetes foram dispostos de forma a estarem espaçados entre si de, no mínimo, 50 mm entre as faces e com os topos paralelos à corrente de ar, tal como referido pela EN 14080 (CEN, 2013).

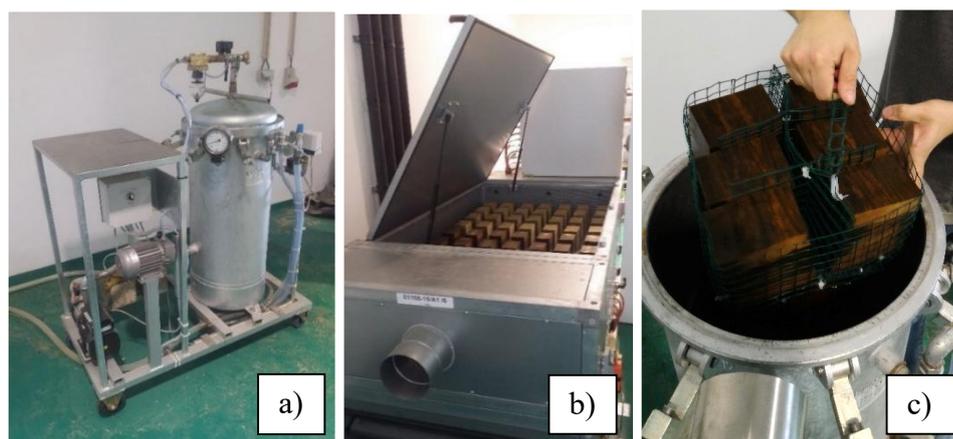


Figura 3.11 – a) Autoclave – equipamento usado para aplicação de ciclos de vácuo e pressão; b) Condução de secagem dos provetes e correspondente disposição dos provetes; c) Pormenor de colocação dos provete no interior do Autoclave

Após o término de cada ciclo, recorrendo a uma lupa de ampliação de x10, uma luz forte e um apalpa folgas de 0,1 mm foram marcadas as delaminações ocorridas em cada linha de cola. Como referido pela norma, o tempo que decorreu desde que as peças foram retiradas da câmara de secagem até à medição das delaminações foi sempre inferior a 1 hora. Para cada ciclo foi considerada uma cor diferente possibilitando assim a visualização da evolução das delaminações ao longo dos ciclos.

Tal como indicado pela EN 14080 (CEN, 2013), foram consideradas as delaminações que se inserissem em qualquer um dos casos que se apresentam de seguida. Na Figura 3.12 a) apresentam-se casos de delaminações que foram contabilizadas.

- i) Rotura ocorreu pela linha de cola;
- ii) Rotura ocorreu entre a linha de cola e a superfície de madeira, não havendo fibras de madeira na superfície de cola;
- iii) Rotura pela madeira, mas ocorrente na primeira ou na segunda camada de células para além da camada de cola, isto se a falha não fosse influenciada pelo angulo das fibras de madeira ou pelos anéis de crescimento

Não foram consideradas delaminações que se inserissem em qualquer um dos casos apresentados de seguida. Na Figura 3.12 b) apresentam-se o caso de uma delaminação que não foi considerada devido à presença de bolsa de resina.

- i) A rotura ocorresse pela madeira e estivesse distanciada de 3 ou mais fibras de madeira da linha de cola;
- ii) As aberturas com um comprimento inferior a 2,5 mm e a uma distância superior a 5 mm da abertura mais próxima.
- iii) As aberturas localizadas junto a nós e/ou bolsas de resina, e ainda aberturas que fossem influenciadas pela proximidade dos nós e/ou bolsas de resina às linhas de cola.

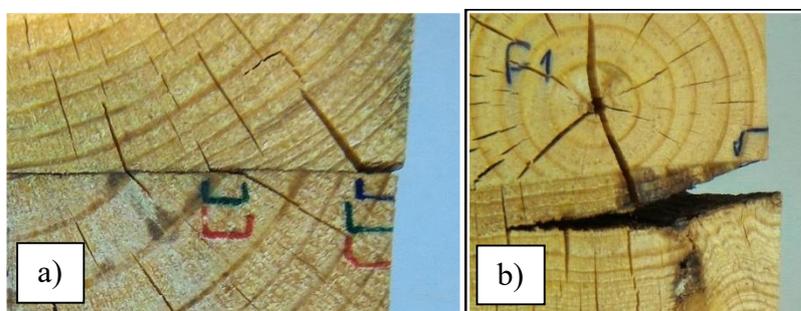


Figura 3.12 – a) Exemplo de delaminações registadas em ambos os ciclos (azul – primeiro ciclo, verde – segundo ciclo; e vermelho – terceiro ciclo) ; e b) Exemplo de delaminação não considerada

Ao quantificar a delaminação dos elementos de MTDC observou-se que nas extremidades das linhas de cola dos provetes existiam fissuras provenientes do processo de secagem após a aplicação de tratamento preservador em Autoclave. Durante os ensaios de delaminação nos provetes destes elementos verificaram-se algumas delaminações influenciadas pelas fissuras referidas. A delaminação do lote de MTDC foi registada desprezando as delaminações influenciadas pelas fissuras provenientes no tratamento da madeira.

#### Critérios de conformidade/valores limite

Segundo a EN 14080 (CEN, 2013), para o método A, os limites para delaminação total por linha de cola são de 5%, após o segundo ciclo, e de 10%, após o terceiro ciclo. A delaminação máxima por linha de cola permitida é de 30%.

A percentagem de delaminação por linha de cola e percentagem de delaminação total de cada provete é determinada de acordo com as orientações presentes na EN 14080 (CEN, 2013). A percentagem de delaminação de uma linha de cola individual deve ser determinada através da

equação (4), enquanto que a percentagem de delaminação total é determinada recorrendo á equação (5).

$$\%_{delaminação\ linha} = 100 \left( \frac{l_{máx,delam}}{2 l_{glue\ line}} \right) \quad (4)$$

Onde,  $l_{máx,delam}$  corresponde ao comprimento máximo de delaminação e  $l_{glue\ line}$  corresponde ao comprimento de uma linha de cola.

$$\%_{delaminação\ total} = 100 \left( \frac{l_{tot,delam}}{l_{tot,glue\ line}} \right) \quad (5)$$

Onde,  $l_{tot,delam}$  corresponde ao comprimento total de delaminação e  $l_{tot,glue\ line}$  corresponde ao comprimento total de linhas de cola em ambos os topos do provete.

### 3.4.2 Ensaios de corte

O princípio dos ensaios de resistência ao corte pela linha de cola consiste na aplicação de tensões de corte na linha de cola, na direção paralela às fibras de madeira, até que se atinga a rotura. Podem ocorrer três tipos diferentes de rotura:

- i) Rotura da madeira, sendo visíveis as fibras de madeira nas duas faces obtidas pela rotura;
- ii) Rotura coesiva, em que a rotura ocorre pela linha de cola e é possível identificar a presença de cola nas duas faces das lamelas
- iii) Rotura adesiva, em que a rotura ocorre entre a cola e a madeira, ou seja, a adesão não foi eficaz numa das faces a colar, não ocorreu penetração da cola nas fibras da madeira.

#### Procedimento do ensaio

Os ensaios de corte tiveram por objetivo quantificar a resistência ao corte de cada linha de cola e a resistência ao corte pela madeira. Para isso, tal como exigido pela EN 14080 (CEN, 2013) os provetes foram cortados com dimensões de largura e comprimento entre 40 mm e 50 mm. De cada elemento de MLC obtiveram-se 10 provetes para determinação de resistência ao corte pela linha de cola e 4 provetes para determinação de resistência ao corte pela madeira. Previamente ao ensaio foi realizada a medição dos provetes para que fosse possível determinar a área de cada plano de corte. Os provetes de determinação de resistência ao corte pela linha de cola e pela madeira apresentavam dimensão média de 120 x 49 x 49 [mm].

Os ensaios de corte foram realizados recorrendo a uma prensa hidráulica com capacidade de 50 kN, instalada num sistema de suporte montado no laboratório, como se apresenta na Figura 3.13 a). Os provetes foram colocados num dispositivo de ensaio, visível na Figura 3.13 b), de forma a que a carga seja exercida na direção das fibras de madeira e que a sua aplicação fosse o mais próxima possível (inferior a 1 mm) do plano de corte pretendido.

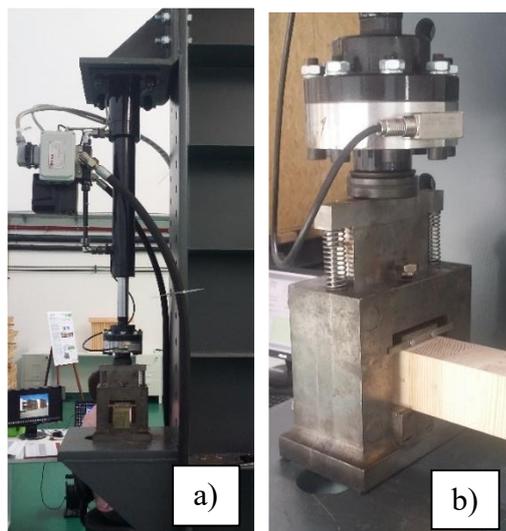


Figura 3.13 – a) Esquema de ensaios de resistência ao corte; e b) Dispositivo para ensaios de resistência ao corte

O ensaio foi realizado em controlo de deslocamento de modo a que a rotura ocorresse após 20 segundos. A velocidade foi definida de acordo com os resultados previamente obtidos no trabalho doutoral que se encontra a decorrer, tendo sido adotada a velocidade de 0,06 mm/s. Em situações em que a rotura ocorresse antes dos 20 segundos procedeu-se a uma análise do provete para identificar a causa. A existência de nós na linha de cola verificou-se como fator de redução da carga máxima de ensaio.

Por cada provete para determinação de resistência ao corte pela linha de colagem foram realizados 3 ensaios (um por cada linha de cola). Por cada provete de determinação de resistência ao corte da madeira foram realizados 4 ensaios, realizados na secção intermédia de cada lamela.

#### Critérios de conformidade/valores limite

Após o ensaio, e obtida a carga máxima que levou á cedência do provete, a resistência ao corte,  $f_v$ , pode ser obtida pela equação (6).

$$f_v = k \left( \frac{F_u}{A} \right) \quad (6)$$

Onde,  $F_u$  é a carga máxima (N),  $A$  é área submetida ao corte e  $k$  é um fator corretivo para peças cuja espessura na direção ao fio seja inferior a 50 mm, sendo,  $k = 0,78 + 0,0044.t$ , onde  $t$  é a espessura em mm.

Após o ensaio, pela superfície de rotura, quantificou-se a percentagem de rotura que ocorreu pela madeira em múltiplos de 5%. Devido à sua cor, nos elementos colados com PRF era facilmente identificada a percentagem de rotura pela madeira. Nos elementos colados com MUF, devido à sua cor esbranquiçada, foi difícil diferenciar a rotura pela madeira da rotura adesiva e coesiva. Na Figura 3.14 a) e Figura 3.14 b) apresentam-se exemplos de dois provetes de resistência ao corte pela linha de cola, um colado com PRF e outro colado com MUF (depois de aplicar o indicador de pH), respetivamente. Para quantificar a percentagem de madeira, recorreu-se a uma película transparente com as dimensões médias dos provetes, foi feita a divisão da secção em 100 elementos iguais de forma a que cada quadricula representasse 1% da secção. A película usada pode ser observada na Figura 3.15 a).

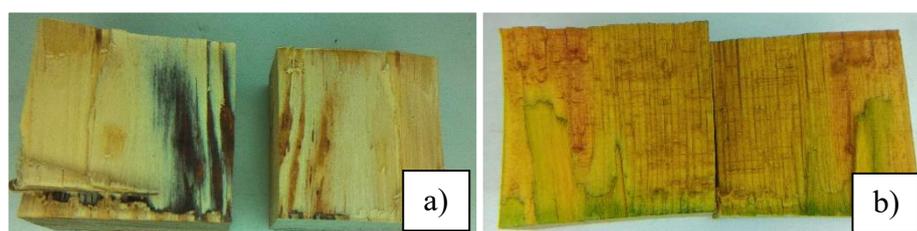


Figura 3.14 – a) Provete de resistência ao corte pela linha de cola de elemento colado com PRF; e b) Provete de resistência ao corte pela linha de cola de elemento colado com MUF

Com o intuito de determinar a percentagem de rotura ocorrida pela madeira nos elementos colados com MUF, à semelhança de Gaspar (2010), foi necessário recorrer a um indicador de pH. O indicador de pH foi fabricado em laboratório e consistiu na mistura dos seguintes constituintes e respetivas quantidades: 0,25 g de alaranjado de metilo; 0,25 g de verde de bromocresol; 0,01 g de carmim de indigo; 50 ml de etanol; e 25 ml de água destilada.

A solução consistiu em dissolver no etanol o alaranjado de metilo, o verde de bromocresol e o carmim de indigo, e de seguida adicionou-se a água destilada. Após preparada a solução, colocou-se num recipiente, onde através de “*spray*” se aplicou a solução nas superfícies de corte (Figura 3.15 b)). Segundo Gaspar (2010), da reação do indicador de pH com a superfície de corte, a madeira apresentou uma cor alaranjada e no caso da cola uma cor esverdeada. Contudo, no presente estudo não se verificou essa alteração de cor. Em alguns casos foi difícil distinguir

a rotura pela cola ou pela madeira. No entanto, a rotura pela linha de cola distinguia-se por apresentar uma textura espelhada.

A solução consistiu em dissolver no etanol o alaranjado de metilo, o verde de bromocresol e o carmim de indigo, onde no fim se juntou água destilada. Após preparada, colocou-se a mistura num recipiente, onde através de “*spray*” se aplicou a solução nas superfícies de corte (Figura 3.15 b)).

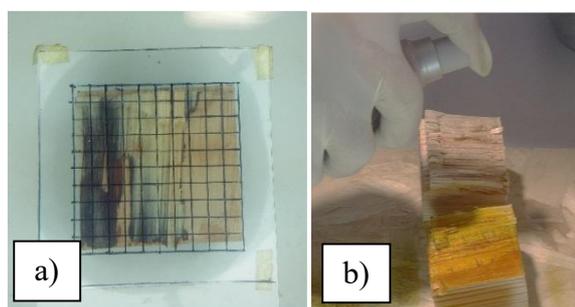


Figura 3.15 – a) Película usada para determinar percentagem de rotura pela madeira; b) Aplicação do indicador de pH nas superfícies de rotura

De acordo com a EN 14080 (CEN, 2013) para que os provetes verificassem as imposições regulamentares, a percentagem mínima de rotura pela madeira, que está dependente da resistência ao corte, deverá verificar as exigências apresentadas na Tabela 3.9.

Tabela 3.9 - Percentagem de rotura pela madeira permitida pela tensão última de resistência ao corte para cada provete e por valor individual de plano de corte.

	Valores médios			Valores individuais		
	6	8	$f_v \geq 11$	$4 \leq f_v \leq 6$	6	$f_v \geq 10$
Resistência ao corte, $f_v$ [MPa]	6	8	$f_v \geq 11$	$4 \leq f_v \leq 6$	6	$f_v \geq 10$
Rotura mínima pela madeira, %	90	72	45	100	74	20

## 4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Segue-se neste capítulo a análise discussão dos resultados obtidos dos ensaios de delaminação e de resistência ao corte pela linha de cola e pela madeira. Primeiramente apresentam-se os resultados obtidos de ambos os ensaios, seguindo-se comentários relativos aos resultados de cada ensaio. Por ultimo, será feita uma análise de resultados elemento a elemento e por linha de cola, quer nos resultados de delaminação, quer nos resultados de resistência ao corte, onde se tentam identificar a influencia de parâmetros da colagem na qualidade da mesma.

### 4.1 Resultados

#### 4.1.1 Ensaios de delaminação

Na Tabela 4.1 e Tabela 4.2 apresentam-se os valores médios de resistência à delaminação total, quer para cada elemento, quer para cada cenário de tratamento considerado e ainda, os valores máximos de resistência à delaminação total registados em cada elemento, onde são indicados a quantidade de elementos que apresentaram delaminação total superior aos limites estabelecidos pela EN 14080 (CEN, 2013).

Tabela 4.1 – Média das delaminações totais por elemento e por situação de tratamento e valor máximo de delaminação total registado por elemento ao fim do 2º e 3º ciclos para os elementos coladas com cola PRF.

	Elemento	2º Ciclo			3º Ciclo		
		Média delam. total [%]	Máx. delam. Total [%]	Média delam. total [%] (Desv. Padrão)	Média delam. total [%]	Máx. delam. Total [%]	Média delam. total [%] (Desv. Padrão)
MST	PRF_19	0,79	2,59	0,89 (1,02)	0,91	2,60	1,07 (1,01)
	PRF_29	0,48	2,54		0,58	2,65	
	PRF_30	1,40	3,53		1,72	3,51	
MTAC	PRF_T15	1,34	4,59	1,21 (1,46)	1,62	4,59	1,67 (1,74)
	PRF_T16	2,00	5,97 (1)*		2,86	7,52	
	PRF_T17	1,22	2,29		1,74	3,75	
	PRF_T18	0,26	1,11		0,43	1,12	
MTDC	PRF_31	1,12	1,58	0,95 (0,87)	1,86	3,35	1,28 (1,03)
	PRF_32	0,87	2,57		1,19	2,74	
	PRF_33	0,64	1,41		0,66	1,40	
	PRF_34	1,16	3,69		1,41	3,96	

**Nota:** \* - nº de provetes com delaminação total superior ao limite ao fim do 2º Ciclo (5%)

Tabela 4.2 - Média das delaminações totais por elemento e por situação de tratamento e valor máximo de delaminação total registado por elemento ao fim do 2º e 3º ciclos para os elementos coladas com cola MUF

	Elemento	2º Ciclo			3º Ciclo		
		Média delam. total [%]	Máx. delam. Total [%]	Média delam. total [%] (Desv. Padrão)	Média delam. total [%]	Máx. delam. Total [%]	Média delam. total [%] (Desv. Padrão)
MST	MUF_23	1,45	2,90	0,84 (1,02)	1,69	3,56	0,99 (1,16)
	MUF_39	0,18	0,68		0,24	0,68	
	MUF_40	0,89	3,32		1,05	3,50	
MTAC	MUF_T1	2,40	6,78 (1)*	3,02 (3,66)	2,92	7,49	3,52 (4,04)
	MUF_T2	7,63	11,37 (6)*		8,64	12,81 (4)**	
	MUF_T3	0,53	2,10		0,83	2,64	
	MUF_T4	1,54	5,65 (1)*		1,70	5,69	
MTDC	MUF_35	0,87	2,31	0,54 (0,71)	1,24	2,91	0,71 (0,85)
	MUF_36	0,58	1,59		0,65	1,66	
	MUF_37	0,38	1,78		0,54	1,96	
	MUF_38	0,33	1,26		0,40	1,26	

**Nota:** \* - nº de provetes com delaminação total superior ao limite ao fim do 2º Ciclo (5%)  
\*\* - nº de provetes com delaminação total superior ao limite ao fim do 3º Ciclo (10%)

#### 4.1.2 Ensaio de resistência ao corte

Na Tabela 4.3 e Tabela 4.4 apresentam-se as médias das tensões resistentes ao corte pela linha de cola de cada elemento, bem como de cada situação de tratamento e as percentagens de rotura pela madeira média de cada elemento e de cada situação de tratamento. É ainda apresentada a tensão média de rotura pela madeira registada para cada situação de tratamento.

Tabela 4.3 – Valores médios de tensão de corte e rotura pela madeira registado por elemento e por situação de tratamento para elementos colados com cola PRF

Condição Tratamento	Elemento	Tensão de corte [MPa]			Rotura pela Madeira [%]	
		Rotura pela linha de cola		Rotura pela madeira	Média (Desvio padrão)	Média (Desvio padrão)
		Média (Desvio padrão)	Média (Desvio padrão)	Média (Desvio padrão)		
MST	PRF_19	13,15 (1,47)	13,50 (1,25)	13,89 (1,70)	88,83 (12,43)	95,28 (8,87)
	PRF_29	13,97 (1,19)			98,28 (3,07)	
	PRF_30	13,39 (0,95)			98,83 (3,13)	
MTAC	PRF_T15	12,40 (1,31)	12,62 (1,44)	13,85 (1,46)	93,00 (7,72)	96,17 (6,00)
	PRF_T16	13,40 (1,25)			95,17 (6,23)	
	PRF_T17	11,95 (1,34)			98,17 (3,82)	
	PRF_T18	12,72 (1,53)			98,33 (3,79)	
MTDC	PRF_31	11,54 (0,79)	11,35 (1,25)	11,93 (1,50)	96,67 (4,97)	95,83 (8,73)
	PRF_32	10,77 (1,25)			93,17 (10,21)	
	PRF_33	11,49 (1,46)			98,00 (3,62)	
	PRF_34	11,60 (1,27)			95,50 (12,55)	

Tabela 4.4 - Valores médios de tensão de corte e rotura pela madeira registado por elemento e por situação de tratamento para elementos colados com cola MUF

Condição Tratamento	Elemento	Tensão de corte [MPa]			Rotura pela Madeira [%]	
		Rotura pela linha de cola		Rotura pela madeira	Média (Desvio padrão)	Média (Desvio padrão)
		Média (Desvio padrão)	Média (Desvio padrão)	Média (Desvio padrão)		
MST	MUF_23	13,80 (1,30)	13,77 (1,33)	13,27 (1,26)	97,50 (3,15)	96,61 (5,02)
	MUF_39	14,33 (1,24)			96,00 (6,62)	
	MUF_40	13,17 (1,23)			96,33 (4,72)	
MTAC	MUF_T1	12,63 (0,79)	12,75 (0,93)	13,45 (1,57)	98,17 (3,07)	97,42 (4,20)
	MUF_T2	12,21 (0,66)			98,33 (4,22)	
	MUF_T3	13,02 (1,04)			96,00 (5,32)	
	MUF_T4	13,12 (0,93)			97,17 (3,64)	
MTDC	MUF_35	11,00 (1,25)	11,73 (1,32)	12,95 (1,81)	98,17 (2,45)	98,08 (2,76)
	MUF_36	11,38 (1,46)			98,33 (3,03)	
	MUF_37	12,26 (1,22)			97,83 (2,84)	
	MUF_38	12,27 (0,85)			98,00 (2,82)	

De salientar que apenas uma linha de cola dos provetes não verifica as condições impostas pela EN 14080 (CEN, 2013) para conformidade de linha de cola, o MTDC\_PRF\_32\_C2\_L3. Da análise deste provete verificou-se que numa das lamelas existia um nó. Nenhum dos provetes apresentava uma percentagem de rotura pela madeira média inferior aos limites estabelecidos.

## 4.2 Análise da Influência da fase de tratamento

Dos 22 elementos fabricados no decorrer do presente trabalho resultaram 154 provetes de delaminação, 220 provetes para ensaios de resistência ao corte pela linha de cola (660 linhas de cola) e 88 provetes para ensaios de resistência ao corte pela madeira (352 lamelas). Nos subcapítulos 4.2.1 e 4.2.2 são apresentados os resultados obtidos dos ensaios de delaminação e resistência ao corte, respetivamente.

### 4.2.1 Ensaios de delaminação

De todos os ensaios realizados, nenhum dos provetes apresentou delaminação máxima superior ao limite de delaminação máxima regulamentada de 30%.

De acordo com a Tabela 4.1, dos resultados obtidos verifica-se que, nas colagens realizadas com a cola PRF, todos os provetes de cada elemento cumpriram os limites, à exceção de um provete de MTAC, que excedeu o limite de 5% para o 2º ciclo. O lote que apresentou menor delaminação média ao fim do 2º e 3º ciclo foi o lote de MST. Verifica-se dos resultados médios que a fase em que é aplicado o tratamento preservador, antes ou depois da colagem, não afetou de forma significativa a delaminação após o 2º e 3º ciclo. Contudo o tratamento prévio à

colagem resultou em valores ligeiramente superiores em relação ao tratamento posterior (0,26% no 2º ciclo e 0,39% no 3º ciclo). Desta análise conclui-se que embora a diferença não seja significativa, em situações de MTDC obtêm-se menores valores de delaminação e mais próximos da delaminação registada nas situações de MST, quando comparados com os resultados de MTAC. Dos ensaios realizados, ao fim do 3º ciclo, nenhum dos provetes apresenta delaminação superior aos limites estabelecidos pela EN 14080 (CEN, 2013) o que afirma a qualidade da colagem deste tipo de cola em madeira de Pinheiro Bravo.

Constatou-se das colagens realizadas com a cola MUF, cujos resultados se apresentam na Tabela 4.2, que apenas os provetes colados com madeira do lote MTAC deram origem a valores superiores ao limite de delaminação total tanto para o 2º ciclo como para o 3º ciclo. No que diz respeito aos elementos do lote MST e MTDC foram cumpridos os limites em ambos os ciclos. Relativamente a madeira tratada, o lote que apresentou maior delaminação média foi o lote de MTAC. O lote de MTDC apresentou delaminação média bastante próxima do lote de MST. Desta análise conclui-se que em situações de MTAC, os elementos apresentam delaminação mais elevada do que em situações de MTDC em que a delaminação é bastante próxima dos elementos de MST. O lote de MTAC apresenta provetes com delaminação superior aos limites estabelecidos pela EN 14080 (CEN, 2013), o que indica problemas de colagem da cola MUF em madeira de Pinheiro Bravo tratado antes de ser colado.

Para ambas as colas, a situação de MTDC conduz a resultados de delaminação bastante próxima dos valores de MST. Comparando os dois tipos de cola, a cola MUF nos lotes de MST e MTDC apresenta resultados de delaminação inferiores aos resultados obtidos com a cola PRF, o que aponta a cola MUF como uma cola com fiabilidade para as colagens realizadas em situações de MTAC e MTDC. Para ambas as colas, a situação de MTAC apresenta maior delaminação que os restantes lotes, sendo essa diferença mais significativa nas colagens realizados com MUF. Por análise individual da delaminação média dos elementos observa-se que existe uma elevada variabilidade de resultados, pelo que será, no Capítulo 4, realizada uma análise da delaminação registada em ambos os elementos de cada lote. Esta análise tem como objetivo identificar possíveis fatores causadores de delaminação.

#### **4.2.2 Ensaios de resistência ao corte**

De acordo com a Tabela 4.3, dos ensaios realizados em elementos colados com PRF verifica-se que, nos ensaios de rotura pela linha de cola, os elementos de MST foram aqueles que apresentaram tensão de corte mais elevada. Relativamente a madeira tratada, o lote de MTAC foi o que apresentou tensão de corte pela linha de cola mais elevada. Dos ensaios de rotura pela madeira constatou-se que a resistência ao corte dos lotes de MST e MTAC foi muito próxima, sendo que o lote de MTDC apresentou uma tensão de corte inferior às restantes. Em todos os

lotes houve uma diminuição de tensão de corte dos ensaios de corte pela madeira para os ensaios de corte pela linha de cola, sendo essa diferença mais acentuada no lote de MTAC. Conclui-se destes resultados que se a madeira for tratada depois de colada, existe uma redução de tensão de corte da madeira e da linha de cola, quando comparada com a situação de madeira tratada antes de colada e madeira sem tratamento. Se a madeira for tratada antes da colagem, existe uma redução de tensão de corte quando comparada com a madeira sem tratamento, contudo, em situação de madeira tratada antes de colada, não há alteração significativa da tensão de corte pela madeira. Verifica-se, portanto, a influência do tratamento na resistência pela linha de cola ao invés na rotura pela madeira não há registo de influência do tratamento quando aplicado antes de colar. Relativamente à percentagem de rotura pela madeira, os elementos do lote MTAC apresentam a maior percentagem, ao passo que o lote MST apresenta a menor percentagem de rotura pela madeira. O método de medição da percentagem de rotura pela madeira é impreciso devido ao modo como a rotura se apresenta regra geral. O facto de o valor ser arredondado ao 5% mais próximo gera também alguma imprecisão pelo que as diferenças existentes nos valores médios dos diferentes processos de tratamento não têm significância.

Nos ensaios de corte realizados aos elementos colados com MUF, apresentados na Tabela 4.4, a tensão de corte da rotura pela linha de corte foi mais elevada no lote de MST, seguindo-se o lote de MTAC, e por fim, o lote de MTDC. A tensão de corte pela madeira foi aproximadamente igual nos lotes de MST e MTAC, sendo a registada no lote de MTDC inferior às restantes. No lote de MST, a rotura pela linha de cola apresentou uma tensão de corte inferior à tensão registada na rotura pela linha de cola. Conclui-se destes resultados que a situação de madeira tratada depois da colagem conduz a uma tensão de corte pela madeira e pela linha de cola inferiores, quando comparada com madeira tratada antes da colagem e madeira sem tratamento. A madeira tratada antes de colada apresenta uma tensão de corte pela linha de cola inferior à de madeira sem tratamento, contudo a tensão de corte pela madeira apresenta valores bastante próximos. A percentagem de rotura pela madeira apresentou valores mais elevados no lote MTDC e os mais baixos foram registados no lote de MST. Mais uma vez a diferença registada não é significativa dado método de determinação da percentagem de rotura pela madeira.

### **4.3 Análise por fase de tratamento**

Os resultados de delaminação serão apresentados recorrendo a gráficos “*Caixa e Wishker*”, legendada da seguinte forma: caixa (rectângulo): valores entre os percentis 25 e 75; linha horizontal (interior da caixa): mediana; “X”: média; e linha horizontal (fora da caixa): valores mínimos e máximos.

### 4.3.1 Madeira sem tratamento – MST

#### Delaminação

Apresentam-se na Figura 4.1 os resultados de delaminação dos elementos colados com PRF e com MUF sob a forma de diagramas de extremos e quartis.

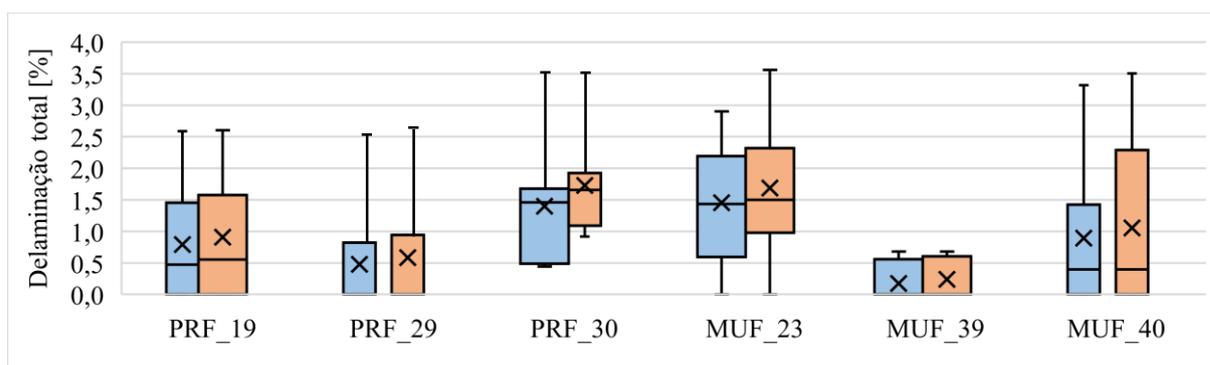


Figura 4.1 – Delaminação total registada nos provetes dos elementos do lote MST

Ao fim do 2º e 3º ciclos, dos elementos colados com PRF, observa-se que o elemento que apresentou valores de delaminação mais elevados foi o elemento PRF\_30. A delaminação total máxima registada nos PRF\_19 e PRF\_29 foi muito próxima, contudo a maioria dos provetes do elemento PRF\_29 apresentam uma delaminação total menor que os provetes do elemento PRF\_19. Dos elementos colados com MUF, ao fim do 2º e 3º ciclos o elemento cujos provetes apresentaram menor delaminação total, foi o elemento MUF\_39. Os provetes do elemento MUF\_23 apresentaram uma delaminação total ligeiramente superior ao elemento MUF\_40. Por análise da Tabela A.1 denota-se a influência que o tempo em fechado poderá ter na qualidade da colagem, sendo que os elementos MUF\_23, MUF\_39 e MUF\_40 detiveram um tempo em fechado de 11, 19 e 10 minutos, respetivamente. Verifica-se, portanto, que o tempo de fechado teve influência na delaminação registada, concluindo-se que um tempo de fechado de 20 minutos foi benéfico para as colagens.

Com o intuito de apurar possíveis causadores de delaminação, analisou-se a percentagem de delaminação ocorrida por cada linha de cola e determinou-se a proporção dessa delaminação quando comparada com a delaminação total da viga, valores que se apresentam na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Percentagem de delaminação por linha de cola ao fim do 3º ciclo no lote MST

	PRF_19	PRF_29	PRF_30	MUF_23	MUF_39	MUF_40
<b>Linha 1</b>	8%	0%	25%	34%	0%	8%
<b>Linha 2</b>	92%	0%	72%	9%	60%	5%
<b>Linha 3</b>	0%	100%	3%	57%	40%	88%

Nos elementos colados com MUF, é notória a presença de maior percentagem de delaminação na linha de cola 3. De toda a delaminação registada pela linha 3, destaca-se a percentagem de delaminação ocorrida pelo elemento MUF\_40, que segundo apresentado na Tabela A.2 foi o elemento colado com MUF com maior massa volúmica ( $767 \text{ kg/m}^3$ ) e com maior diferencial e massas volúmicas entre as lamelas coladas ( $186 \text{ kg/m}^3$ ).

Da análise das colagens realizadas com PRF, destaca-se o facto de que a delaminação do elemento PRF\_29 que ocorre toda na linha de cola 3 e nos elementos PRF\_19 e PRF\_30 essa delaminação ocorreu em maioria na linha de cola 2. A predominância de delaminação na linha de cola 3 (3 delaminações), terá sido motivada pela massa volúmica elevada da lamela 4 ( $732 \text{ kg/m}^3$ ) e também pela diferença de massas volúmicas das lamelas 3 e 4 ( $132 \text{ kg/m}^3$ ). Após observação da linha de cola 2 dos elementos PRF\_19 e PRF\_30 (Figura 4.2) observa-se que:

- i) No elemento PRF\_19 a delaminação ocorreu associada a uma fenda de retração da madeira;
- ii) No elemento PRF\_30 a delaminação ocorreu também associada a uma fenda de retração, contudo também em zonas onde se verificou a presença de lenho de Outono.

Vick (1999) refere que colagens com massas volúmicas superiores a  $700 \text{ kg/m}^3$  conduzem a dificuldades de penetração da linha de cola, contudo este valor é dependente do tipo de cola e da espécie. No seu estudo em madeira de Pinheiro Bravo e cola PRF, Gaspar (2010) constatou que um aumento de massa volúmica conduziu a um aumento na delaminação.

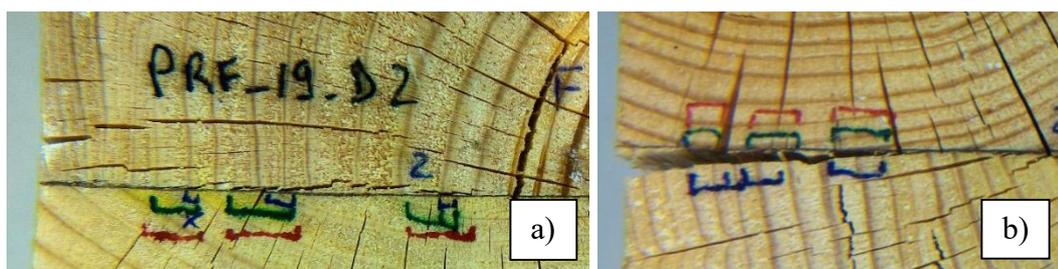


Figura 4.2 – a) Exemplo de linha de cola 2 do elemento PRF\_19; e b) Exemplo de linha de cola 2 do elemento PRF\_30

### Resistência ao corte

Segue-se uma análise da tensão de corte da linha de cola e da madeira. Gaspar (2010) constatou que para uma massa volúmica superior a  $620 \text{ kg/m}^3$  a resistência ao corte da linha de cola diminuía.

Segundo a disposição das lamelas adotada, as lamelas superiores apresentavam a massa volúmica inferior de todo o elemento, ao passo que a lamela inferior apresentava a massa volúmica mais elevada. Para cada tipo de cola fez-se um estudo da tensão de corte média das lamelas de madeira e da tensão de corte média de cada linha de cola para todos os elementos do mesmo lote. Para isso, agruparam-se as lamelas consoante a sua posição no elemento, o que corresponde a um agrupamento consoante a massa volúmica. Na Figura 4.3 é feita a apresentação gráfica dos valores médios de tensão de corte de cada lamela de madeira e de cada linha de cola, sendo a legenda apresentada na primeira e segunda colunas da Tabela 4.6. Para além da legenda da Figura 4.3, na Tabela 4.6 apresenta-se a massa volúmica média das lamelas pela sua posição.

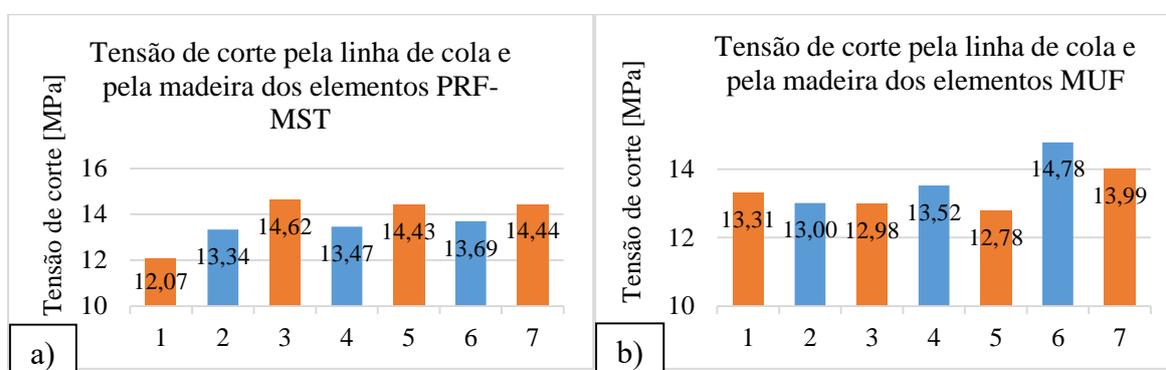


Figura 4.3 –Tensão de corte média das lamelas da madeira (laranja) e da linha de cola (azul): a) dos elementos MST colados com PRF e b) dos elementos MST colados com MUF

Tabela 4.6 – Massa volúmica média das lamelas do lote de MST e resistência ao corte média pela madeira e pela linha de cola

Lote MST	Colagens de PRF		Colagens de MUF	
	Massa volúmica [kg/m <sup>3</sup> ] (Desvio padrão)	Tensão de corte [MPa] (desvio padrão)	Massa volúmica [kg/m <sup>3</sup> ] (Desvio padrão)	Tensão de corte [MPa] (desvio padrão)
1 Lamela 1 (< massa volúmica)	575 (5)	12,07 (1,58)	570 (46)	13,31 (0,72)
2 Linha de cola 1	-	13,34 (1,12)	-	13,00 (0,82)
3 Lamela 2	652 (27)	14,62 (0,75)	658 (12)	12,98 (0,66)
4 Linha de cola 2	-	13,47 (1,21)	-	13,52 (1,14)
5 Lamela 3	604 (7)	14,43 (1,12)	613 (37)	12,78 (0,56)
6 Linha de cola 3	-	13,69 (1,14)	-	14,78 (0,83)
7 Lamela 4(> massa volúmica)	717 (15)	14,44 (0,32)	736 (34)	13,99 (0,99)

Das colagens com PRF, para as colagens entre lamelas mais densas, a tensão de corte média das linhas de cola é inferior à tensão de corte da madeira. Destes resultados observa-se também que a resistência ao corte da linha de cola não sofre alterações significativas com a alteração da massa volúmica das lamelas.

Das colagens realizadas com MUF, verifica-se um aumento da resistência da linha da cola, quando esta envolve madeiras mais densas. Verificou-se que nas colagens de madeira com massa volúmica mais elevada, a tensão de corte pela linha de cola foi superior à tensão de corte pela madeira. Constatou-se igualmente que a tensão de corte com a cola MUF foi superior na linha de cola 3 quando comparada com os resultados da cola PRF. Para as restantes linhas de cola os valores foram bastante próximos enquanto que nas tensões de corte pela madeira se registam diferenças nos valores apesar das massas volúmicas serem idênticas. Há que ter em conta que alguns dos valores de resistência ao corte tanto pela linha de cola como pela madeira poderão ter sido influenciados pela presença de nós (defeito mais evidente nesses casos).

Os resultados obtidos com cola PRF vão ao encontro dos obtidos por Lampreia (2010) em colagem de madeira de Pinheiro Bravo não tratado, onde a autora verifica os bons resultados apresentados por este tipo de cola nesta espécie. Os resultados das colagens realizadas com MUF para a situação de MST são igualmente satisfatórios.

#### 4.3.2 Madeira tratada antes de colada – MTAC

##### Delaminação

Segue-se na Figura 4.4 a apresentação os resultados de delaminação dos elementos colados com PRF e com MUF.

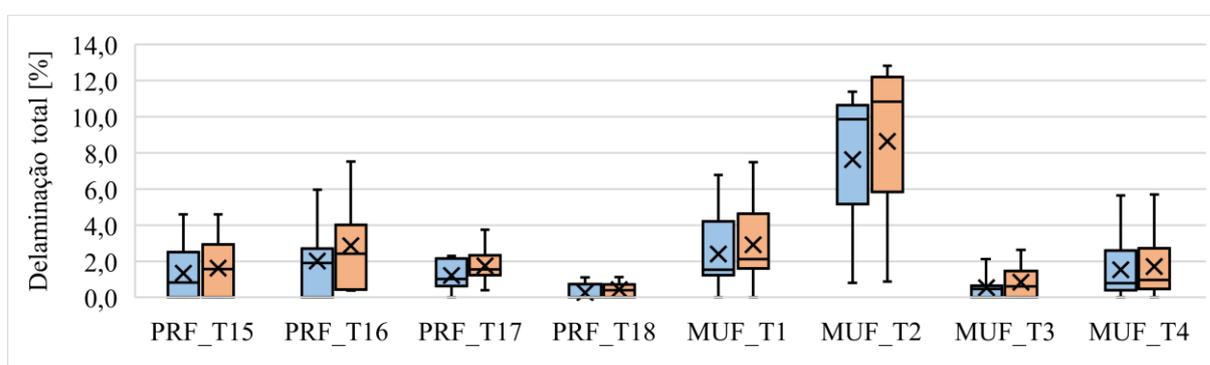


Figura 4.4 - Delaminação total registada nos provetes dos elementos do lote MTAC

Ao fim do 2º e 3º ciclo de ensaios, nas colagens realizadas com PRF, verifica-se que os provetes do elemento PRF\_16 apresentavam delaminação superior aos restantes elementos, sendo essa diferença mais evidente ao fim do terceiro ciclo. O elemento PRF\_T18 foi aquele que apresentou menor delaminação em ambos os ciclos. Dos elementos colados com MUF, aquele que apresentou maior delaminação foi o elemento MUF\_T2, destacando-se dos restantes pela sua elevada delaminação em ambos os ciclos. O elemento MUF\_T3 foi o que apresentou menor delaminação das colagens realizadas com MUF. Mais uma vez, com o intuito de identificar

possíveis fatores causadores de delaminação procede-se à análise da delaminação por cada linha de cola.

Tabela 4.7 - Percentagem de delaminação por linha de cola ao fim do 3º ciclo no lote MTAC

	PRF_T15	PRF_T16	PRF_T17	PRF_T18	MUF_T1	MUF_T2	MUF_T3	MUF_T4
<b>Linha 1</b>	8%	49%	78%	60%	2%	19%	0%	19%
<b>Linha 2</b>	62%	44%	14%	40%	47%	55%	76%	0%
<b>Linha 3</b>	30%	7%	8%	0%	51%	27%	24%	81%

Da análise visual do elemento PRF\_T15, constata-se que as lamelas 2 e 3 deste elemento apresentam anéis de crescimento (parte escura - lenho de Outono; parte clara – Lenho de Primavera) com uma inclinação aproximadamente paralela à linha de cola como se pode observar na Figura 4.5, grande parte da delaminação ocorrida nas linhas de cola 2 e 3 ocorreu em zonas onde estava presente lenho de outono numa das superfícies a colar. Também Knorz et al (2015) verificaram dificuldades de adesão em zonas onde era predominante o lenho de Outono, o que afetou a qualidade da colagem. Também nas delaminações ocorridas nas linhas de cola 1 e 2 do elemento PRF\_T16 se encontra influência da presença de lenho de Outono.

A reduzida delaminação registada nos elementos PRF\_T17 e PRF\_T18 pode ter sido consequência da reduzida percentagem de madeira tratada nas suas lamelas como indicado na Tabela 3.8. Em ambos os elementos a maior percentagem de delaminação ocorreu pela linha de cola 1. Após análise dos provetes onde ocorreu delaminação, observou-se que as delaminações ocorreram na sua maioria devido à presença de fendas de retração.



Figura 4.5 - Exemplo de delaminações devidas à presença de lenho de Outono no plano de colagem

Da informação observada na Tabela 4.7, os elementos deste lote colados com MUF caracterizam-se pela elevada percentagem de madeira com tratamento na sua secção transversal. O elemento MUF\_T2 caracterizado pela elevada delaminação registada apresentava maior percentagem de delaminação na linha de cola 2. Após observação dos provetes, verifica-se que as lamelas 2 e 3 apresentavam anéis de crescimento bastante espessos

e com uma inclinação horizontal, verificando-se que a maioria das delaminações ocorreram na superfície da lamela onde se encontrava lenho de Outono. Embora não fosse tão elevada, a maioria da delaminação no elemento MUF\_T1 ocorreu pelo mesmo motivo, presença de lenho de Outono. De registar que também nos elementos MUF\_T3 e MUF\_T4 as delaminações ocorreram em zonas com presença de lenho de Outono.

### Resistência ao corte

Segue-se na Figura 4.6 e Tabela 4.8 a análise dos resultados dos ensaios de resistência ao corte realizados nas lamelas de madeira e na linha de cola para os elementos do lote MTAC.

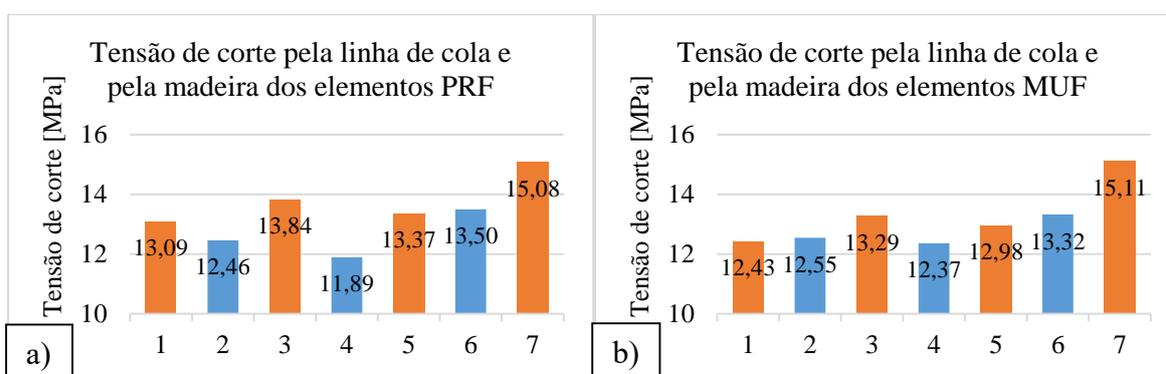


Figura 4.6 - Tensão de corte média das lamelas da madeira (laranja) e da linha de cola (azul):  
a) dos elementos MTAC colados com PRF e b) dos elementos MTAC colados com MUF

Tabela 4.8 - Massa volúmica média das lamelas do lote de MTAC e resistência ao corte média pela madeira e pela linha de cola

Lote MTAC	Colagens de PRF		Colagens de MUF	
	Massa volúmica [kg/m <sup>3</sup> ] (Desvio padrão)	Tensão de corte [MPa] (desvio padrão)	Massa volúmica [kg/m <sup>3</sup> ] (Desvio padrão)	Tensão de corte [MPa] (desvio padrão)
1 Lamela 1(< massa volúmica)	600 (18)	13,09 (0,73)	603 (23)	12,43 (0,82)
2 Linha de cola 1	-	12,46 (1,06)		12,55 (0,73)
3 Lamela 2	679 (22)	13,84 (0,92)	659 (14)	13,29 (0,57)
4 Linha de cola 2	-	11,89 (1,26)		12,37 (0,69)
5 Lamela 3	629 (19)	13,37 (0,55)	644 (13)	12,98 (0,92)
6 Linha de cola 3	-	13,50 (0,75)		13,32 (0,66)
7 Lamela 4(> massa volúmica)	747 (23)	15,08 (0,78)	703 (22)	15,11 (0,62)

Dos resultados obtidos para resistência ao corte para elementos colados com PRF e com MUF denota-se um aumento da tensão de corte pela madeira com o aumento da massa volúmica. A tensão de corte das linhas de cola, em ambos os tipos de cola, apresentava valores mais elevados para a linha de cola que faz a colagem da lamela com maior massa volúmica, ou seja, a linha 3. Conclui-se assim que colagens entre lamelas de massas volúmicas elevadas conduzem a resultados de tensão de corte mais elevadas.

Das colagens com cola PRF, o lote de MTAC usado neste trabalho foi submetido aos mesmos processos de tratamento que Lampreia (2010), contudo a taxa de retenção utilizado neste estudo ( $31,2 \text{ kg/m}^3$ ) era superior aos tratamentos utilizados por Lampreia (2010) ( $18,0 \text{ kg/m}^3$  e  $15,6 \text{ kg/m}^3$ ). A delaminação obtida nos provetes de MTAC foi superior aos resultados obtidos por Lampreia (2010) e a resistência ao corte da linha de cola foi inferior, para ambas as taxas de retenção. Conclui-se assim que em situações de MTAC, quando o tratamento aplicado em profundidade apresenta uma taxa de retenção superior, os elementos apresentam a uma delaminação superior e uma resistência ao corte pela linha de cola inferior. Contudo, dos resultados obtidos deste trabalho nenhum dos provetes apresenta valores superiores aos limites estabelecidos, o que valida a qualidade da colagem com PRF com madeira tratada em profundidade com aptidão para a utilização em classe de risco 4, com o produto de tratamento TANALITH E 8001 (taxa de retenção  $31,2 \text{ kg/m}^3$ ).

As colagens realizadas com MUF apresentaram delaminação superior aos limites de delaminação estabelecidos pela EN 14080 (CEN, 2013). Contudo essa delaminação superior foi apenas num elemento (MUF\_T2), apresentando os outros elementos delaminação inferior aos limites. Com a análise desse elemento constatou-se que a delaminação ocorreu principalmente devido à presença de lenho de Outono que devido à sua densidade impediu uma penetração adequada de cola na lamela em causa levando assim a uma delaminação excessiva. Contudo, observou-se que a presença de lenho de Outono na linha de cola 2 no elemento MUF\_T2 não afetou a tensão de corte dessa mesma linha de cola.

#### 4.3.3 Madeira tratada depois de colada – MTDC

##### Delaminação

Segue-se na Figura 4.7 a apresentação os resultados de delaminação dos elementos colados com PRF e com MUF.

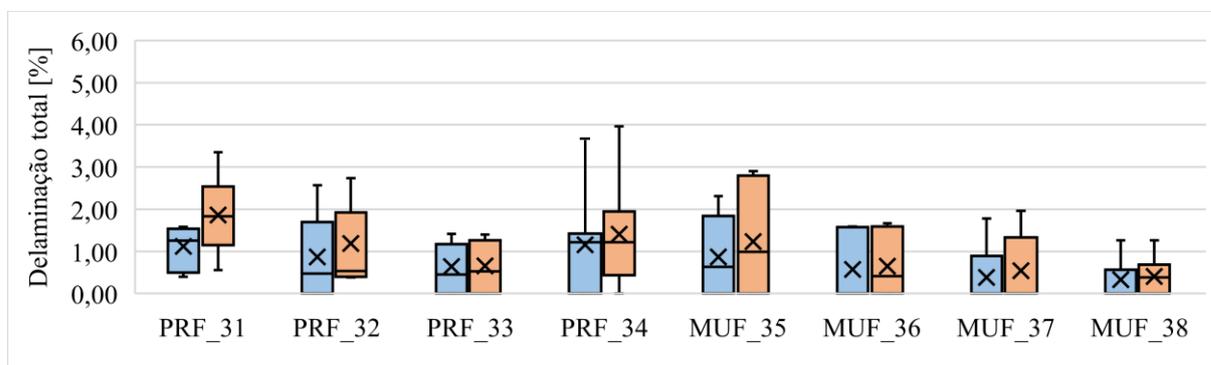


Figura 4.7 - Delaminação total registada nos provetes dos elementos do lote MTDC

Como já referido anteriormente, as delaminações ocorridas devido à presença das fissuras provenientes da secagem após aplicação do tratamento foram desprezadas. Na Figura 4.8 apresenta-se um exemplo dessas fissuras antes e após os ensaios de delaminação. Caso tivessem sido consideradas as delaminações onde se notou a influência das referidas fissuras, verificar-se-ia que a maior delaminação ocorreria nos elementos que na Tabela 3.6 se destacaram pela elevada fissuração da linha de cola (PRF\_31 e PRF\_32).

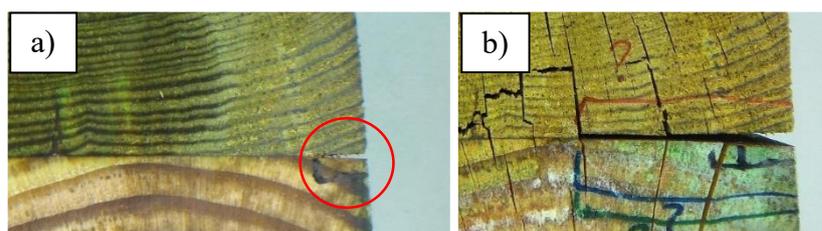


Figura 4.8 – (elemento PRF\_31) - a) fissuração pela linha de cola após tratamento e antes dos ensaios de delaminação; e b) delaminação provocada pela fissuração existente na linha de cola, registada após os ensaios de delaminação

Os elementos colados com PRF apresentam delaminação total média aproximada, não existindo elementos que se destaquem pela elevada delaminação. Embora o PRF\_34 apresente um provete com elevada delaminação, os restantes provetes não se destacam pela delaminação. Do 2º para o 3º ciclo, o elemento PRF\_31 destaca-se pelo aumento significativo da delaminação nos provetes. Das colagens realizadas com MUF, destaca-se o elemento MUF\_35 pelos provetes com delaminação superior aos restantes elementos. Para avaliar possíveis fatores causadores de delaminação procede-se mais uma vez à análise da delaminação ocorrida por linha de cola, que é apresentada na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 - Percentagem de delaminação por linha de cola ao fim do 3º ciclo no lote MTDC

	PRF_31	PRF_32	PRF_33	PRF_34	MUF_35	MUF_36	MUF_37	MUF_38
<b>Linha 1</b>	24%	39%	36%	49%	5%	0%	88%	86%
<b>Linha 2</b>	27%	25%	30%	51%	76%	36%	12%	0%
<b>Linha 3</b>	49%	36%	33%	0%	19%	64%	0%	14%

Os elementos PRF\_32 e PRF\_33 não apresentam destaques de delaminação por linha de cola, sendo a delaminação distribuída por todas as lamelas. A delaminação da linha de cola 3 do elemento PRF\_31 apresenta uma delaminação elevada quando comparada com as restantes linhas, essa diferença poderá ser influenciada pelo diferencial de massa volúmica entre as lamelas ( $194 \text{ kg/m}^3$ ) ou ainda pela elevada massa volúmica da lamela 4 ( $768 \text{ kg/m}^3$ ). O elemento PRF\_34 destaca-se pela delaminação registada na linha de cola 1 e 2. Por análise da delaminação dos provetes do elemento PRF\_34, observou-se que as delaminações registadas, ocorreram em grande maioria influenciadas pela presença de uma fenda de retração. Dos

elementos colados com MUF, o elemento MUF\_36 apresenta maior percentagem de delaminação pela linha de cola 3, sendo nesta linha de cola que se verifica o maior diferencial de massa volúmica entre lamelas coladas ( $213 \text{ kg/m}^3$ ) e onde se verifica também a elevada massa volúmica da lamela 4 ( $784 \text{ kg/m}^3$ ). Após análise dos restantes provetes que apresentaram delaminação mais elevada observou-se que a delaminação se deveu na sua maior parte pela presença de lenho de outono e fendas de retração.

### Resistência ao corte

À semelhança dos lotes anteriores, apresentam-se as Figura 4.9 e a Tabela 4.10, onde estão indicados os resultados de tensão de corte registados nos ensaios de resistência ao corte pela linha de cola e pela madeira.

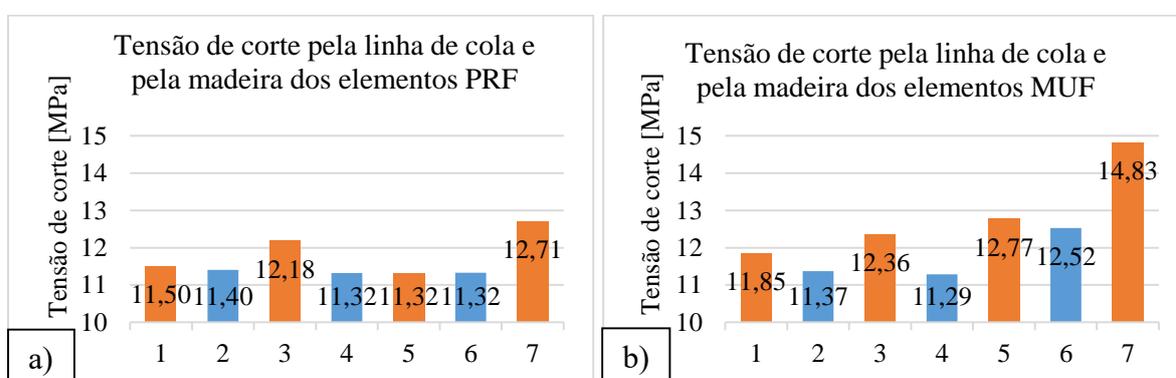


Figura 4.9 - Tensão de corte média das lamelas da madeira (laranja) e da linha de cola (azul):  
a) dos elementos MTDC colados com PRF e b) dos elementos MTDC colados com MUF

Tabela 4.10 - Massa volúmica média das lamelas do lote de MTDC e resistência ao corte média pela madeira e pela linha de cola

Lote MTDC	Colagens de PRF		Colagens de MUF	
	Massa volúmica [kg/m <sup>3</sup> ] (Desvio padrão)	Tensão de corte [MPa] (desvio padrão)	Massa volúmica [kg/m <sup>3</sup> ] (Desvio padrão)	Tensão de corte [MPa] (desvio padrão)
1 Lamela 1 (< massa volúmica)	580 (35)	11,50 (0,63)	556 (6)	11,85 (0,69)
2 Linha de cola 1		11,40 (0,83)		11,37 (1,11)
3 Lamela 2	662 (38)	12,18 (1,24)	649 (21)	12,36 (1,53)
4 Linha de cola 2		11,32 (1,16)		11,29 (1,14)
5 Lamela 3	592 (26)	11,32 (1,16)	604 (25)	12,77 (1,03)
6 Linha de cola 3		11,32 (1,42)		12,52 (0,87)
7 Lamela 4(> massa volúmica)	714 (41)	12,71 (1,12)	738 (46)	14,83 (0,97)

Dos resultados dos ensaios de resistência ao corte pela madeira verifica-se que, para ambas as colas, de uma forma geral, massas volúmicas elevadas conduzem a tensões de corte mais elevadas. Nas colagens realizadas com PRF verifica-se que em todas as linhas de cola a tensão de corte foi aproximadamente a mesma. Nas colagens realizadas com MUF verifica-se que na

linha de cola 3, onde as lamelas coladas têm massa volúmica mais elevada, a tensão de corte foi superior às restantes. De registar também a diferença entre a tensão de corte pela linha de cola 3 e pela madeira nas lamelas 3 e 4 que foram bastante inferiores no caso das colagens com PRF. Esta diferença poderá estar relacionada pela diferença de teor de água nos provetes no momento de ensaio (ver Tabela 3.5).

No lote de MTDC, as colagens realizadas com PRF apresentam resultados de delaminação semelhantes aos obtidos da colagem do lote MST. Dos resultados de resistência ao corte a resistência ao corte das linhas de cola foi muito próxima, não sendo evidente uma influência da massa volúmica das lamelas coladas. Das colagens realizadas com MUF, os resultados de delaminação foram também muito semelhantes aos obtidos do lote MST. Dos resultados de resistência ao corte verificou-se um aumento da resistência da linha de cola nas colagens de madeiras com massas volúmicas mais elevadas.

Dos resultados de delaminação do lote de MTDC, verificou-se que a abertura de fissuras pela linha de cola após o tratamento, influencia o desempenho da colagem. Conclui-se que, em elementos de MLC, a existência de fissuras que tenham surgido após o tratamento pode levar a um aumento da delaminação dos elementos, devem assim ser tomadas precauções nesse sentido (p. ex. aparelhamento após a aplicação de tratamento).

## 5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

A EN 14080 (CEN, 2013) indica o Pinheiro Bravo como uma espécie de madeira apta para utilização em estruturas de MLC. Sendo esta uma espécie em abundância na floresta portuguesa, o seu uso em estruturas de MLC tem ganho um especial interesse nos últimos anos por se apresentar uma alternativa ao uso de madeiras importadas. Nos últimos anos, têm sido realizados vários estudos do desempenho desta espécie em estruturas de MLC em classe de serviço 3.

Este estudo teve como objetivos: i) estudar a influência que a fase de aplicação de tratamento preservador por impregnação tem na qualidade da colagem; ii) estudar o desempenho das colagens realizadas com cola MUF em madeira de Pinheiro Bravo tratada e não tratada; e iii) analisar a influência dos parâmetros relativos à colagem na qualidade das colagens.

Com o intuito de atingir estes objetivos, foram fabricados em laboratório 22 elementos de 1m de comprimento, 11 colados com PRF e 11 colados com MUF. De cada tipo de cola foram criados três lotes: i) MST - madeira sem tratamento (3 elementos); ii) MTAC - madeira tratada antes de colada (4 elementos); e iii) MTDC - madeira tratada depois de colada (4 elementos). Na sua totalidade foram realizados ensaios de delaminação a 154 provetes e ensaios de resistência ao corte pela linha de cola a 220 provetes e ensaios de resistência ao corte pela madeira a 88 provetes.

Dos ensaios de delaminação realizados aos três lotes obteve-se uma delaminação média total ao fim do 3º ciclo para as colagens com PRF de: i) MST – 1,07%; ii) MTAC – 1,67%; iii) MTDC – 1,28%; e para as colagens com MUF de: i) MST – 0,99%; ii) MTAC – 3,52%; e MTDC – 0,71%. De forma geral, a madeira tratada antes de colada apresenta delaminação superior aos restantes casos para ambas as colas. Em diversas situações verificou-se que a delaminação ocorria com especial predominância na linha de cola 3 que compreendia a colagem da lamela com maior massa volúmica do elemento. A elevada massa volúmica das lamelas inferiores e a elevada diferença entre massas volúmicas das lamelas adjacentes indicou ser um dos fatores causadores de delaminação, também identificado por Gaspar (2010). Verificou-se igualmente que a presença de tratamento retido nas lamelas coladas leva a um aumento de delaminação nos elementos com elevada percentagem de madeira tratada (elevada presença de borne). Nas situações de madeira tratada antes de colada identifica-se como principal causador de delaminação a presença de lenho de Outono.

Dos ensaios de resistência ao corte pela linha de cola dos elementos colados com PRF obtiveram-se os seguintes valores médios de tensão de corte: i) MST – 13,50 MPa; ii) MTAC – 12,62 MPa; e iii) MTDC – 11,35 MPa. Nos elementos colados com MUF, os resultados médios foram: i) MST – 13,77 MPa; ii) MTAC – 12,75 MPa; e iii) MTDC – 11,73 MPa. De uma forma geral, para ambas as colas, a madeira tratada leva a uma redução da resistência ao corte da linha de cola, embora mais significativa na madeira tratada depois de colada. Dos ensaios de rotura pela madeira conclui-se que a madeira tratada antes de colada apresenta uma resistência ao corte muito próxima da madeira não tratada, por sua vez a madeira quando tratada depois de colada leva a uma tensão de corte inferior às restantes.

A madeira tratada antes de colada com aptidão para uso em classe de risco 3, como estudou Lampreia (2010), conduz a uma melhor qualidade de colagem do que em madeira com aptidão para uso em classes de risco 4. Contudo ambas as colagens apresentam valores de delaminação e resistência ao corte dentro dos estipulados pela EN 14080 (CEN, 2013).

Quando o tratamento é aplicado antes da colagem, aquando das colagens das lamelas é facilmente identificada a presença de madeira com e sem tratamento, sendo possível através de um controlo de produção apertado garantir a proteção de todo o elemento de madeira. Contudo esta fase de tratamento leva a um aumento de delaminação que se agrava na presença de lenho de Outono nas superfícies das lamelas a colar. Ainda assim este aumento de delaminação não excedeu os limites estabelecidos pela normalização em vigor.

Sendo o tratamento aplicado depois da colagem, em toda a superfície exterior dos elementos de MLC se verifica a existência de tratamento preservador. Contudo, na presença de madeira de cerne (impregnável no caso do Pinheiro Bravo) não é garantido o tratamento de toda a secção transversal dos elementos, o que pode em situações mais adversas por em causa a durabilidade dos elementos. Após a secagem, estes elementos apresentam fissuração pela linha de cola e pela madeira, o que pode por em causa a qualidade da colagem e até mesmo a durabilidade dos elementos de MLC. De referir também o aspeto estético que é afetado pelas fissuras geradas na secagem que poderão ser colmatadas com a colagem de elementos de maior largura e consequente aparelhamento após tratamento e secagem. Sempre que se realize o tratamento nesta fase, o teor de água da madeira sofre alterações, pelo que se deve realizar uma secagem cuidada para minimizar a fissuração dos elementos.

Para trabalhos futuros sugere-se o estudo dos seguintes pontos: i) colagem de elementos somente com borne de modo a eliminar uma variável aquando da análise de madeira colada antes ou depois de tratar; ii) execução de elementos cuja massa volúmica apresente a menor variação possível para minimizar ao máximo a sua influência e até mesmo analisar o valor a partir do qual a colagem poderá conduzir a delaminação excessiva.; iii) tendo em conta a

influência do lenho de outono, procurar estabelecer critérios de colagem tendo em conta a realidade em ambiente industrial: iv) avaliação da influência do tempo em fechado nas colagens realizadas com madeira de pinheiro bravo para as diversas colas disponíveis no mercado; e v) avaliação da influência da fase de tratamento preservador nas propriedades mecânicas dos elementos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ammann, S., Schlegel, S., Beyer, M., Aehlig, K., Lehmann, M., Jung, H. e Niemz, P. (2016). "Quality assessment of glued ash wood for construction engineering". **74**.

APA (2008). "Glulam Product Guide". [www.apawood.org](http://www.apawood.org), APA - The Engineered Wood Association.

Bourreau, D., Aimene, Y., Beauchene, J. e Thibaut, B. (2013). "Feasibility of glued laminated timber beams with tropical hardwoods." *European Journal of Wood and Wood Products*, 71,(5), 653-662.

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

CEN (1994a). "EN 350-2 - 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". Brussels.

CEN (1994b). "EN 390 - Glued laminated timber - Sizes - Permissible deviations". Brussels.

CEN (1995). "EN 392 - Glued laminated timber - Shear test of glue lines". Brussels.

CEN (1999). "EN 1194 - Timber structures - Glued laminated timber - Strength classes and determination of characteristic values". Brussels.

CEN (2001a). "EN 385 - Finger jointed structural timber - Performance requirements and minimum production requirements". Brussels.

CEN (2001b). "EN 386 - Glued laminated timber - Performance requirements and minimum production requirements". Brussels.

CEN (2001c). "EN 387 - Glued laminated timber. Large finger joints. Performance requirements and minimum production requirements". Brussels.

CEN (2001d). "EN 391 - Glued laminated timber - Delamination test of glue lines". Brussels.

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

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

CEN (2003). "EN 1995-1-1 - Eurocode 5 - Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings". European Committee for Standardization, Brussels.

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

CEN (2005a). "EN 13183-3 - Moisture content of a piece of sawn timber - Part 3: Estimation by capacitance method". European Committee for Standardization, Brussels.

CEN (2005b). "EN 14080 - Timber structures - Glued laminated timber - Requirements". Brussels.

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

CEN (2006). "EN 301 - Adhesives, phenolic and aminoplastic, for load-bearing timber structures - Classification and performance requirements". Brussels.

CEN (2009). "EN 14081-4. Timber structures - Strength graded structural timber with rectangular cross section - Part 4: Machine grading - Grading machine settings for machine controlled systems". Brussels.

CEN (2013). "EN 14080 - Timber structures - Glued laminated timber and glued solid timber - Requirements". Brussels.

Cruz, H. (1985). "Aplicação da madeira de pinho bravo em estruturas lameladas-coladas. Ensaios de colagem para uso em condições de exposição exterior.". LNEC, Lisboa.

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

Custodio, J., Broughton, J. e Cruz, H. (2009). "A review of factors influencing the durability of structural bonded timber joints." International Journal of Adhesion and Adhesives, 29,(2), 173-185.

Ebnesajjad, Ed. (2008). Adhesives Technology Handbook. Norwich, NY, USA, William Andrew.

Franco da Costa, J. (1978). "Aplicação da madeira de pinho bravo em estruturas coladas. Viabilidade da colagem". LNEC, Lisboa.

Gaspar, F. (2006). "Estruturas de madeira lamelada-colada - Viabilidade da utilização da madeira de Pinheiro de Pinho bravo tratada com produto preservador". Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.

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

IPQ (2011). "NP EN 335-2 - Durabilidade da madeira e de produtos derivados da madeira. Definição das classes de risco. Parte 2: Aplicação à madeira maciça". Caparica, Portugal.

Knorz, M., Neuhaeuser, E., Torno, S. e van de Kuilen, J.-W. (2015). "Influence of surface preparation methods on moisture-related performance of structural hardwood–adhesive bonds." *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 57, 40-48.

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

Lorenz, L. F. e Frihart, C. (2006). "Adhesive bonding of wood treated with ACQ and copper azole preservatives." *Forest Products Journal*, 56,(9), 90-93.

Martins, C. (2015). "Avaliação estrutural de elementos de madeira lamelada colada". Projeto de Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil Universidade de Coimbra, Coimbra.

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.

Plaster, O. B., Oliveira, J. T. d. S., Abrahão, C. P. e Braz, R. L. (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". LNEC, Lisboa.

Silva, A. F. H. d. (2010). "Análise da viabilidade de utilização, em Caminhos de Ferro, de travessas de madeira obtidas a partir de lamelados de madeira, em alternativa às travessas de madeira tradicionais". Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, Portugal.

Simpson, W. T., A. (1999). "Wood Handbook - Wood as an Engineering Material - Chapter 3". Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, Wisconsin, U.S.A.

Vick, C. B. (1999). "Wood Handbook - Wood as an Engineering Material - Chapter 9". Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, Wisconsin, U.S.A.

## ANEXOS

### Anexo A – Parâmetros dos elementos colados

Tabela A.1 – Parâmetros de colagem adotados em cada elemento

Situação de tratamento	Elemento	Relação Cola/End. [g/g]	Quantidade de cola [g/m <sup>2</sup> ]	Tempo aberto [min]	Tempo fechado [min]	Pressão de Aperto [MPa]	Tempo de pressão [min]
MST	PRF_19	100/20	350	3	13	0,8	240
	PRF_29	100/20	350	5	15	0,8	240
	PRF_30	100/20	350	5	5	0,8	240
MTAC	PRF_T15	100/20	350	2	12	0,8	240
	PRF_T16	100/20	350	2	5	0,8	240
	PRF_T17	100/20	350	2	12	0,8	240
	PRF_T18	100/20	350	2	5	0,8	240
MTDC	PRF_31	100/20	350	3	15	0,8	240
	PRF_32	100/20	350	3	5	0,8	240
	PRF_33	100/20	350	3	15	0,8	240
	PRF_34	100/20	350	3	5	0,8	240
MST	MUF_23	100/20	400	3	11	0,6	540
	MUF_39	100/20	400	3	19	0,6	540
	MUF_40	100/20	400	3	10	0,6	540
MTAC	MUF_T1	100/20	400	3	19	0,6	540
	MUF_T2	100/20	400	3	10	0,6	540
	MUF_T3	100/20	400	3	19	0,6	540
	MUF_T4	100/20	400	3	10	0,6	540
MTDC	MUF_35	100/20	400	3	18	0,6	540
	MUF_36	100/20	400	3	10	0,6	540
	MUF_37	100/20	400	3	19	0,6	540
	MUF_38	100/20	400	3	10	0,6	540

Tabela A.2 – Massa volúmica por tábuas, por elemento e por lote

Cola PRF		Massa volúmica [kg/m <sup>3</sup> ]			Cola MUF		Massa volúmica [kg/m <sup>3</sup> ]				
Elementos	/tábua	/elemento	/lote	Elementos	/tábua	/elemento	/lote				
PRF_19	573	635	637	MUF_23	623	655	644				
	663				644						
	601				654						
	702				699						
PRF_29	581	633			MUF_39	544		639			
	621					664					
	599					605					
	732					743					
PRF_30	572	643			MUF_40	543		639			
	671					666					
	612					581					
	716					767					
PRF_T15	573	663	663	MUF_T1	606	650	652				
	683				640						
	638				636						
	759				718						
PRF_T16	604	659			MUF_T2	608		650			
	652					670					
	610					650					
	770					671					
PRF_T17	614	663			MUF_T3	572		654			
	705					670					
	616					660					
	716					715					
PRF_T18	607	669		MUF_T4	627	655					
	675				656						
	650				631						
	743				707						
PRF_31	570	635	637	MUF_35	564	638	637				
	627				633						
	574				605						
	768				749						
PRF_32	630	640			MUF_36	554		643			
	632					662					
	631					571					
	668					784					
PRF_33	551	637			MUF_37	550		632			
	701					672					
	583					631					
	713					675					
PRF_34	568	635		MUF_38	555	634					
	688				629						
	579				609						
	706				743						