

NATÁLIA ANDRADE BIANCHI

Avaliação da delaminação e da resistência da linha de cola de elementos de MLC com base no projeto de revisão da norma ABNT NBR 7190:2013 considerando madeiras de reflorestamento tratadas com CCA e sem tratamento preservativo

Guaratinguetá - SP

2020

Natália Andrade Bianchi

Avaliação da delaminação e da resistência da linha de cola de elementos de MLC com base no projeto de revisão da norma ABNT NBR 7190:2013 considerando madeiras de reflorestamento tratadas com CCA e sem tratamento preservativo

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Julio Cesar Molina

Guaratinguetá - SP
2020

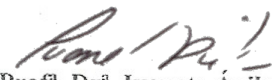
B577a	<p>Bianchi, Natália Andrade</p> <p>Avaliação da delaminação e da resistência da linha de cola de elementos de MLC com base no projeto de revisão da norma ABNT NBR 7190: 2013 considerando madeiras de reflorestamento tratadas com CCA e sem tratamento preservativo / Natália Andrade Bianchi – Guaratinguetá, 2020.</p> <p>74 f : il.</p> <p>Bibliografia: f. 79-82</p> <p>Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2020.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Julio Cesar Molina</p> <p>1. Normalização. 2. Lâminas de madeira. 3. Colagem. I. Título</p> <p>CDU 621.771(043)</p>
-------	---

NATÁLIA ANDRADE BIANCHI

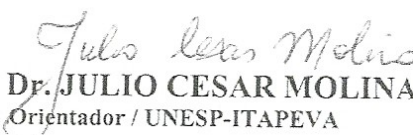
ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
"MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA"

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO: MESTRADO

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof.ª. Dr.ª. Ivonete Ávila
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. JULIO CESAR MOLINA
Orientador / UNESP-ITAPEVA


Prof. Dr. ANDRÉ LUIS CHRISTOFORO
UFSCAR


Prof.ª. Dr.ª. CRISTIANE INÁCIO DE CAMPOS
UNESP-ITAPEVA

DADOS CURRICULARES

NATÁLIA ANDRADE BIANCHI

NASCIMENTO	19.01.1995 – Itapeva / SP
FILIAÇÃO	Jorge Fernando Camargo Bianchi Liliana Monica Freitas Andrade Bianchi
2013/2017	Curso de Graduação Engenharia Industrial Madeireira – UNESP/Itapeva
2018/2020	Curso de Graduação Engenharia de Produção – UNESP/Itapeva
2018/2020	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá – UNESP/Guaratinguetá

Dedico este trabalho aos meus pais Liliana e Jorge Fernando, meus anjos protetores. Ao meu irmão e companheiro Daniel. Ao amor da minha vida, Vitor.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo constante amparo;

À minha família por construir tudo o que sou hoje;

Ao meu namorado por tanto amor, presença e suporte;

Ao meu orientador Prof. Dr. Julio Cesar Molina por me direcionar ao longo da construção deste trabalho de Mestrado;

Ao técnico Juliano Brito por todo o auxílio e paciência com meus incontáveis pedidos de ajuda;

À Prof.^a Dra. Cristiane Inácio de Campos pela amizade e apoio;

Aos meus colegas e amigos Felipe Dutra, Douglas Páschoa, Victor Andrade, Carolina Barros, Karina Oliveira, Laís Barros, Estela Galvão, Claudinei Rodrigues e João Paulo Cachaneski por ajudarem a construir esse trabalho, serei eternamente grata;

Aos meus demais amigos por estarem ao meu lado nos bons e maus momentos;

Por fim, agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo suporte financeiro à pesquisa Mestrado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior- Brasil (CAPES) - código de financiamento 88882.433457/2019-01.

RESUMO

A Madeira Laminada Colada (MLC) é uma alternativa promissora no mercado brasileiro de construção, as indústrias vêm buscando alternativas que melhorem a qualidade de seus produtos seja através das espécies de madeira utilizadas, tipo de adesivo ou processo de fabricação. Este estudo avaliou os métodos de ensaio de delaminação e resistência da linha de cola propostos pelo projeto de revisão da norma brasileira de madeiras ABNT NBR 7190:1997. Foram considerados os métodos de ensaio ABNT NBR PN 02:126.10-001-5 e ABNT NBR ISO PN 02:126.10-001-3. Foram utilizados dois gêneros de madeiras (Pinus e Eucalipto), com e sem tratamento preservativo das lamelas com CCA e três tipos de adesivos (poliuretanas mono e bicomponente e resorcinol-formaldeído). Para os ensaios de delaminação e resistência da linha de cola, foram confeccionados os dispositivos necessários (autoclave e dispositivo para ensaio de cisalhamento da linha de cola). Os resultados de delaminação revelam que os valores médios obtidos para as combinações ERS (Eucalipto - Resina resorcinol-formaldeído - In natura), EBS (Eucalipto - Resina poliuretana bicomponente - In natura) e PRS (Pinus - Resina resorcinol-formaldeído - In natura) apresentaram valores dentro do aceitável de 4% pelo projeto de norma PN 02:126.10-0001-5. Os resultados da análise estatística entre as linhas de cola mostraram que há diferença significativa entre as resistências médias ao cisalhamento. De modo geral, as combinações empregando Eucalipto apresentaram melhor desempenho que aquelas que empregaram Pinus.

PALAVRAS-CHAVE: Normalização. Delaminação. Adesivo estrutural. MLC. Resistência da linha de cola. Qualidade de colagem.

ABSTRACT

Glued Laminated Wood (GLT) is a promising alternative to the Brazilian construction market, industries have been looking for alternatives that improve the quality of their products through the wood species used, type of adhesive or manufacturing process. This study evaluated the glue line delamination and resistance test methods proposed by the ABNT NBR 7190: 1997 Brazilian wood standard review project. The test methods ABNT NBR PN 02: 126.10-001-5 and ABNT NBR ISO PN 02: 126.10-001-3 were considered. Two genera of wood (Pinus and Eucalyptus) were used, with and without wood preservative treatment with CCA and three types of adhesives (mono and bicomponent polyurethanes and resorcinol formaldehyde). For the glue line delamination and strength tests, the necessary devices were made (autoclave and glue line shear test device). The delamination results show that the mean values obtained for the combinations ERS (Eucalyptus - Resorcinol-formaldehyde resin - In natura), EBS (Eucalyptus - Two-component polyurethane resin - In natura) and PRS (Pinus - Resorcinol-formaldehyde resin - In natura) presented values within the acceptable range of 4% by draft standard PN 02: 126.10-0001-5. The results of the statistical analysis between the glue lines showed that there is a significant difference between the average shear strengths. In general, combinations using Eucalyptus performed better than those using Pinus.

KEYWORDS: Normalization. Delamination Structural adhesive. Glulam. Glue line resistance. Bonding quality.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Viga de MLC	21
Figura 2 - Tipos de emenda: (A) de topo; (B) biselada e (C) dentada.	21
Figura 3 - Nós: (A) Medição; (B) Conjunto de nós; (C) Nós individuais próximos.	27
Figura 4 - Encurvamento.	27
Figura 5 - Arqueamento.....	28
Figura 6 - Torcimento.....	28
Figura 7 - CP para ensaio de resistência à compressão paralela às fibras.	29
Figura 8 - CP para ensaio de resistência ao cisalhamento paralelo às fibras.....	30
Figura 9 - CP para determinação da umidade e densidade aparente da madeira.....	31
Figura 10 - (A) CP para ensaio de delaminação da linha de cola; (B) Medição do comprimento da linha de cola.....	33
Figura 11 - CP para ensaio de cisalhamento da linha de cola.	34
Figura 12 - Critério de identificação das combinações com madeira de Eucalipto.	44
Figura 13 - Critério de identificação das combinações com madeira de Pinus.....	44
Figura 14 - Peças de madeira doadas pela Vale do Cedro.....	45
Figura 15 - Adequação das lamelas: (A) Secagem ao ar por entablicamento; (B) Controle de umidade das lamelas; (C) Lamelas ensacadas para manutenção da umidade.	46
Figura 16 - Tratamento preservativo das lamelas: (A) Material pronto para o tratamento; (B) Secagem após tratamento.	47
Figura 17 - Caracterização mecânica dos CPs: (A) Compressão; (B) Cisalhamento; (C) Flexão estática.	47
Figura 18 - Classificação visual das lamelas: (a) Gabarito; (b) Lamelas atribuídas às respectivas classes.	48
Figura 19 - Pré-organização das lamelas para montagem das vigas: (A) Lamelas de Eucalipto; (B) Lamelas de Pinus.	49
Figura 20 - Aplainamento das lamelas.	49
Figura 21 - Colagem das vigas: (A) Pesagem da resina resorcinol-formaldeído e do catalisador; (B) Aplicação da mistura resina-catalisador nas lamelas; (C) Passagem de fita na viga após colagem.....	50
Figura 22 - Prensagem: (A) Posicionamento das vigas; (B) Aplicação do torque; (C) Vigas em processo de prensagem.	51
Figura 23 - Uniformização das vigas de MLC: (A) Desengrossadeira; (B) Serra Circular.	51

Figura 24 - Esquema dos CPs de delaminação e resistência na linha de cola por viga.....	52
Figura 25 - Equipamentos (autoclave) para ensaio de delaminação na linha de cola.	53
Figura 26 - Ensaio de delaminação: (A) Antes do ensaio; (B) Após o ensaio; (C) Amostras durante secagem em estufa.	53
Figura 27 - Critério de identificação das linhas de cola (LC).	54
Figura 28- Ensaio de resistência ao cisalhamento da linha de cola: (A) Posicionamento do CP no dispositivo; (B) Posicionamento da parte móvel do dispositivo; (C) Demonstração da área de aplicação de força de cisalhamento; (D) Ensaio sendo realizado.	55
Figura 29 - CPs de delaminação da combinação ERS: (A) CP com delaminação aceitável; (B) CP com delaminação acima do percentual máximo.....	58
Figura 30 - Boxplot de comparação entre tratamentos para combinações com Eucalipto...	61
Figura 31 - Boxplot de comparação entre tratamentos para combinações com Pinus.	62
Figura 32 - Boxplot combinação entre espécies sem tratamento.	63
Figura 33 - Boxplot combinação entre espécies tratadas.	64
Figura 34 - Ruptura por cisalhamento da linha de cola: (A) CP com 100% de falha na madeira, combinação ERS; (B) CP com 0% de falha na madeira, combinação PMS.	66
Figura 35 - Exemplos de modo de ruptura da combinação ERS.....	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação visual de defeitos para a madeira de Pinus.	28
Tabela 2 - Classificação visual de defeitos para a madeira de Eucalipto.	29
Tabela 3 - Resumo dos métodos de ensaio de delaminação.	38
Tabela 4 - Resultados médios de delaminação.	57
Tabela 5 - Resistências médias ao cisalhamento da linha de cola (MPa) de CPs de 7,5 cm de altura.	59
Tabela 6 - Resistências médias ao cisalhamento da linha de cola (MPa) de CPs de 10 cm de altura.	59
Tabela 7 - P-valor para a comparação de combinações com Eucalipto com e sem tratamento.	61
Tabela 8 - P-valores para comparação de combinações com Pinus com e sem tratamento.	62
Tabela 9 - P-valores para comparação de espécies entre combinações sem tratamento.	64
Tabela 10 - P-valores para comparação de espécies entre combinações tratadas.	65
Tabela 11 - Resultados de percentual médio de falha na madeira (FM).	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MLC	Madeira laminada colada
CP	Corpo de prova
LC	Linha de cola
PN	Projeto de norma
CCA	<i>Chromated Copper Arsenate</i> (Arseniato de Cobre Cromatado)
ERS	Eucalipto - Resina resorcinol-formaldeído - In natura
EMS	Eucalipto - Resina poliuretana monocomponente - In natura
EBS	Eucalipto - Resina poliuretana bicomponente - In natura
PRS	Pinus - Resina resorcinol-formaldeído - In natura
PMS	Pinus - Resina poliuretana monocomponente - In natura
PBS	Pinus - Resina poliuretana bicomponente - In natura
ERT	Eucalipto - Resina resorcinol-formaldeído – Tratado
EMT	Eucalipto - Resina poliuretana monocomponente – Tratado
EBT	Eucalipto - Resina poliuretana bicomponente – Tratado
PRT	Pinus - Resina resorcinol-formaldeído – Tratado
PMT	Pinus - Resina poliuretana monocomponente – Tratado
PBT	Pinus - Resina poliuretana bicomponente – Tratado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	17
2.1	GERAL	17
2.2	ESPECÍFICOS.....	17
3	JUSTIFICATIVA	18
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
4.1	FUNDAMENTOS	19
4.1.1	Madeira	19
4.1.2	Madeira de reflorestamento	19
4.1.3	Madeira laminada colada	20
4.2	FATORES QUE INFLUENCIAM A QUALIDADE DE COLAGEM	22
4.2.1	Tratamento preservante da madeira	22
4.2.2	Adesivos	23
4.3	CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA	25
4.3.1	Classificação visual	26
4.3.2	Ensaio de flexão estática	29
4.3.3	Ensaio de compressão paralela às fibras	29
4.3.4	Ensaio de cisalhamento paralelo às fibras	30
4.3.5	Umidade e densidade aparente	31
4.4	ENSAIOS DE EFICIÊNCIA DE COLAGEM.....	32
4.4.1	Ensaio de delaminação da linha de cola	32
4.4.2	Ensaio de resistência ao cisalhamento da linha de cola	34
4.5	DOCUMENTOS NORMATIVOS E MÉTODOS DE ENSAIO	35
4.5.1	Norma europeia: EN 14080:2013	35
4.5.2	Norma americana: ASTM D2559:2004	36
4.5.3	Normas canadenses: CSA 112.9:2004 E CSA 112.10:2007	36
4.5.4	Procedimento descrito na ABNT /PN 02:126.10-001-5	37
4.6	ESTUDOS DESENVOLVIDOS SOBRE MLC	39
4.7	CONCLUSÕES SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	42
5	MATERIAL E MÉTODOS	44
5.1	CONFECÇÃO DAS LAMELAS E DOS CPs DE CARACTERIZAÇÃO	45
5.2	ARMAZENAMENTO E CONTROLE DE UMIDADE DAS LAMELAS.....	46

5.3	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO.....	47
5.4	CLASSIFICAÇÃO VISUAL	48
5.5	FABRICAÇÃO DAS VIGAS DE MLC E PRODUÇÃO DE CPs	48
5.6	ENSAIOS DE DELAMINAÇÃO DA LINHA DE COLA	52
5.6.1	Análise dos resultados de delaminação.....	54
5.7	ENSAIOS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DA LINHA DE COLA.....	54
5.7.1	Análise estatística dos resultados de resistência ao cisalhamento da linha de cola.....	55
5.7.2	Análise da falha na madeira	56
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	57
6.1	DELAMINAÇÃO.....	57
6.2	RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DA LINHA DE COLA	58
6.2.1	Análise da linha de cola.....	58
6.2.2	Comparação entre combinações	61
6.2.3	Falha na madeira	65
7	CONCLUSÕES.....	70
8	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	72
	REFERÊNCIAS	73

1 INTRODUÇÃO

Ainda que seja um país com grande disponibilidade de recursos madeireiros, o Brasil não consome a madeira com abundância em sistemas construtivos devido a questões culturais e pouco conhecimento acerca do assunto. Além disso, normalmente não ocorre a prática de manutenção preventiva em estruturas de madeira no país, fator este que contribui para o baixo consumo do material.

Tendo em vista a redução da utilização de madeiras brutas e exploração de madeira nativa para a construção civil, cresce a utilização de madeiras de reflorestamento como as dos gêneros pinus e eucalipto em sistemas de construção.

A Madeira Laminada Colada (MLC), conhecida pela sigla em inglês “Glulam”, é um produto que tem crescido no Brasil, permitindo que a madeira seja utilizada em estruturas em uma infinidade de formas e dimensões. Este produto pode ser definido como sendo a junção de duas ou mais lamelas de madeira de dimensões padronizadas e coladas por resinas estruturais adequadas a este fim. Para que este produto seja adequadamente utilizado na construção civil, é necessário o controle de qualidade na produção da MLC. Em países de maior cultura de utilização da madeira para fins estruturais, existem recomendações normativas próprias. Uma vez que este não é o caso do Brasil, o país ainda não possui normatização própria para MLC no sentido de avaliar a qualidade do produto. As recomendações de cálculo e ensaios empregados para tal controle no Brasil têm base em recomendações normativas internacionais. Além disso, os métodos apresentados pela ABNT NBR 7190:1997 (Projeto de Estruturas de Madeira) para a verificação de componentes estruturais em MLC demandam melhorias e atualizações para um controle adequado da qualidade dessas peças. Inclusive, o documento não apresenta alguma diferenciação para resinas empregadas em ambientes internos e externos.

Entretanto, os projetos de norma ABNT NBR PN 02:126.10-001-5 (Madeira Laminada Estrutural: Método de Ensaio) e ABNT NBR ISO PN 02:126.10-001-3 (Ensaio de Caracterização de Peças Estruturais de Madeira) vêm sendo desenvolvidos no Brasil, com base nas recomendações normativas europeias EN 14080:2013 e EN 408:2010 e na norma ISO 13910:2013, respectivamente. O primeiro dos projetos de norma citados tem o objetivo de atender à indústria nacional produtora de MLC para verificação da qualidade do produto; o segundo tem como função o estudo da resistência e da rigidez de vigas de MLC com dimensões estruturais.

Esses projetos de norma podem ser aplicados para a classificação de elementos estruturais feitos de MLC e teste do desempenho de adesivos estruturais através dos ensaios de cisalhamento na linha de cola, flexão estática, gramatura de adesivo aplicado, delaminação e tração nas emendas dentadas. Vale ressaltar que a atual norma utilizada no Brasil ABNT NBR 7190:1997 descreve alguns procedimentos de ensaio no Anexo B. Esses procedimentos são realizados em amostras isentas de defeitos para determinação da qualidade da colagem. No entanto, tais procedimentos não abrangem os ensaios em elementos estruturais. Além disso, não existe nenhum ensaio distinto para os adesivos usados em ambientes internos ou externos em subprodutos da madeira. As normas internacionais possuem diferentes metodologias de ensaio para verificação do desempenho da MLC. Os ensaios principais para realização da caracterização do produto são delaminação, cisalhamento da linha de cola paralelo às fibras da madeira, tração das emendas dentadas paralelas às fibras da madeira e ensaio de flexão estática em quatro pontos. As propostas de normas brasileiras, ABNT NBR PN 02:126.10-001-5 e ABNT NBR ISO PN 02:126.10-001-3, especificam os métodos de ensaios para o controle de qualidade dos elementos estruturais de MLC.

O resorcinol-formaldeído é o adesivo mais empregado pela indústria de MLC devido ao bom desempenho mecânico e resistência à umidade. No entanto, adesivos à base de formaldeído são tidos como insalubres pela emissão de formol, sendo o principal aspecto gerador de impactos ambientais de subprodutos da madeira, além de dificultar a reciclagem de tais produtos. Nesse sentido, os adesivos poliuretanos entram como uma alternativa ambientalmente correta para a indústria de estruturas de madeira, além de apresentar menor custo e possuir desempenho semelhante em termos de resistências mecânica e à umidade.

Sendo a madeira um material susceptível ao ataque biológico, tratamentos preservantes se fazem necessários para uso da madeira em fins estruturais. O Arseniato de Cobre Cromatado (*Chromated Copper Arsenate*), ou CCA, apresenta alta toxicidade e risco de contaminação de solo e lençóis freáticos. No entanto, o CCA é o tratamento preservante mais utilizado no Brasil e em parte do mundo para aumento da durabilidade da madeira.

Este projeto teve a finalidade de avaliar os métodos de ensaio propostos pelo projeto de revisão da norma brasileira ABNT NBR 7190:2013 em relação à avaliação da resistência ao cisalhamento na linha de cola e a delaminação em elementos de MLC confeccionadas com madeiras de reflorestamento, com e sem tratamento preservativo com CCA, e colados com três diferentes tipos de adesivos estruturais. Espera-se que os resultados dessa pesquisa possam promover uma maior utilização da madeira no Brasil, em especial a MLC além de orientar as bases dos projetos de norma atualmente em consulta nacional.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

Este trabalho teve por objetivo avaliar a qualidade de colagem de elementos de MLC confeccionados com dois gêneros de madeiras de reflorestamento (Pinus e Eucalipto) com e sem tratamento preservativo de CCA, coladas com três tipos de adesivos estruturais (1 resorcinol-formaldeído e 2 poliuretanos – sendo um monocomponente e outro bicomponente).

2.2 ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho foram:

- Caracterizar mecanicamente as espécies de madeira de pinus e eucalipto para determinação da classe de resistência para montagem das vigas de MLC;
- Avaliar a delaminação e a resistência ao cisalhamento das linhas de cola de elementos de MLC fabricados segundo as recomendações do projeto de norma ABNT/PN 02:126.10-0001-5;
- Comparar a qualidade de colagem a partir dos resultados obtidos para madeiras tratadas e sem tratamento considerando as combinações espécie-adesivo.

3 JUSTIFICATIVA

A indústria produtora de MLC busca novas alternativas de adesivos e de espécies de madeira para produzir o elemento estrutural com o objetivo de aprimorar a qualidade do produto e, também, promover uma maior durabilidade da estrutura, bem como minimizar os custos de produção. Nesse sentido, neste trabalho, o adesivo resorcinol-formaldeído, o mais comumente utilizado na indústria (porém, de maior custo e mais poluente) foi comparado com as resinas poliuretanas mono e bicomponente (de menor custo e ambientalmente corretas).

Para viabilizar a utilização com segurança dessas peças na construção civil, é necessário que sejam conhecidas as características físicas e mecânicas do material, especialmente nas regiões de adesão entre os materiais.

Atualmente a verificação das propriedades das estruturas de MLC é realizada por meio de normas estrangeiras vigentes, dado que a norma brasileira em vigor, ABNT 7190:1997, não apresenta procedimentos de ensaio que determinem a qualidade de adesivos estruturais e de elementos estruturais.

Algumas normas internacionais de experimentação da região adesiva de elementos de MLC apresentam elevados tempos de ensaio devido às solicitações diferentes da madeira em função de seu clima diferenciado (inverno rigoroso, neve), distinto daquele encontrado no Brasil.

Sendo o clima do Brasil de elevada umidade e temperatura, a madeira está mais propensa ao ataque biológico por microrganismos. Deste modo, o tratamento preservante com CCA, o mais utilizado no país, se faz necessário para uma maior durabilidade da estrutura. No entanto, a literatura sugere que o tratamento com CCA pode prejudicar a eficiência de colagem, a depender da espécie de madeira e adesivo utilizado.

Neste contexto, surge a necessidade da proposta de um método de ensaio que forneça as diretrizes para caracterização de elementos estruturais produzidos em MLC no Brasil, com menor tempo de ensaio e adequado às espécies e tratamentos utilizados no país. Tais diretrizes permitirão a aplicação do método de ensaio em estruturas de MLC para contribuir com o controle de qualidade da indústria produtora.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 FUNDAMENTOS

4.1.1 Madeira

A madeira é um material de origem renovável e que é aplicado nas mais diversas finalidades: na construção civil (em esquadrias, revestimento de paredes, pisos, forros, estruturas de pontes e de cobertura, formas e cimbramentos para edificações em concreto armado e protendido), na construção rural (em silos e habitações), na indústria papelreira (matéria-prima e combustível), na indústria moveleira, na indústria de painéis (chapas de fibras, de madeira compensada, aglomerada, entre outras variações), na confecção de instrumentos musicais, na fabricação de artigos esportivos, lápis, embalagens (como caixotes e engradados) e assim por diante (DIAS, 2000).

Apesar de sua anisotropia, a estabilidade dimensional e as propriedades mecânicas da madeira podem ser melhoradas através da laminação. Exemplos de subprodutos laminados da madeira são painéis CLT (*Cross-Laminated Timber*), compensado, MLC e LVL (*Laminated Veneer Lumber*), amplamente aplicados nas estruturas de madeira e edificações. Além disso, os laminados vêm sendo aplicados com eficiência na indústria moveleira. (DERIKVAND e PANGH, 2016).

4.1.2 Madeira de reflorestamento

O atual cenário de escassez de recursos naturais leva à busca pelo desenvolvimento sustentável, sendo um fator de grande importância em todo mundo. Nesse sentido, fontes de energia e matéria-prima renováveis vêm sendo estudadas como uma forma de suprir as necessidades futuras de recursos mais ambientalmente adequados. As florestas plantadas desempenham um papel considerável nesse tema, pois, além da madeira sequestrar gás carbônico da atmosfera, é um material renovável e contribui com o combate ao desmatamento ilegal de florestas nativas.

Segundo Zenid *et al.* (2009), a utilização de florestas naturais ou plantadas sob Projeto de Manejo Florestal aprovado pelo IBAMA (Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis) caracteriza o emprego correto desses recursos naturais, uma vez que faz uso do princípio de sustentabilidade. Em outras palavras, prevê o uso de recursos

florestais de modo que possibilite a recomposição da floresta, tornando-a viável econômica, social e ambientalmente.

De acordo com o relatório do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2017) para a Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura, no ano de 2017 o Brasil teve uma área total de florestas plantadas de 9,8 milhões de hectares, sendo 75,2% desse total (7,4 milhões de ha) de Eucalipto, 20,6% (2 milhões de ha) de Pinus e 4,2% (400 mil ha) de outros gêneros. Cerca de 70,5% das florestas plantadas do Brasil no período se concentravam nas Regiões Sul e Sudeste do país.

O gênero eucalipto caracteriza-se como um grupo variado de espécies cujas densidades podem variar de 500 a 1000 kg/m³ e apresentam boa resistência mecânica, alta durabilidade natural e baixa tendência a rachaduras. De forma geral, a madeira de eucalipto apresenta alta durabilidade natural contra agentes xilófagos. No entanto, apresenta cerne de difícil tratamento e alburno permeável (ZENID *et al.*, 2009).

A madeira de Pinus, por ser um gênero de reflorestamento, apresenta propriedades mecânicas significativamente influenciadas pelos procedimentos de manejo florestal empregado no seu plantio, o que faz com que sejam necessários cuidados ao se utilizar o gênero para fins estruturais. A espécie *Pinus elliottii* foi estudada pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) e classificada como uma espécie suscetível ao ataque por fungos (emboloradores, manchadores e apodrecedores), cupins, brocas e perfuradores marinhos. No entanto, é considerada uma madeira fácil de tratar (ZENID *et al.*, 2009).

Serpa *et. al* (2003) estudaram propriedades das madeiras de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* e *Pinus elliottii*. De modo geral, a espécie *Eucalyptus saligna* apresentou propriedades mais elevadas de densidade básica, contração volumétrica e resistências à compressão e flexão, seguida de *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliottii*.

A escassez de madeiras nativas, além de ser uma boa justificativa para o uso da MLC, tem contribuído para o crescimento das pesquisas e utilização das madeiras reflorestadas, em especial, dos gêneros Eucalipto e Pinus (MIOTTO, 2009).

4.1.3 Madeira laminada colada

A MLC é um subproduto da madeira utilizado em especial para a produção de vigas, arcos e pórticos, considerado como sendo um dos mais antigos produtos que consistem na colagem de lâminas. Ainda assim, a MLC ainda não é amplamente utilizada nas edificações brasileiras, uma vez que não existe grande cultura de emprego da madeira no país, além do

custo elevado de resinas adesivas e do pequeno número de indústrias brasileiras relacionadas à sua fabricação. Por outro lado, a MLC apresenta vantagens em comparação à madeira serrada no sentido da possibilidade de reproduzir as mais diferentes formas e dimensões, além do significativo aumento de resistência e rigidez (MIOTTO, 2009; SEGUNDINHO *et al.*, 2013).

A MLC consiste na união de duas ou mais lamelas cujas direções das fibras estejam posicionadas de forma paralela ao comprimento do elemento estrutural fabricado, união essa realizada a partir de um adesivo aplicação de pressão. Segundo Pfeil e Pfeil (2003), tais pressões variam entre 0,7 e 1,5 MPa. A Figura 1 apresenta o aspecto de uma viga de MLC.

Figura 1 - Viga de MLC

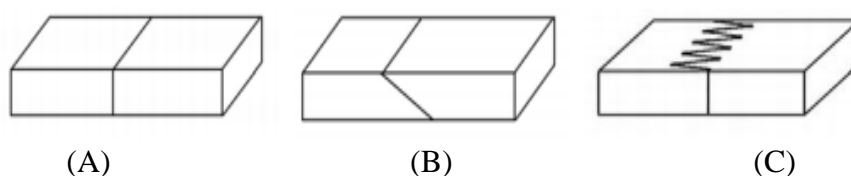


Fonte: Carpinteria (2019).

A espessura máxima das lamelas não deve exceder 50 mm, exigência que permite a fabricação de peças de formas e dimensões variáveis e versáteis às condições do projeto (MIOTTO, 2009).

Nos elementos estruturais, se faz necessária a adoção de emendas entre as lamelas ao longo da viga (Figura 2). Existem as emendas de topo (cuja execução é fácil mas de baixa eficiência), as biseladas (apresenta custo superior à emenda de topo pela perda de madeira e dificuldade de execução) e as dentadas ou *finger-joints*, de resistência mais uniforme que as outras emendas e de alta eficiência para produção de MLC (AZAMBUJA, 2002).

Figura 2 - Tipos de emenda: (A) de topo; (B) biselada e (C) dentada.



Fonte: Azambuja (2002).

As principais vantagens da MLC consistem na possibilidade de alcançar uma grande variedade de formas e dimensões, apresenta alta resistência mecânica e peso próprio relativamente baixo. Além disso, permite a redução dos defeitos (normalmente encontrados na madeira maciça de grandes dimensões) e a utilização de peças de qualidade inferior em zonas de menor solicitação mecânica, possibilitando a combinação de diferentes espécies. Por fim, a MLC apresenta elevada resistência ao fogo e agentes corrosivos em função de suas grandes seções transversais (ZANGIÁCOMO, 2003; SEGUNDINHO *et al.*, 2013).

Zangiácomo (2003) apresenta como desvantagens da MLC o seu maior custo quando comparado à madeira maciça, além de exigir técnicas, equipamentos e mão-de-obra adequada para sua fabricação.

4.2 FATORES QUE INFLUENCIAM A QUALIDADE DE COLAGEM

Alguns fatores podem influenciar de forma significativa a resistência mecânica das vigas de MLC, são eles: espécie da madeira empregada, espessura e posicionamento das lamelas, adesivo e tratamentos escolhidos, entre outros (CALIL NETO, 2019).

4.2.1 Tratamento preservante da madeira

Por ser de origem vegetal, o desempenho da madeira depende diretamente do ambiente ao qual está submetida, podendo sofrer ataques de agentes biológicos (bactérias, fungos, insetos e brocas marinhas). Em caso de risco de deterioração por ataques de tais agentes, se faz necessário o emprego de espécies de alta durabilidade natural ou de espécies com baixa durabilidade, porém, submetidas a algum tratamento preservante. No caso das espécies oriundas de florestas plantadas, o tratamento preservante pode ser uma boa alternativa (JANKOWSKI, BARILLARI e FREITAS, 2003).

Tais tratamentos preservantes têm base no princípio de tornar a madeira tóxica a agentes biológicos que se alimentam dela através da impregnação da mesma com produtos químicos. Ainda que os métodos utilizados sejam tóxicos e apresentem riscos de manuseio, são a forma mais empregada para evitar ataques biológicos, sendo os tratamentos a pressões superiores à ambiente os mais eficientes, devido à sua capacidade de oferecer maior distribuição e penetração do preservante na peça (CAVALHEIRO, 2014).

Dentre as substâncias empregadas para a prevenção de deterioração biológica da madeira, podem ser citados o creosoto (preservante de caráter oleoso) e o CCA (*Chromated*

Cooper Arsenate - Arseniato de Cobre Cromatado) e o CCB (*Copper Chrome Borate* - Boro de Cobre Cromatado), sendo os dois últimos hidrossolúveis (CAVALHEIRO, 2014).

O CCA é composto por sais de cobre, cromo e arsênio, em proporções específicas. O cromo age como fixador, o arsênio como inseticida e o cobre como fungicida. Além disso, os produtos formados quando o CCA reage com a madeira tornam o material repelente à água, fato que atribui a eficiência ao tratamento (LEPAGE *et al.*, 1986).

Segundo Lepage *et al.* (1986), o tratamento eficiente da madeira consiste na introdução da madeira seca e beneficiada na autoclave e aplicação de um vácuo inicial, responsável pela remoção do ar da madeira. Sob efeito do vácuo, o CCA é transferido para o interior da autoclave. Em seguida, a solução de CCA é injetada na madeira até a saturação sob alta pressão. Por fim, a pressão é retirada e o CCA é transferido de volta para o reservatório e um vácuo final é aplicado para retirar o excesso de produto da superfície da madeira.

Segundinho *et al.* (2017) verificaram, em estudo, que o tratamento preservativo com CCA influenciou negativamente nas propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Eucalyptus cloeziana* em comparação com a mesma não tratada.

Vale ressaltar que afinidade da interação entre os elementos de produção de MLC podem ocasionar significativas diferenças no desempenho de suas estruturas. O tratamento preservante com CCA pode prejudicar a eficiência de colagem, uma vez que os materiais metálicos insolúveis presentes no CCA precipitam na parede celular da madeira, comprometendo a relação madeira-resina, minimizando a durabilidade da união na superfície dos materiais (ZHAN e KAMDEM, 2000; CALIL NETO *et al.*, 2014).

A utilização do CCA causa dispersão de cobre e arsênio no ambiente, de modo que pode contaminar o solo e as reservas aquáticas subterrâneas e, por isso, existe grande preocupação ambiental com o uso de tal tratamento da madeira. Alguns países, como Estados Unidos, Alemanha, Suíça, Suécia, Dinamarca, Japão e Indonésia já apresentam regulamentações que restringem drasticamente o emprego do preservante. No entanto, no Brasil, o CCA ainda é utilizado em 80% dos tratamentos da madeira (ICIMOTO *et al.*, 2013; BERTOLINI, 2014; ALMEIDA *et al.*, 2019).

4.2.2 Adesivos

O bom desempenho da MLC depende diretamente das propriedades do adesivo empregado. Tais adesivos se classificam em origem natural (provenientes de tanino, animais, peixes, albumina de sangue, caseína, soja, dentre outros) e origem sintética (resorcinol-

formaldeído, fenol-formaldeído, ureia-formaldeído, isocianatos, entre outros). Em função de sua resistência à umidade e aos ataques biológicos por microrganismos, as resinas de origem sintética são mais utilizadas pela indústria madeireira (JESUS, 2000).

- Resina resorcinol-formaldeído

Jesus (2000) afirma que o resorcinol-formaldeído foi um dos adesivos desenvolvidos ao longo da Segunda Guerra Mundial, apresentando custo elevado em relação aos existentes, no entanto, com cura à temperatura ambiente e resistente à umidade, sendo o adesivo mais empregado pela indústria de MLC.

Adesivos de resorcinol-formaldeído são aplicados em conjunto com um reagente endurecedor, que devem ser misturados imediatamente antes de sua utilização devido à reatividade da resina após essa mistura (JESUS, 2000).

Segundinho *et al.* (2017) afirmam que o resorcinol-formaldeído é um dos adesivos que apresentam melhores resultados em ensaios de delaminação e resistência ao cisalhamento da linha de cola em função de sua maior penetração, verificada a partir da análise da interface madeira-adesivo, mesmo que empregando madeira tratada com CCA.

- Resinas poliuretanas

Chipanski (2006) afirma que adesivos com base em formaldeído são considerados de máxima insalubridade em função da emissão de formol. Assim, as resinas poliuretanas entram como uma alternativa ecologicamente mais adequada para a indústria madeireira.

As resinas poliuretanas podem ser obtidas de duas maneiras, de modo que um caminho leva à origem da monocomponente e outro da bicomponente. No caso da monocomponente, a resina é sintetizada em estágio único a partir de poliól, di-isocianatos e extensores de cadeia. A bicomponente, por outro lado, consiste em um pré-polímero e um poliól, que quando estequiometricamente misturados, formam a resina poliuretana (JESUS, 2000).

Dias (2008) revelou que o primeiro adesivo bicomponente à base de óleo de mamona foi desenvolvido no Instituto de Química de São Carlos, da Universidade de São Paulo, sendo este produto extraído a partir da semente de *Ricinus Communis*, uma planta comumente encontrada no Brasil. A partir da compressão das sementes ou da extração com solvente, é obtido o óleo que dá origem ao poliól e ao pré-polímero, que, quando misturados, reagem de modo a polimerizar seus componentes. A partir da variação da porcentagem do poliól e do

pré-polímero, é possível obter resinas poliuretanas de diferentes durezas. Catalizadores podem ser empregados na reação para aumentar a velocidade de polimerização.

Azambuja (2002) avaliou o adesivo poliuretano bicomponente à base de óleo de mamona baseado no poliól 25040 e pré-polímero A249, em CPs de madeira de reflorestamento com e sem tratamento preservante com CCA, identificando parâmetros adequados de colagem em madeira. O autor obteve resultados que indicam que o adesivo apresenta bom desempenho em vigas estruturais de MLC. O estudo também demonstrou que, na época, o adesivo poliuretano apresentou custo inferior aos adesivos à base de resorcinol-formaldeído, além de apresentar a vantagem de que o adesivo poliuretano é biodegradável e não é agressivo ao organismo humano.

Segundinho *et al.* (2017) estudaram o efeito da utilização da resina poliuretana à base de mamona em madeira tratada com preservante CCA e verificou que a presença dos sais da madeira preservada afetou de forma negativa a resistência ao cisalhamento na linha de cola, apresentando resultados inferiores ao recomendado para fins estruturais.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA

Segundo o projeto de norma PN-02-126 10-001-1, a atribuição de classes de resistência a peças de madeira requer classificações visual e mecânica, além da e mensuração da densidade do material.

A avaliação das propriedades físicas e mecânicas permite o emprego mais adequado da madeira (DIAS, 2000). A norma brasileira vigente ABNT NBR 7190:1997 propõe três tipos de caracterização da madeira para uso estrutural, à umidade padrão de 12%.

Para espécies não conhecidas, é recomendada a caracterização completa a partir da investigação das propriedades: resistências à compressão paralela e normal às fibras; resistências à tração paralela e normal às fibras; resistência ao cisalhamento paralelo às fibras; resistências ao embutimento paralelo e normal às fibras e as densidades básica e aparente. No caso das espécies pouco conhecidas, adotar a caracterização mínima, obtida pela avaliação das propriedades: resistências à compressão, tração e cisalhamento paralelos às fibras e as densidades básica e aparente. Para espécies usuais, a atual norma brasileira recomenda a resistência à compressão paralela às fibras como base de referência para estimativa de parte das outras propriedades com auxílio de equações pré-estabelecidas.

Além das propriedades citadas, o Anexo B da ABNT NBR 7190:1997 propõe métodos de ensaio para obtenção das propriedades de módulo de elasticidade longitudinal na

compressão paralela às fibras; módulo de elasticidade longitudinal na tração paralela às fibras; módulo de elasticidade convencional no ensaio de flexão estática e tenacidade.

Devido à necessidade de laboratórios adequados e máquinas específicas (cujo porte é grande e de custo elevado) para boa parte de tais ensaios, a madeira é normalmente empregada sem a devida investigação de suas propriedades, fator que leva ao mau uso e desperdício do material (DIAS, 2000).

4.3.1 Classificação visual

O procedimento de classificação visual envolve a inspeção das faces de cada uma das lamelas empregadas na produção de MLC (são desconsiderados os defeitos que ocorrem exclusivamente em topos e bordas das peças), permitindo a qualificação e quantificação dos defeitos existentes ao longo do comprimento da peça. Baseada em tal avaliação, é atribuída uma determinada classe visual (1, 2 ou 3) para cada lamela, conforme o projeto de norma PN-02-126 10-001-1. As lamelas classificadas como classe 1 são de melhor qualidade e aquelas classificadas como classe 3 são as de qualidade inferior. O projeto de norma apresenta recomendações de classificação visual para madeiras de folhosas e coníferas.

Os defeitos considerados pelo citado projeto de norma para classificação visual de peças de madeira são: presença de medula, nós, inclinação excessiva das fibras, fissuras passantes e não passantes, encurvamento, arqueamento, encanoamento, torcimento, esmoado, ataques biológicos, presença de madeira de reação, danos mecânicos ou bolsas de resina. No presente trabalho, foram verificados a presença de medula, tamanho de nós, encurvamento, arqueamento e torcimento.

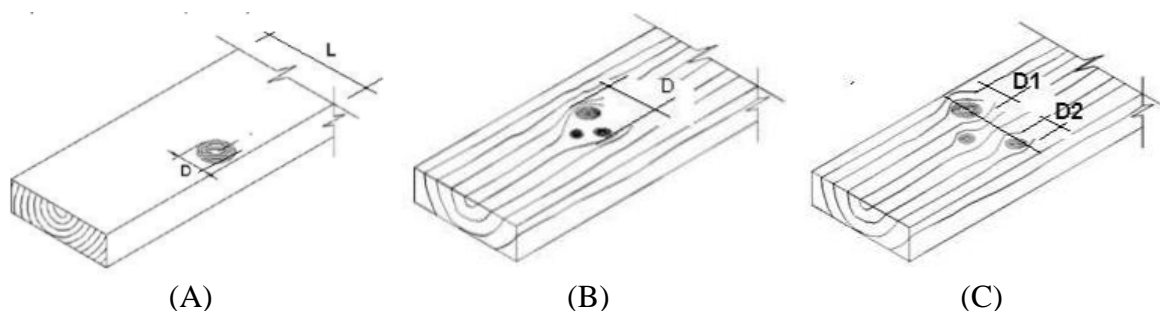
- Nós

O projeto de norma recomenda os procedimentos a seguir para nós firmes. Em caso de nós soltos, vazados ou cariados, descartar a lamela para fins estruturais.

A presença de nós é investigada nas duas faces de cada lamela, de modo que as bordas e o topo são excluídos da classificação visual. Então, apenas o nó mais crítico (aquele o qual o diâmetro D verificado na direção ortogonal ao principal eixo da lamela ocupa o maior percentual da largura L da superfície da peça). A Figura 3 (A) ilustra o procedimento de medição de um nó. Em caso de ocorrência de um conjunto de nós, Figura 3 – B, estes são medidos como um nó individual, adotando-se o diâmetro a partir das fronteiras dos nós mais

externos do conjunto. No entanto, na situação onde dois ou mais nós estamos próximos, mas com fibras da madeira circundando cada um dos nós, então, cada nó deve ser considerado como individual. Nesse caso, quando os nós ocorrem numa mesma seção transversal (Figura 3 - C), então o diâmetro considerado é a soma dos diâmetros individuais ($D = D1 + D2$).

Figura 3 - Nós: (A) Medição; (B) Conjunto de nós; (C) Nós individuais próximos.

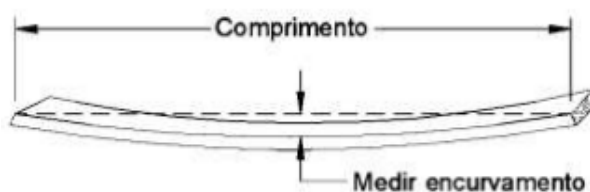


Fonte: Adaptado de ABNT NBR PN-02-126 10-001-1 (2013).

- Encurvamento

Se define por um empenamento da lamela em relação ao seu eixo de menor inércia (Figura 4). Tal defeito deve ser medido a partir do ponto de maior deslocamento relacionado à linha reta que junta as duas extremidades da lamela (tracejado da Figura 4).

Figura 4 - Encurvamento.

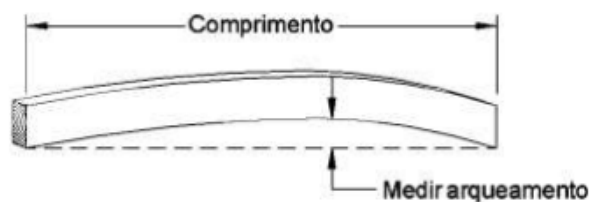


Fonte: ABNT NBR PN-02-126 10-001-1 (2013).

- Arqueamento

Consiste num empenamento relacionado ao eixo de maior inércia de uma lamela, conforme a Figura 5. Sua medição deve ser feita a partir do ponto de maior deslocamento relacionado à linha reta que junta as duas extremidades da lamela (tracejado da Figura 5).

Figura 5 - Arqueamento.



Fonte: ABNT NBR PN-02-126 10-001-1 (2013).

- Torcimento

Equivale à combinação entre empenamentos relacionados aos eixos de maior e menor inércia, de modo que a peça defeituosa apresenta formato espiralado, conforme a Figura 6.

Figura 6 - Torcimento.



Fonte: ABNT NBR PN-02-126 10-001-1 (2013).

As Tabelas 1 e 2, referentes aos gêneros Pinus e Eucalipto, respectivamente, resumem os limites dos parâmetros de classificação visual considerados neste trabalho e suas respectivas classes, conforme a ABNT NBR PN-02-126 10-001-1.

Tabela 1 - Classificação visual de defeitos para a madeira de Pinus.

Defeito	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Medula	Não se admite		
Nós*	1/4	1/2	2/3
Encurvamento/Arqueamento (mm)	Menor que 8 mm para 1 m de comprimento		
Torcimento (mm/mm)	Menor que 1 mm para cada 25 mm de comprimento		

* Frações relacionadas à largura total da seção da lamela.

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 2 - Classificação visual de defeitos para a madeira de Eucalipto.

Defeito	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Medula	Não se admite		
Nós*	1/5	1/3	1/2
Encurvamento/Arqueamento (mm)	Menor que 8 mm para 1 m de comprimento		
Torcimento (mm/mm)	Menor que 1 mm para cada 25 mm de comprimento		

* Frações relacionadas à largura total da seção da lamela.

Fonte: Elaboração própria.

4.3.2 Ensaio de flexão estática

. O módulo de elasticidade das lamelas pode ser obtido através da flexão estática, um ensaio não destrutivo executado em máquinas universais de ensaios. Neste tipo de ensaio, uma carga (dentro do trecho linear da curva tensão x deformação) é pré-estabelecida e o valor do módulo de elasticidade pode ser obtido a partir da Equação 1:

$$E_M = \frac{PL^3}{48FI} \quad (1)$$

Onde:

E_M = módulo de elasticidade das lamelas [MPa];

P = força no trecho linear da curva [MPa];

L = distância entre apoios [mm];

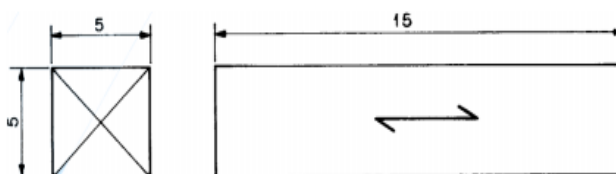
F = flecha correspondente à força P [mm];

I = momento de inércia [kg/m²].

4.3.3 Ensaio de compressão paralela às fibras

O Anexo B da ABNT 7190:1997 propõe como CP para ensaio de compressão paralela às fibras o modelo representado pela Figura 7, com dimensões em centímetros.

Figura 7 - CP para ensaio de resistência à compressão paralela às fibras.



Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

A resistência à compressão paralela às fibras é calculada a partir da Equação 2:

$$f_{c0} = \frac{F_{c0,max}}{A} \quad (2)$$

Onde:

f_{c0} = resistência à compressão paralela às fibras da madeira [MPa];

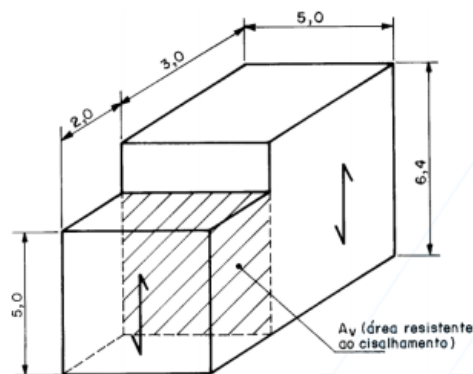
$F_{c0,max}$ = força de compressão máxima aplicada ao CP [N];

A = área inicial da seção transversal que sofre compressão [mm²].

4.3.4 Ensaio de cisalhamento paralelo às fibras

O Anexo B da ABNT 7190:1997 propõe como CP para ensaio de cisalhamento paralelo às fibras o esquema representado pela Figura 8, com dimensões em centímetros.

Figura 8 - CP para ensaio de resistência ao cisalhamento paralelo às fibras.



Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

A resistência ao cisalhamento paralelo às fibras é calculada pela Equação 3:

$$f_{v0} = \frac{F_{v0,max}}{A_{v0}} \quad (3)$$

Onde:

f_{v0} = resistência ao cisalhamento paralelo às fibras da madeira [MPa];

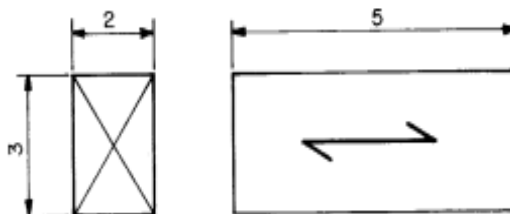
$F_{v0,max}$ = força cisalhante máxima aplicada ao CP [N];

A_{v0} = área inicial da seção crítica do CP no plano paralelo às fibras [mm²].

4.3.5 Umidade e densidade aparente

As amostras de umidade, bem como aquelas utilizadas para determinação da densidade aparente, recomendadas pela ABNT NBR 7190:1997 possuem as dimensões apresentadas pela Figura 9.

Figura 9 - CP para determinação da umidade e densidade aparente da madeira.



Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

A Equação 4 é utilizada para cálculo da umidade a partir de massa inicial e massa seca de CP conhecidos.

$$U(\%) = \frac{m_i - m_s}{m_s} \quad (4)$$

Onde:

m_i = massa inicial da madeira [g];

m_s = massa da madeira seca [g].

Normalmente, a fase de secagem das lamelas ocorre de modo artificial, com auxílio de estufas de secagem. A secagem ocorre até que seja obtido o teor de umidade desejado para a lamela. Segundo Cerchiari (2013), para a colagem adequada na produção de MLC, a umidade das lamelas não deve ser superior a 15%.

Os CP indicados pela ABNT NBR 7190:1997 para determinação da densidade aparente apresentam as mesmas dimensões que os recomendados para determinação da umidade.

A densidade aparente depende do teor de umidade da madeira, de modo que ao citar a densidade, deve ser especificado o respectivo teor de umidade (LOGSDON, 1998).

Logsdon (1998) apresentou um critério de correção da densidade aparente para o teor de umidade de 12%, valor sugerido pela ABNT NBR 7190:1997, a partir da Equação 5:

$$\rho_{12\%} = \rho_{U\%} + \rho_{U\%} \left[(1 - \delta_v) \cdot \frac{(12-U\%)}{100} \right] \quad (5)$$

$$\delta_v = \frac{\Delta V}{U\%} \quad (6)$$

$$\Delta V = \frac{V_{U\%} - V_{seca}}{V_{seca}} \cdot 100 \quad (7)$$

Onde:

$\rho_{12\%}$ = densidade aparente a 12% de umidade [g/cm³];

$\rho_{U\%}$ = densidade aparente a U% de umidade [g/cm³];

U% = teor de umidade [%];

δ_v = coeficiente de retratibilidade volumétrica [adimensional];

ΔV = retração volumétrica da variação de umidade entre U% e 0% [%];

$V_{U\%}$ = volume da amostra a U% de umidade [cm³];

V_{seca} = volume da amostra seca [cm³].

A densidade aparente da madeira é importante para garantia da eficiência de estruturas em MLC, de modo que devem ser empregadas espécies com densidade dentro do intervalo de 0,40 g/cm³ a 0,75 g/cm³. As espécies mais indicadas, para a fabricação de MLC são as do gênero *Pinus Spp*, cuja densidade gira em torno de 0,5 g/cm³ (FIORELLI, 2005).

4.4 ENSAIOS DE EFICIÊNCIA DE COLAGEM

4.4.1 Ensaio de delaminação da linha de cola

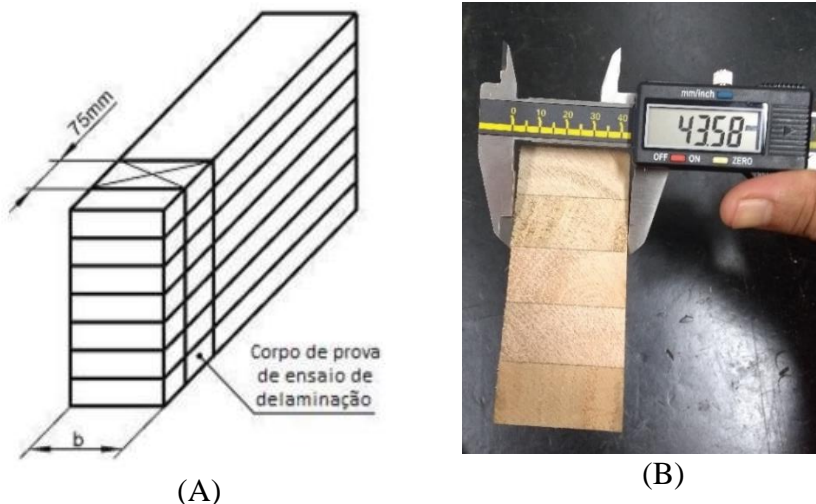
Para a determinação da delaminação da linha de cola, o projeto de norma ABNT NBR PN 02:126.10-001-5 determina que os CP (Figura 10 - A) devem ser pesados para determinação da massa inicial. Em seguida, os CPs devem ser inseridos na autoclave e submersos em água a uma temperatura de 10 °C a 20 °C e então é aplicado um vácuo de 70 kPa a 85 kPa ao longo de 30 minutos. Desse modo, os CPs permanecem submetidos por um período de 2 horas a uma pressão no intervalo de 500 kPa a 600 kPa.

Ao término do ciclo de vácuo-pressão, os CPs são secos na câmara climatizadora, onde permanecem até que a massa do CP atinja um valor compreendido entre 100% e 110% da

massa inicial. A temperatura deve estar entre 65 °C e 75 °C. No interior da estufa, o fluxo de ar deve estar entre 2 a 3 m/s e a umidade relativa do ar por volta de 8% a 10%.

Antes do ensaio de delaminação, deve ser realizada a medição do comprimento total de todas as linhas de cola das faces frontal e posterior de cada um dos CPs de delaminação (Figura 10 - B), de modo que o somatório dos comprimentos das linhas de cola do CP será utilizado para cálculo do percentual de delaminação. Após o ensaio, são medidas as aberturas na linha de cola de cada CP nas faces frontal e posterior, desconsiderando as delaminações da lateral do CP, para obtenção do somatório das aberturas das linhas de cola. Deste modo, o percentual de delaminação de cada CP é calculado a partir da Equação 8.

Figura 10 - (A) CP para ensaio de delaminação da linha de cola; (B) Medição do comprimento da linha de cola.



Fonte: (A) - ABNT NBR PN 02:126.10-001-5 (2013); (B) – Elaboração própria.

$$Dt = \frac{La}{Lt} \cdot 100 \quad (8)$$

Onde:

Dt = delaminação total [%];

La = somatório do comprimento da abertura de todas as linhas de cola das faces da seção transversal [mm];

Lt = comprimento total de todas as linhas de colas das faces da seção transversal [mm].

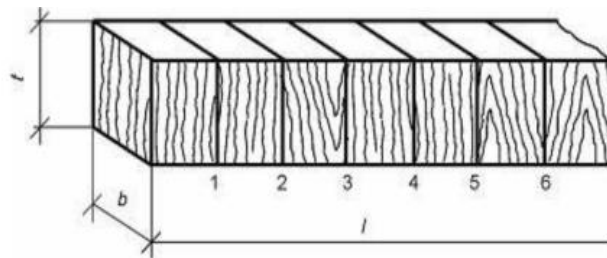
Nogueira (2017), em estudo, afirmou que os procedimentos do projeto de norma brasileiro geraram bons resultados e se apresentou mais prático do que o método canadense em função do menor tempo necessário para execução do ensaio como um todo, apresentando uma diferença total no tempo de 11 dias entre os dois tipos de procedimento.

4.4.2 Ensaio de resistência ao cisalhamento da linha de cola

As superfícies de cola dos CPs (Figura 11) sofrem a aplicação de forças de cisalhamento na direção paralela às fibras da madeira que são aumentadas gradualmente até a ocorrência da falha. De acordo com a ABNT NBR PN 02:126.10-001-5, para determinação das resistências ao cisalhamento das linhas de cola, são medidas as alturas (t) e as larguras (b), conforme a Figura 7, dos planos colados a serem submetidos ao cisalhamento, considerando um mínimo de duas medições nos extremos das superfícies, sendo que os CPs são pesados para obtenção das respectivas massas. O comprimento (l) do CP deve variar em função da quantidade de lamelas adotadas no ensaio e da espessura das lamelas.

Os CPs são posicionados no dispositivo metálico e então sofrem a aplicação de cargas à velocidade constante, de forma que a falha na linha de cola seja ocasionada em 20 segundos, aproximadamente.

Figura 11 - CP para ensaio de cisalhamento da linha de cola.



Fonte: ABNT NBR PN 02:126.10-001-5 (2013).

A resistência ao cisalhamento da linha de cola é determinada a partir da Equação 9:

$$f_{v0} = \frac{F_{v0,max}}{b.t} \quad (9)$$

Onde:

f_{v0} = resistência ao cisalhamento paralelo às fibras da madeira [MPa];

$F_{v0,max}$ = força cisalhante máxima aplicada ao CP [N];

b = largura do CP [mm];

t = altura do CP [mm].

Nogueira (2017) afirma que a densidade da madeira empregada deve ser semelhante para todas as lamelas das vigas para permitir uma melhor uniformidade nos resultados de

resistência ao cisalhamento na linha de cola. Inclusive, região central das vigas é o local onde ocorrem as maiores tensões de cisalhamento, de modo que a verificação de sua resistência é essencial.

4.5 DOCUMENTOS NORMATIVOS E MÉTODOS DE ENSAIO

4.5.1 Norma europeia: EN 14080:2013

No continente europeu, o controle de qualidade das linhas de colas nas empresas de MLC é feito através dos procedimentos expostos na norma EN 14080:2013. Essa norma descreve a metodologia necessária para a realização do ensaio de delaminação e de cisalhamento paralelo às fibras da madeira na linha de cola. Além disso, as amostras são retiradas de elementos estruturais.

Segundo esta norma, o ambiente onde será exposto o adesivo influencia no tipo de procedimento que será adotado para analisar a delaminação. Por causa disso, existem três métodos distintos de avaliação nesse documento (Métodos A, B e C). O ciclo na autoclave é composto, principalmente, por um vácuo de 85 kPa seguido de uma pressão de 600 kPa. Após este ciclo, as amostras são destinadas a uma estufa com velocidade do ar entre 2 m/s a 3m/s, além de uma temperatura e teor de umidade que depende do procedimento adotado.

No método A da EN 14080:2013 destinado para avaliação do adesivo tipo II (EN 391:2001), o vácuo e a pressão são aplicados, respectivamente, durante 5 minutos e uma hora, o ciclo é feito por duas vezes sem a abertura da autoclave. Na estufa, as amostras são confinadas durante 22 horas em uma temperatura de 60°C a 70°C com uma umidade relativa menor do que 15%. Por fim, repete-se novamente o procedimento após o período de secagem. A delaminação máxima permitida, neste caso, é de 5%.

No método B da EN 14080:2013 destinado para avaliação do adesivo tipo II (EN 391:2001), as amostras devem ser expostas a vácuo, por 30 minutos, e pressão, por 2 horas. Na estufa, a secagem é feita por 15 horas entre 65 °C a 75 °C e umidade relativa de 10%. A delaminação máxima permitida, neste caso, é de 4%.

No método C da EN 14080:2013 destinado para avaliação do adesivo tipo I (EN 391:2001), os CPs são submetidos ao vácuo por 30 minutos e à pressão por 2 horas. Esse ciclo é realizado novamente totalizando 5 horas de ensaio. Em seguida, o material é seco dentro de um período de 90 horas sobre uma temperatura de 25°C a 35°C e uma umidade relativa de 25% a 35%. A delaminação máxima permitida, neste caso, é de 10%.

4.5.2 Norma americana: ASTM D2559:2004

Avalia os adesivos aplicados entre as lamelas das estruturas de MLC destinadas a ambientes externos sujeitos à exposição de umidade. Nos procedimentos descritos pela ASTM D 2559:2004, as amostras podem ser confeccionadas a partir de qualquer espécie de madeira, porém recomenda-se a utilização das madeiras mais usuais pela indústria americana.

Na análise da delaminação da madeira para ambientes expostos à umidade, as amostras submersas em água dentro de uma autoclave são submetidas, inicialmente, a dois ciclos de vácuo a 85 kPa e pressão de 517 kPa totalizando um período de 2 horas e 10 minutos e, posteriormente, uma secagem a 65,5°C entre 21 e 22 horas. Após, realiza-se um ciclo com vapor a 100°C durante uma hora e meia, seguido de uma pressão de 517 kPa aplicada nos CPs submersos por 40 minutos e então, colocam-se as amostras em uma estufa para secar como anteriormente. Os dois ciclos iniciais e a secagem devem ser repetidos por mais uma vez para concluir o procedimento. A aprovação do adesivo consiste em atender as condições mínimas satisfatórias de porcentagem de falha na madeira e da porcentagem de abertura mínima permitido em cada linha de cola como exposto pela norma. Dessa maneira, as amostras feitas com coníferas devem ter uma delaminação menor do que 1%, enquanto as amostras de folhosas deve ter uma delaminação menor que 1,6%.

4.5.3 Normas canadenses: CSA 112.9:2004 E CSA 112.10:2007

De uma maneira geral, a norma CSA 112.9:2004 apresenta os procedimentos necessários para avaliação da resistência dos adesivos expostos em ambientes externos enquanto a norma CSA 112.10:2007 apresenta os procedimentos para avaliação de adesivos expostos em espaços com teor de umidade controlado. A norma CSA 112.10:2007 permite somente a utilização das seguintes espécies de coníferas destinadas as amostras a serem ensaiadas: *Acer saccharum*, *Acer nigrum*, *Pinus contorta* var. *latifolia*, *Picea mariana* e *Psudotsunga menziesii*.

Na análise da delaminação, as duas normas possuem o mesmo procedimento de ensaio. Os CP são submetidos, em um primeiro momento, a dois ciclos de vácuo-pressão durante oito horas e uma secagem após o término dos ciclos a 28 ± 2 °C com circulação de ar suficiente para manter o peso da amostra dentro de 88 horas. Além disso, esse processo tem que ser realizado mais duas vezes. Assim, após 12 dias de ensaios, é determinada a porcentagem de delaminação das amostras.

Segundo a norma CSA 112.9:2004, a delaminação máxima para coníferas é de 1% e para folhosas é de 1,6%. Para a norma CSA 112.9:2007, a delaminação máxima permitida para coníferas é de 1%.

O procedimento descrito na CSA 112.9:2004 é empregado para avaliar o desempenho das linhas de colas na situação de classe externa. Primeiramente, as amostras são pesadas e, em seguida, são submersas em água a uma temperatura 20°C para realizar dois ciclos de vácuo-pressão. Aplica-se um vácuo de 75 kPa por um período de 2 horas sobre as amostras. Na etapa seguinte, uma pressão de 540 kPa deve ser aplicada no interior do equipamento por 2 horas. Depois de realizado os dois ciclos, as amostras são expostas durante 88 horas a uma temperatura em torno de 28°C. Posteriormente, é repetido todo esse procedimento mais duas vezes. A porcentagem da delaminação total de cada CP é obtido pela Equação 8.

4.5.4 Procedimento descrito na ABNT /PN 02:126.10-001-5

Esse procedimento é baseado no método B do ensaio de delaminação da EN 14080:2013. Este ensaio de delaminação é utilizado o procedimento para adesivos usados em ambientes externos. As amostras são submersas em água a uma temperatura de 20°C e, primeiramente, na sequência aplica-se um vácuo de 75 kPa durante 30 minutos. Posteriormente, os CPs ficam submetidos por duas horas a uma pressão de 550 kPa. Após o ciclo de vácuo-pressão, as amostras ficam em estufas por 12 horas a uma temperatura de 75°C. Além disso, dentro da estufa o fluxo de ar deve estar entre 2 a 3 m/s e a umidade relativa entre 8% a 10%. A porcentagem da delaminação total de cada amostra também é obtida pela Equação 1. A delaminação máxima permitida na amostra após o ensaio é de 4%.

A Tabela 3 apresenta os procedimentos de cada norma citada de forma mais esclarecedora.

Tabela 3 - Resumo dos métodos de ensaio de delaminação.

Descrição normativa	Uso do adesivo	Método aplicado	Delaminação máxima permitida	
			Coníferas	Folhosas
CSA 112.09:2004	Externo	1) Submersão das amostras em água a temperatura ambiente; 2) Aplicação de vácuo e pressão por duas horas a 75KPa e 540 KPa respectivamente; 3) Secar as amostras em estufa a +- 28 °C durante 88 horas; 4) Repetir os procedimentos anteriores por mais duas vezes.	1%	1,6%
CSA 112.10:2007	Interno	1) Submersão das amostras em água a temperatura ambiente; 2) Aplicação de vácuo e pressão por duas horas a 75KPa e 540 KPa respectivamente; 3) Secar as amostras em estufa a +- 28 °C durante 88 horas; 4) Repetir os procedimentos anteriores por mais duas vezes, apenas para coníferas.	1%	-
ASTM D 2559:2004	Externo	1) Submersão as amostras em água entre 18 a 27 °C; 2) Aplicação de vácuo a 85 KPa por 5 min em seguida de pressão a 517 KPa por uma hora; 3) Secar as amostras em estufa a temperatura de 65,5 °C por 22 horas; 4) Aplicar um ciclo de vapor a 100 °C por aproximadamente uma hora e meia; 5) Submeter as amostras novamente em água a mesma temperatura inicial para aplicação de pressão a 517 KPa por 40 min; 6) Secar em estufa novamente com a mesma temperatura e tempo inicial; 7) Repetir os dois ciclos iniciais e novamente a secagem após o término.	1%	1,6%
EN 14080:2013	Tipo II	Método A: 1) Submersão das amostras em água a temperatura ambiente de 10 a 20 °C; 2) Aplicação de vácuo entre 70 a 85 KPa por 5 min e pressão entre 500 e 600 KPa por uma hora; 3) Realizar um novo ciclo; 4) Secar as amostras em estufa a uma temperatura entre 60 e 70 °C, teor de umidade de no máx. 15% e circulação de ar entre 2 e 3 m/s durante um período de 21 a 22 horas; 5) Realizar novamente os procedimentos.	Máxima 5%	
EN 14080:2013	Tipo II	Método B: 1) Submersão das amostras em água a temperatura ambiente de 10 a 20 °C; 2) Aplicação de vácuo entre 70 a 85 KPa por 30 min e pressão entre 500 e 600 KPa por duas horas; 3) Secar as amostras em estufa a uma temperatura entre 60 e 70 °C, teor de umidade entre 8 e 10% e circulação de ar entre 2 e 3 m/s durante um período de 10 a 15 horas.	Máxima 4%	
EN 14080:2013	Tipo I	Método C: 1) Submersão das amostras em água a temperatura ambiente de 10 a 20 °C; 2) Aplicação de vácuo entre 70 a 85 KPa por 30 min e pressão entre 500 e 600 KPa por duas horas; 3) Realizar um novo ciclo; 4) Secar as amostras em estufa a uma temperatura entre 25 e 30 °C, teor de umidade entre 25 e 35% e circulação de ar entre 2 e 3 m/s durante um período de 90 horas.	Máxima 10%	

Fonte: Elaboração própria.

4.6 ESTUDOS DESENVOLVIDOS SOBRE MLC

Este capítulo tem por objetivo abordar os estudos desenvolvidos nos últimos anos abordando o MLC e espécies de madeira, adesivos e/ou tratamentos semelhantes aos utilizados no presente trabalho.

Jesus (2000) avaliou a eficiência do adesivo poliuretano bicomponente à base de mamona em MLC de *Pinus caribea hondurensis* e *Eucalyptus grandis* através de ensaios mecânicos de cisalhamento, tração normal e tração paralela às fibras, conforme ABNT NBR 7190:1997. O autor concluiu que o adesivo é adequado para emprego em MLC em estruturas com madeiras de reflorestamento.

Fiorelli (2005) estudou critérios para a fabricação de vigas de MLC com e sem reforço de fibras de vidro. Além disso, propôs um modelo numérico para cálculo do momento fletor resistente e da rigidez à flexão e de vigas de MLC sem reforço e reforçadas com PRF (Polímero Reforçados com Fibras). Por fim, o trabalho avaliou a eficiência de adesivos fenol-resorcinol e Epóxi AR-300, submetendo as vigas à variação de temperatura, umidade e pressão em de ensaios de delaminação. Os resultados indicaram a validade do modelo proposto e a eficiência dos adesivos. Inclusive, o emprego de PRF se apresentou significativo no aumento de resistência e rigidez da estrutura.

Santos e Del Menezzi (2010) estudaram o efeito da gramatura de resorcinol-formaldeído na resistência ao cisalhamento de elementos de MLC de *Allantoma lineata* e *Simarouba amara*. Foram estudadas as gramaturas de 200, 300 e 400 g/m². A linha de cola foi analisada através do percentual de ruptura na madeira e teste de cisalhamento longitudinal, seguindo procedimentos da ABNT NBR 7190:1997. Os resultados mostraram que as maiores resistências foram obtidas para gramaturas próximas a 300 g/m².

Calil Neto (2011) estudou os ensaios de controle de qualidade de elementos estruturais de MLC, com base nas normas canadense CSA 0177-2006, americana AITC A 190.1-2007, europeia EN 386-2001 e chilena NCh2148.cR2010 e propôs recomendações procedimentais para o sistema de controle de qualidade dos materiais utilizados na produção de MLC. Foram utilizadas três combinações espécie-adesivo-tratamento. Os resultados apresentaram que as melhores combinações foram aquelas que empregaram a madeira de pinus com qualquer tipo de adesivo ou tratamento adotado, podendo, inclusive, ser adotada para meios externos. A metodologia proposta pelo autor se demonstrou satisfatória para classificação de classe de utilização para as combinações espécie-adesivo-tratamento preservante.

Almeida *et al.* (2011) verificaram a eficiência da linha de cola de vigas MLC da madeira de Paricá (*Schizolobium amazonicum Herb*) e adesivo fenol-resorcinol por meio de ensaios de resistência ao cisalhamento da linha de cola e delaminação, segundo recomendações da norma americana AITC 190:2007. Os autores concluíram que a madeira empregada para a construção de MLC apresentou desempenho semelhante a de outras espécies amplamente utilizadas para tal fim na indústria.

Calil Neto *et al.* (2016) avaliaram as eficiências de colagem de amostras de MLC utilizando combinações variando quatro espécies de madeira de reflorestamento brasileiras, três adesivos e três tipos de tratamentos preservantes da madeira. A eficiência de colagem foi avaliada através de testes de delaminação (seguindo recomendações da norma canadense CSA 0112.12:2006) e de resistência cisalhamento, conforme a norma ANSI/AITC A190:2007. O estudo revelou que, entre as combinações estudadas, aquelas que empregaram madeira de *Pinus oocarpa* e Paricá (*Schizolobium amazonicum*) combinadas com qualquer adesivo ou qualquer tratamento preservante investigado apresentaram melhor desempenho nos ensaios, sendo essas combinações indicadas para aplicações em ambientes externos. A madeira *Lyptus*, em qualquer combinação de tratamentos, se revelou adequada para ambientes internos. A madeira de Teca (*Tectona grandis*), no entanto, pode ser utilizada internamente (empregando adesivos poliuretanos e qualquer tratamento) ou externamente (empregando fenol-resorcinol-formaldeído e qualquer tratamento).

Nogueira (2017) avaliou a adequação de métodos de ensaio propostos pelos projetos de norma ABNT NBR PN 02:126.10-001-3 e ABNT NBR PN 02:126.10-001-5 para subsidiar o controle de qualidade na indústria através do estudo das propriedades de elementos estruturais de MLC. Para tal, o autor utilizou uma série de vigas de MLC de diferentes combinações espécie-adesivo, realizando ensaios de cisalhamento na linha de cola, delaminação e compressão paralela às fibras, além do ensaio de tração paralela às fibras para avaliação da resistência das emendas dentadas. A partir do estudo, o ensaio de delaminação para adesivos sujeitos a ambientes externos foi considerado eficaz e prático. Para os testes de cisalhamento, o autor propõe uma redução no número de análises, desde que a região central seja priorizada, uma vez que esta possui maior concentração de tensões de cisalhamento. O autor afirma que a madeira de eucalipto apresenta maior dificuldade de colagem em função de sua alta densidade, levando à uma alta frequência de ruptura na linha de cola, em especial, das emendas dentadas, e obteve um percentual elevado para delaminação da espécie.

Santos (2017) avaliou a ABNT NBR PN 02:126.10-001-5 para análise da eficiência da linha de cola de elementos de MLC de *Pinus sp.* e resorcinol-formaldeído através de

ensaios de delaminação e resistência ao cisalhamento da linha de cola. Como resultados, a autora obteve percentuais de delaminação abaixo de 4%, como recomendado pela norma, indicando uma colagem eficiente. Em relação às médias de resistência ao cisalhamento da linha de cola, as lâminas não apresentaram diferenças significativas entre si.

Páschoa (2018) investigou o projeto de norma ABNT NBR PN 02:126.10-001-5, submetendo elementos de MLC de *Eucalyptus sp.* e Cascophen RS-216M a ensaios de delaminação e resistência ao cisalhamento da linha de cola. Os resultados indicaram uma colagem insatisfatória, uma vez que foram obtidos percentuais máximos de delaminação de 71,40%. As médias de resistência ao cisalhamento da linha de cola não apresentaram diferenças significativas entre si, considerando um mesmo CP de MLC.

Pröller *et al.* (2018) determinaram a influência de variáveis como material e processamento na qualidade de colagem de MLC de *Eucalyptus grandis* no estado úmido e resina poliuretana monocomponente, empregando os procedimentos da EN 16351 (2015). Os parâmetros estudados foram densidade e teor de umidade da madeira, velocidade e pressão de espalhamento de adesivo, analisando sua influência sobre a resistência ao cisalhamento da linha de cola. Utilizando tomografia, a qualidade de colagem foi investigada. Como resultados, os autores verificaram a viabilidade de colagem dessa espécie de madeira no estado úmido utilizando a resina em questão, que possui cura por umidade. Testes estatísticos demonstraram que amostras com teor de umidade mais elevado (por volta de 60%) apresentaram melhores resultados do que aquelas com umidade próxima do ponto de saturação das fibras. O mesmo estudo indicou que gramaturas mais baixas (150 g/m²) são preferíveis às mais altas (250 g/m²) para a combinação estudada. O aumento da pressão de colagem não aumentou significativamente a resistência ao cisalhamento da linha de cola.

Barros (2019) comparou a rigidez da madeira através de dois métodos não destrutivos: técnica de excitação por impulso e flexão estática. Foram analisadas lamelas a serem utilizadas na confecção de MLC de *Pinus elliottii* e *Eucalyptus saligna*, nos estados in natura e tratadas com CCA. A autora obteve resultados que indicaram que o coeficiente de correlação entre o módulo estático (ensaio de flexão) e o módulo dinâmico (sonelastic) foi moderada. A autora afirma que o método de excitação por impulso se mostrou mais prático e rápido do que o método por flexão estática para obtenção da rigidez da madeira, no entanto, apresentou maior heterogeneidade dos resultados.

Moya *et al.* (2019) estabeleceram a relação entre os parâmetros de fabricação da MLC de *Eucalyptus grandis* com resina poliuretana monocomponente e suas propriedades estruturais, a fim de adequar os métodos normativos europeus de ensaios à tecnologia

existente no Uruguai. Os parâmetros adotados foram comprimento do *finger-joint* de 15 mm, pressão de colagem de 10 MPa e de 1,2 MPa nas uniões dentadas e controle de tempos de prensagem. Os resultados dos testes demonstraram que os parâmetros sugeridos pelas normas europeias adotadas no estudo são adequados para produção de MLC no Uruguai.

Okada *et al.* (2019) estudaram dois diferentes tratamentos cíclicos de envelhecimento acelerado para avaliação da durabilidade de MLC de três diferentes espécies de madeira empregando o adesivo API (*Aqueous Polymer-Isocyanate*), resina relativamente nova em termos de aplicações estruturais. Como resultado, para os dois tratamentos de envelhecimento acelerado, o percentual de ruptura na madeira da MLC não diminuiu, ainda que a resistência ao cisalhamento tenha caído, de modo que a redução da resistência ao cisalhamento foi atribuída às trincas surgidas na madeira ao invés da deterioração dos adesivos. Por fim, os autores afirmam que a MLC empregando adesivo API apresentou durabilidade igual ou superior à madeira maciça e à MLC utilizando resorcinol-formaldeído quando expostos a um tratamento de envelhecimento acelerado cíclico a seco.

Segundinho *et al.* (2019) avaliaram a qualidade de colagem da MLC produzida a partir da madeira de *Corymbia citriodora* com resorcinol-fenol-formaldeído, comparando as propriedades físicas e mecânicas da combinação com os valores alcançados para peças maciças de *Eucalyptus sp.* e *Pseudotsuga enziesii*. Para realização dos ensaios de resistência ao cisalhamento da linha de cola, os autores empregaram a norma ASTM D905:2009 e para o ensaio de delaminação, a AIT T110:2007. Como resultado, as propriedades mecânicas iguais ou superiores obtidos indicam a viabilidade da substituição da madeira serrada pela MLC. No entanto, a MLC de *Corymbia citriodora* apresentou percentual de delaminação e maior falha na linha de cola do que o recomendado pela ABNT NBR 7190:1997. Ainda que a resistência média ao cisalhamento da linha de cola atingido seja próxima da apresentada pela norma brasileira, a aplicação da espécie para MLC se restringe a ambientes nos quais os esforços de cisalhamento são irrelevantes.

4.7 CONCLUSÕES SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A partir da investigação dos trabalhos desenvolvidos no Brasil com MLC, foi observado que são utilizadas normas internacionais para investigação da eficiência de colagem. Tal ocorrência se justifica pelo fato de que a norma brasileira vigente ABNT NBR 7190:1997 não fornece métodos para ensaio da qualidade de adesivos e elementos estruturais.

É importante ressaltar que tais normas internacionais foram desenvolvidas com base em espécies de madeira diferentes da usualmente aplicadas nas construções brasileiras, além do fato de se tratar de países com clima diferente do brasileiro. Neste sentido, sendo o Brasil um país tropical, as madeiras aplicadas nas construções locais sofrem mais com ataques biológicos por microrganismos do que países com clima frio, de modo que o material necessita de um tratamento preservante adequado que prolongue sua vida útil. Além disso, o fato de se tratar de diferentes climas nas citadas regiões implica em diferentes desempenhos da madeira frente às condições climáticas. Ou seja, não faz sentido investigar a resistência ao cisalhamento da linha de cola e a delaminação para MLC a ser aplicado no Brasil com documentos normativos que consideram a possibilidade de neve, por exemplo.

Frente a tais questões, verifica-se a importância de se estabelecer procedimentos de investigação da qualidade de colagem da MLC adequados à realidade da indústria brasileira.

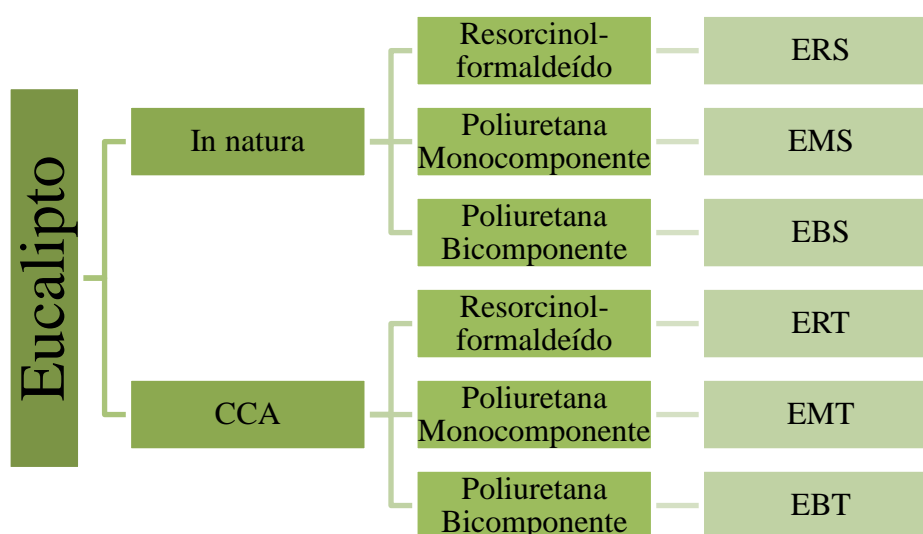
No que se trata dos adesivos, a indústria produtora de MLC busca alternativas que resultem num produto de qualidade, duradouro, mas que também apresente um custo minimizado. Assim, se reforça a importância da investigação das resinas poliuretanas, as quais apresentam menor custo que aquelas à base de resorcinol-formaldeído.

A região de adesão entre os materiais é crítica para a produção da MLC, de modo que a investigação profunda de suas propriedades e desempenho promove uma maior durabilidade e maior segurança da estrutura.

5 MATERIAL E MÉTODOS

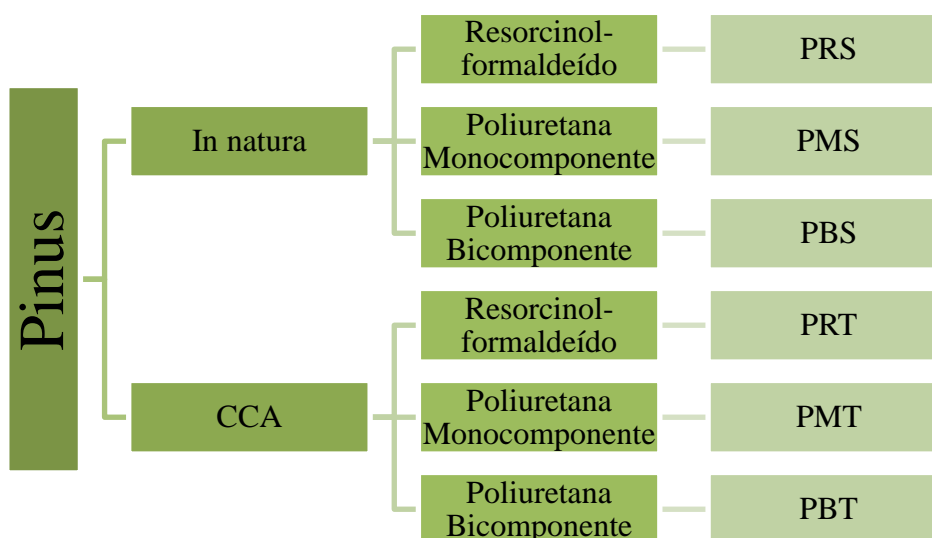
A fim de facilitar a compreensão da nomenclatura atribuída a cada uma das 12 combinações espécie-adesivo-tratamento preservante estudadas no presente trabalho, foram elaborados os fluxogramas apresentados pelas Figuras 12 e 13, referentes às combinações relacionadas às espécies de Eucalipto e Pinus, respectivamente.

Figura 12 - Critério de identificação das combinações com madeira de Eucalipto.



Fonte: Autoria própria.

Figura 13 - Critério de identificação das combinações com madeira de Pinus



Fonte: Autoria própria.

A identificação possui três letras, onde a primeira corresponde à espécie de madeira empregada, a do meio se refere ao adesivo utilizado e a última descreve se a madeira utilizada passou por tratamento preservante com CCA ou se foi utilizada “In natura” (sem tratamento). Tal critério de identificação atribuiu “E” na primeira posição para as combinações com Eucalipto e “P” para as combinações com Pinus. Na posição do meio, combinações com resina Resorcinol-formaldeído possuem “R”; com resina Poliuretana Monocomponente, “M” e com resina Poliuretana Bicomponente, “B”. Na última posição de cada sigla, se a madeira utilizada não possuiu tratamento preservante, foi atribuída a letra “S”, caso contrário, recebeu a letra “T”.

5.1 CONFECÇÃO DAS LAMELAS E DOS CPs DE CARACTERIZAÇÃO

As peças de madeira utilizadas neste trabalho foram fornecidas pela empresa Vale do Cedro, localizada no município de Ribeirão Branco – SP e são apresentadas pela Figura 14. Foram utilizadas as espécies de madeira de *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis*.

Figura 14 - Peças de madeira doadas pela Vale do Cedro



Fonte: Autoria própria.

Para colagem das vigas de MLC, foram empregados três tipos de adesivo: Cascophen RS - 216M (resorcinol-formaldeído) com catalisador em pó, Jowat 686.60 monocomponente (poliuretano) e AG101 bicomponente por KEHL Ind. e Com. Ltda (poliuretano).

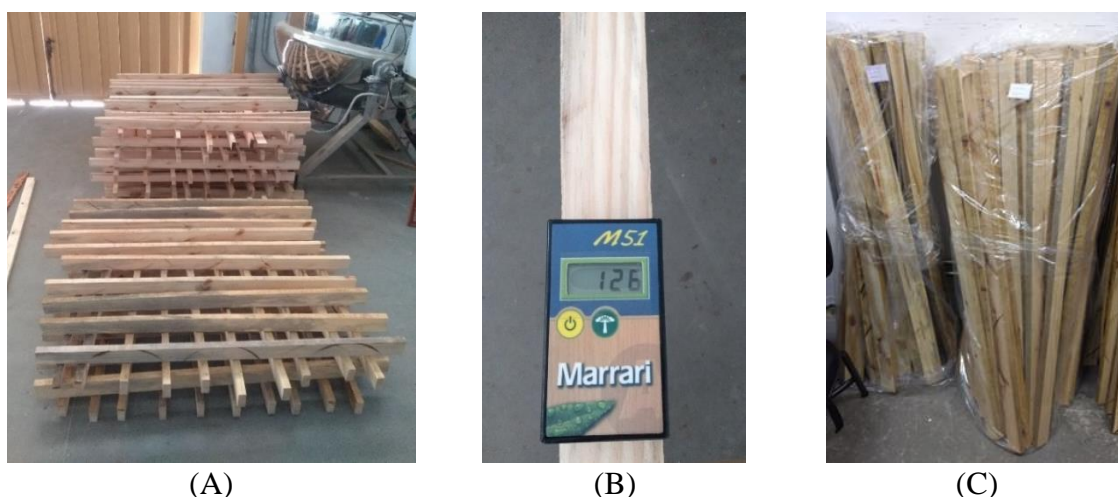
Foram utilizados elementos estruturais não tratados de 6 cm x 16 cm x 300 cm para retirar amostras de dimensões padronizadas pela ABNT NBR 7190:1997, Anexo B. De cada elemento, foram retiradas 10 lamelas de dimensões 2 cm x 5 cm x 120 cm, 03 CP para ensaio de resistência à compressão, 03 para ensaio de resistência ao cisalhamento e 06 para umidade

e densidade aparente. Após a usinagem, as amostras foram devidamente identificadas e lixadas, então os CPs de caracterização passaram por processo de secagem até atingirem a umidade de $12 \pm 1\%$. A umidade das amostras foi calculada a partir dos CPs de umidade, conforme o Anexo B da ABNT NBR 7190:1997. Atingida a umidade desejada, os CPs de caracterização foram depositados em sacos plásticos e acondicionados em ambiente de temperatura e umidade controlados para manutenção das condições adequadas até a data dos ensaios de caracterização.

5.2 ARMAZENAMENTO E CONTROLE DE UMIDADE DAS LAMELAS

De forma semelhante às amostras de caracterização, para alcance do teor de umidade adequado para montagem das vigas (conforme Cerchiari (2013), a umidade das lamelas não deve ser superior a 15%), as lamelas foram entabucadas logo após sua usinagem. Alcançado o teor de umidade desejado, as lamelas foram acondicionadas em sacos plásticos para controle de umidade até a utilização para fabricação das vigas de MLC. O controle do teor de umidade das lamelas e dos CP de caracterização foi realizado com o auxílio do medidor de umidade por contato Marrari M51. A Figura 15 apresenta os citados procedimentos.

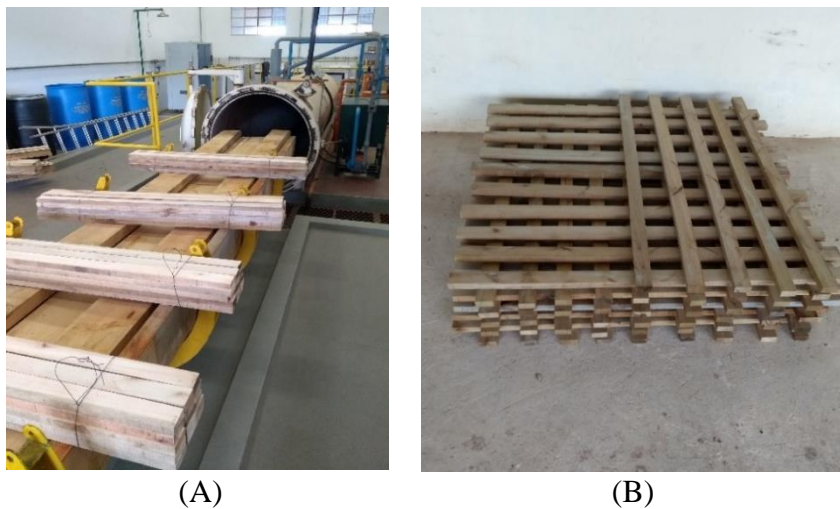
Figura 15 - Adequação das lamelas: (A) Secagem ao ar por entabucamento; (B) Controle de umidade das lamelas; (C) Lamelas ensacadas para manutenção da umidade.



Fonte: Autoria própria.

Do total de lamelas usinadas, uma parte foi submetida ao tratamento preservativo com CCA no Laboratório de Preservação da Madeira da UNESP de Itapeva através de pressão em autoclave. A Figura 16 apresenta as lamelas sendo preparadas para o tratamento (A) e entabucadas para secagem logo após o procedimento (B).

Figura 16 - Tratamento preservativo das lamelas: (A) Material pronto para o tratamento; (B) Secagem após tratamento.

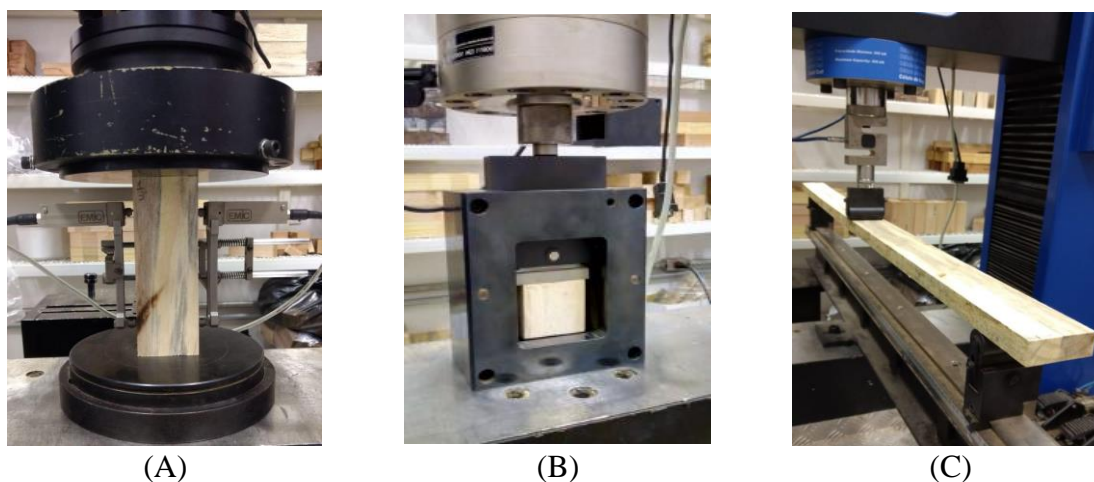


Fonte: Autoria própria.

5.3 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Os ensaios de caracterização física e mecânica da madeira foram conduzidos conforme a ABNT NBR 7190:1997. Foram determinadas as propriedades: resistência à compressão paralela às fibras (f_{C0}), resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (f_{V0}) e os módulos de elasticidade na compressão e flexão estática na direção paralela às fibras ($E_{C0,m}$ e $E_{M,m}$), além da densidade aparente (ρ_{ap}). A Figura 17 ilustra os ensaios de caracterização mecânica das amostras.

Figura 17 - Caracterização mecânica dos CPs: (A) Compressão; (B) Cisalhamento; (C) Flexão estática.



Fonte: Autoria própria.

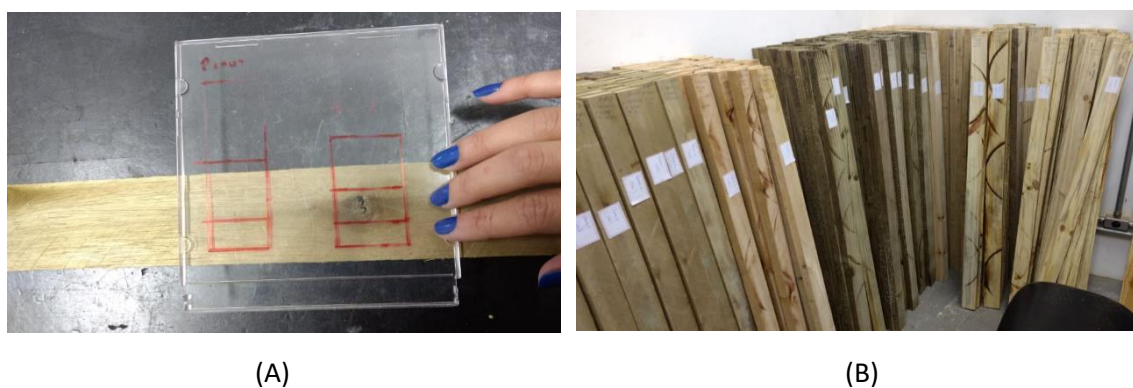
A densidade aparente do material foi determinada de forma individual, lamela a lamela, e corrigida com auxílio da Equação de Logsdon (1998), Equação 5, citada na seção 4.3.5 deste trabalho. A variação volumétrica para obtenção do coeficiente de retratibilidade foi determinada conforme procedimentos do Anexo B da ABNT NBR 7190:1997, no item referente à estabilidade dimensional da madeira.

5.4 CLASSIFICAÇÃO VISUAL

Esta etapa foi realizada com base nos critérios de classificação visual de peças estruturais do projeto de norma PN-02-126.10-001-1. A partir das recomendações do projeto de norma, foram avaliados a presença de medula, tamanho de nós, encurvamento, arqueamento e torcimento.

Foi elaborado um gabarito em material transparente para facilitar a verificação dos tamanhos dos nós para atribuição das respectivas classes (Figura 18 - A). A partir da classificação visual, as lamelas foram identificadas em função de suas classes para melhor organização (Figura 18 - B).

Figura 18 - Classificação visual das lamelas: (a) Gabarito; (b) Lamelas atribuídas às respectivas classes.



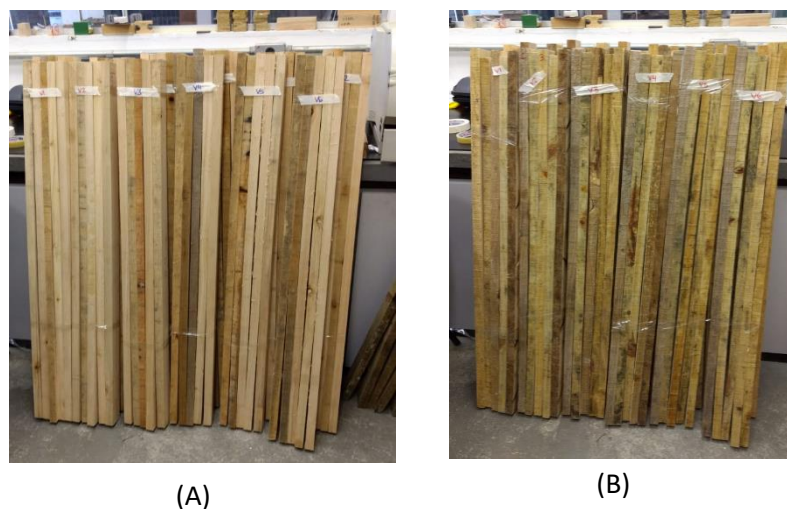
Fonte: Autoria própria.

5.5 FABRICAÇÃO DAS VIGAS DE MLC E PRODUÇÃO DE CPs

Anteriormente à fabricação das vigas, as lamelas foram selecionadas conforme os resultados obtidos para as propriedades físicas e mecânicas da madeira (classificação visual, E_M , E_{C0} , $f_{C0,m}$, f_{V0} e ρ_{ap}). As lamelas de melhor classificação visual foram posicionadas nas extremidades superior e inferior das vigas, bem como aquelas de maior rigidez. Então as

lamelas foram organizadas e identificadas conforme suas respectivas posições finais nas vigas. Em seguida, as vigas foram individualizadas com fita adesiva (Figura 19).

Figura 19 - Pré-organização das lamelas para montagem das vigas: (A) Lamelas de Eucalipto; (B) Lamelas de Pinus.



Fonte: Autoria própria.

No dia da montagem das vigas, as lamelas tiveram suas superfícies aplainadas para padronizar sua espessura e melhorar a aderência da resina (Figura 20).

Figura 20 - Aplainamento das lamelas.

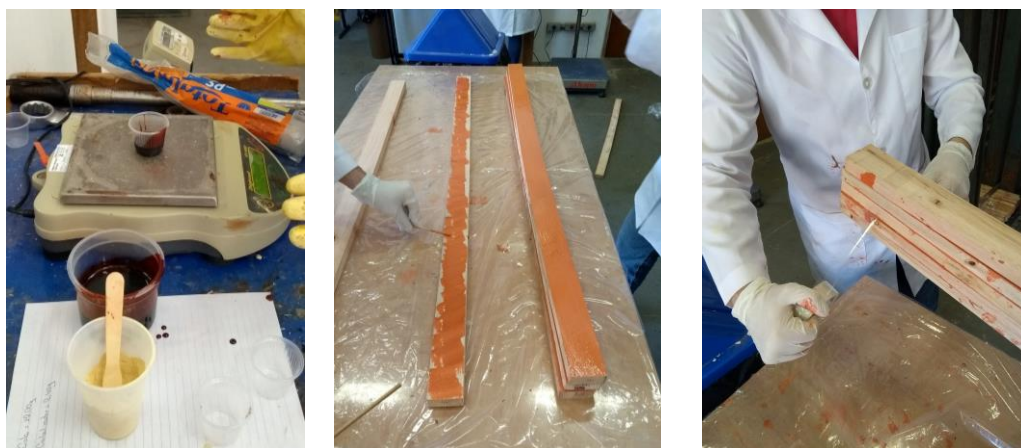


Fonte: Autoria própria.

A gramatura utilizada foi de 240g/m², estabelecida em estudos realizados anteriormente no campus (SANTOS, 2017; PÁSCHOA, 2018; BARROS, 2019), e o adesivo foi aplicado em apenas uma das faces das lamelas (linha dupla). Em seguida, as lamelas com

resina foram posicionadas uma a uma, em ordem, formando a viga. Fita adesiva foi utilizada para auxiliar o posicionamento da viga na prensa. A Figura 21 apresenta essas etapas.

Figura 21 - Colagem das vigas: (A) Pesagem da resina resorcinol-formaldeído e do catalisador; (B) Aplicação da mistura resina-catalisador nas lamelas; (C) Passagem de fita na viga após colagem.



(A)

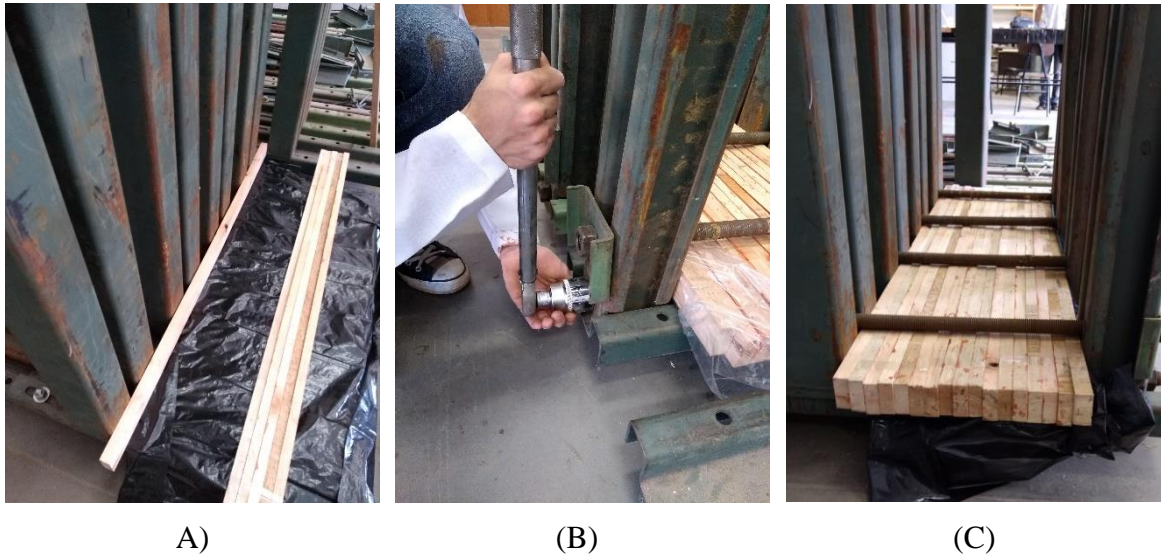
(B)

(C)

Fonte: Autoria própria.

Com base na literatura (SANTOS, 2017; PÁSCHOA, 2018; BARROS, 2019) os procedimentos de prensagem das vigas tiveram duração de 72 horas cada, garantindo a cura completa das resinas e prensagem suficiente. Foram utilizados uma prensa de chão e um torquimetro para distribuição da pressão ao longo do comprimento das vigas. Foram empregados quatro pontos de aplicação de pressão por viga, com aplicação de torque em dois parafusos. Para que fosse aplicada a pressão de forma uniforme e adequada ao longo de toda a viga, foi calculado o torque necessário em cada parafuso. A ABNT NBR PN 02:126.10-0001-5 estabelece que para madeiras com densidade aparente média superior a $0,5 \text{ g/cm}^3$, seja aplicada a pressão de 1,2 MPa e caso sejam de densidade inferior a tal valor, empregar 0,7 MPa de pressão. Uma vez que as lamelas de Pinus estudadas apresentaram densidade aparente média superior a $0,5 \text{ g/cm}^3$, foi aplicada a pressão de 1,2 MPa (resultando no toque de 35,41 N.m) nas vigas de MLC. As vigas de Eucalipto, no entanto, apresentaram lamelas de densidade aparente média inferior a $0,5 \text{ g/cm}^3$ e, portanto, foram aplicadas pressões de 0,7 MPa, resultando no torque de 20,65 N.m. A Figura 22 apresenta o posicionamento das vigas e a montagem da prensa.

Figura 22 - Prensagem: (A) Posicionamento das vigas; (B) Aplicação do torque; (C) Vigas em processo de prensagem.



A)

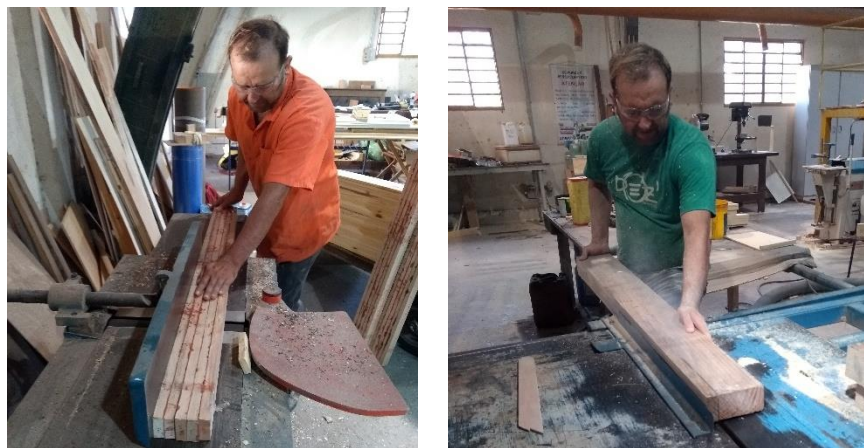
B)

C)

Fonte: Autoria própria.

Ao fim das 72 horas, as vigas foram removidas da prensa, levadas para a desgrossadeira (Figura 23 - A), e para a serra circular (Figura 23 - B), a fim de suavizar as superfícies dos elementos de MLC e cortar suas extremidades.

Figura 23 - Uniformização das vigas de MLC: (A) Desgrossadeira; (B) Serra Circular.



A)

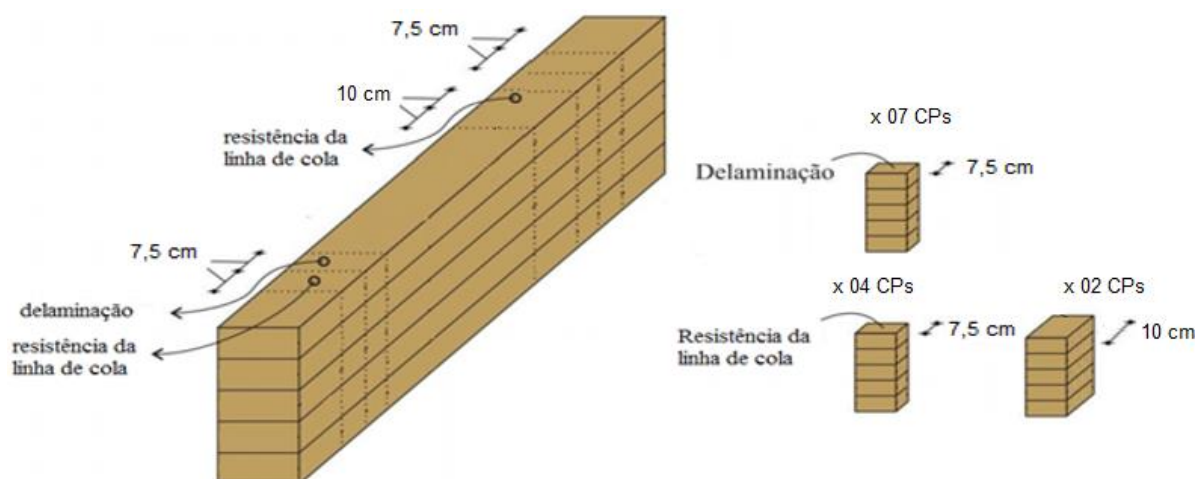
B)

Fonte: Autoria própria.

Em seguida, os CPs de delaminação e resistência na linha de cola foram retirados de modo que a ABNT/PN 02:126.10-0001-5 sugere que de cada viga sejam retirados 04 amostras de dimensões 7,5 cm x 5 cm x 10 cm e 02 amostras de dimensões 10 cm x 5 cm x

10 cm para o ensaio de resistência ao cisalhamento da linha de cola e outros 07 CPs para o ensaio de delaminação, com dimensões 7,5 cm x 5 cm x 10 cm. Assim, de cada viga de MLC, foram retirados 11 CPs para avaliação da eficiência de colagem. A Figura 24 apresenta o esquema de retirada de tais amostras.

Figura 24 - Esquema dos CPs de delaminação e resistência na linha de cola por viga.



Fonte: Adaptado de Nogueira (2017).

5.6 ENSAIOS DE DELAMINAÇÃO DA LINHA DE COLA

Foram ensaiados 07 CPs de dimensões 7,5 cm x 5 cm x 10 cm por viga de MLC confeccionada. Para este ensaio, foi confeccionada uma autoclave em formato cilíndrico, com comprimento de 105 cm, diâmetro de 48 cm e aproximadamente 1,10 cm de espessura de parede. O equipamento contou com uma bomba de vácuo com manômetro, cuja capacidade é de 75 kPa, e um tambor para armazenamento de água a ser utilizada no ensaio de delaminação. Outro cilindro, foi acoplado ao equipamento para controle do excesso de água ao longo da etapa de vácuo. Para a etapa de pressão, foi utilizado um sistema externo de ar comprimido, cuja magnitude foi controlada a partir de um manômetro. As ligações entre cilindros, manômetros e tambor de água foi promovido pela presença de canos metálicos. Para garantia da imersão dos CPs em água ao longo do ensaio, foi utilizada ainda uma chapa moeda no interior da autoclave, sob as amostras. A Figura 25 apresenta o equipamento.

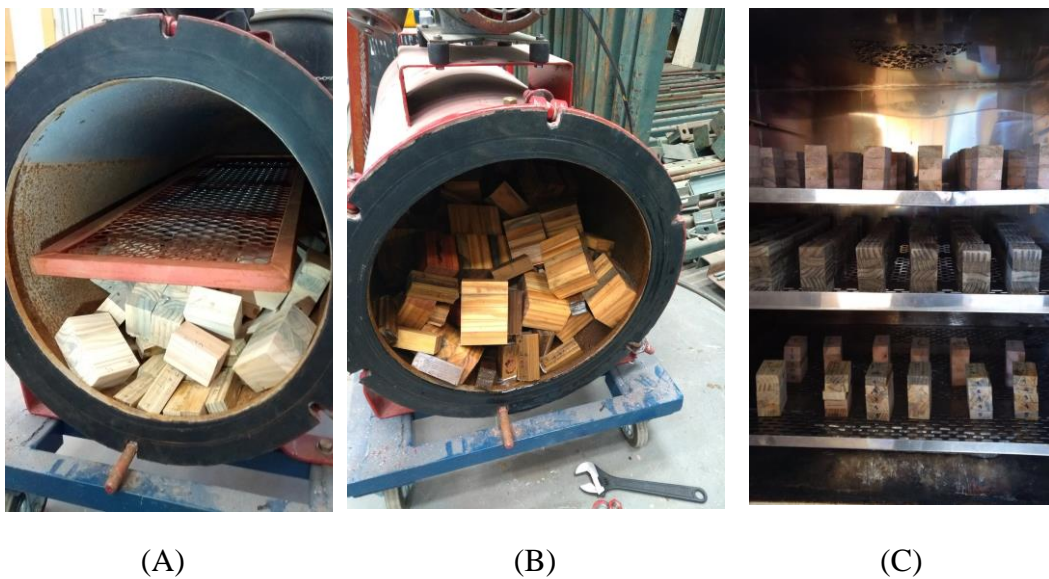
Figura 25 - Equipamentos (autoclave) para ensaio de delaminação na linha de cola.



Fonte: Autoria própria.

Ao início do procedimento, os CPs foram depositados no interior da autoclave e a grelha foi colocada sobre os mesmos, de forma a garantir que as amostras fiquem submersas ao longo da etapa de pressão. Após o decorrer do ensaio, os CPs foram levados à estufa com umidade e velocidade do ar controlada (Figura 26).

Figura 26 - Ensaio de delaminação: (A) Antes do ensaio; (B) Após o ensaio; (C) Amostras durante secagem em estufa.



(A)

(B)

(C)

Fonte: Autoria própria.

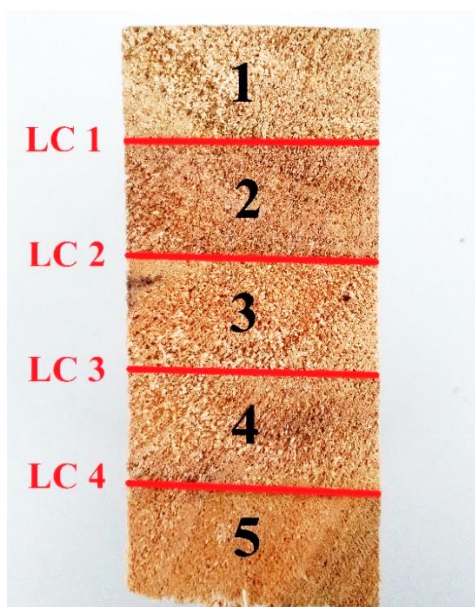
5.6.1 Análise dos resultados de delaminação

Os resultados de delaminação da linha de cola foram analisados em função do percentual médio de delaminação de cada combinação, comparando-se os resultados obtidos com o percentual de delaminação máximo aceitável estabelecido pela ABNT NBR PN 02:126.10-001-5, de 4%.

5.7 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DA LINHA DE COLA

Para os ensaios de resistência na linha de cola, foi utilizada a máquina universal de ensaios EMIC, de capacidade de 300 kN. Foram ensaiados 04 CPs por viga de MLC com altura de 7,5 cm e 02 CPs de altura de 10 cm, conforme ABNT NBR PN 02:126.10-001-5 e especificado no item 5.5 deste trabalho. Para tais ensaios, foi confeccionado um dispositivo adequado à aplicação da força de cisalhamento na linha de cola, na direção das fibras, conforme a Figura 28. A Figura 27 representa o critério de identificação das linhas de cola para posterior análise dos resultados.

Figura 27 - Critério de identificação das linhas de cola (LC).



Fonte: Autoria própria.

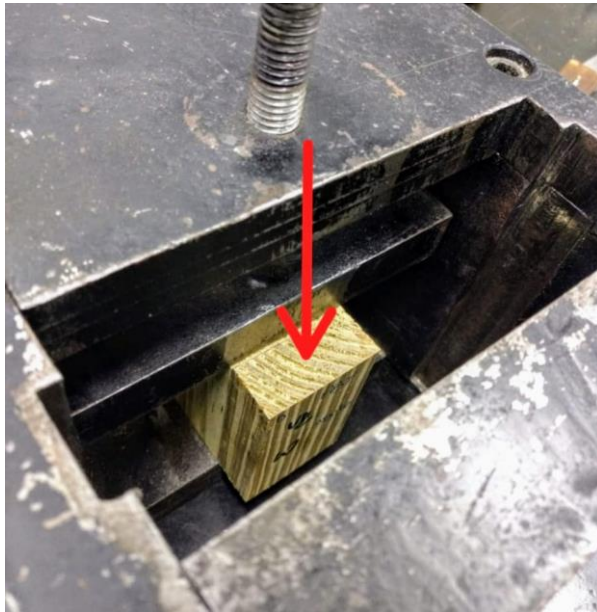
Figura 28- Ensaio de resistência ao cisalhamento da linha de cola: (A) Posicionamento do CP no dispositivo; (B) Posicionamento da parte móvel do dispositivo; (C) Demonstração da área de aplicação de força de cisalhamento; (D) Ensaio sendo realizado.



(A)



(B)



(C)



(D)

Fonte: Autoria própria.

5.7.1 Análise estatística dos resultados de resistência ao cisalhamento da linha de cola

Para investigação dos resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento da linha de cola, foram realizadas análises estatísticas a partir de teste de normalidade, ANOVA e teste de Tukey por meio do *software* Minitab.

Para análise das médias de resistência ao cisalhamento de cada linha de cola, foram utilizados boxplots, permitindo a visualização do intervalo de resistências e as médias alcançadas por cada linha de cola.

Para análise de normalidade de todas as combinações, foi utilizado o teste de Shapiro-Wilk, considerando as médias de cada linha de cola. Verificada a normalidade dos dados, foi realizada a ANOVA. Nos casos onde a ANOVA apresentou p-valor menor que 0,05 (indicando que existem diferenças significativas entre as médias), foi efetuado teste de Tukey para verificar se as médias diferem entre si, com grau de significância de 95%. Em caso de dados não paramétricos, foi realizada a análise de Kruskal-Wallis.

Foram desclassificadas da análise todas as linhas de cola cuja ruptura completa ocorreu antes de seu ensaio ou imediatamente após o início do ensaio.

No caso da análise das médias de resistência ao cisalhamento da linha de cola para comparação entre combinações, foi também empregado o gráfico do tipo boxplot para visualização das médias e do intervalo de resistências. Para a análise de normalidade de todas as combinações, foi utilizado o teste de Shapiro-Wilk, considerando as médias de cada linha de cola. Todas as combinações apresentaram P-valor maior que 0,05, de modo a indicar a normalidade dos dados. Em seguida, foi realizado o teste T, para comparação das médias, se o P-valor for maior do que 0,05 as médias não diferem estatisticamente.

5.7.2 Análise da falha na madeira

A quantificação do percentual de falha na madeira causado por ensaio de resistência ao cisalhamento da linha de cola é atualmente obtida de modo visual, sem qualquer recomendação normativa (brasileira ou internacional) adequada. Deste modo, os resultados de tal parâmetro estão sujeitos à subjetividade.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 DELAMINAÇÃO

A Tabela 4 apresenta os resultados médios obtidos para os ensaios de delaminação para cada uma das combinações de vigas de MLC ensaiadas. “Lt” corresponde ao somatório médio total das linhas de cola; “La” ao somatório médio das aberturas na linha de cola e “Dt” ao percentual de delaminação médio calculado conforme a Equação 4 da página 25.

Tabela 4 - Resultados médios de delaminação.

Combinação	Lt (mm)	La (mm)	Dt (%)	Combinação	Lt (mm)	La (mm)	Dt (%)
ERS	354,27	2,27	0,64	ERT	324,10	20,70	7,03
EMS	355,18	15,22	4,28	EMT	324,40	56,91	15,89
EBS	350,34	2,70	0,83	EBT	267,81	18,75	6,98
PRS	236,30	5,22	2,26	PRT	402,72	33,83	8,41
PMS	389,17	148,43	38,05	PMT	398,35	112,29	28,17
PBS	399,43	240,18	60,06	PBT	395,47	239,49	60,66

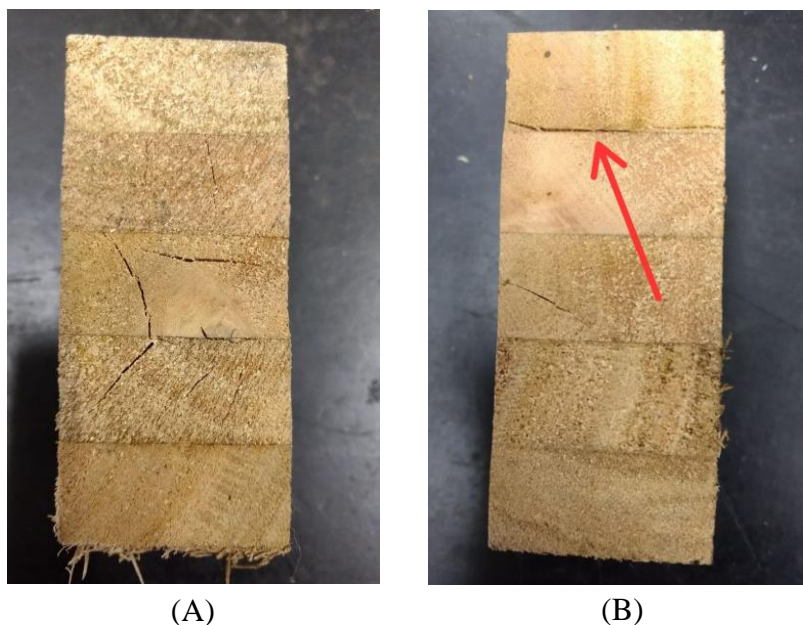
Fonte: Elaboração própria.

Pode-se observar na Tabela 4 que as combinações que apresentaram percentual de delaminação média aceitável conforme o projeto de norma PN 02:126.10-0001-5 (baseado na norma EN 14080:2013) de 4% foram ERS, EBS e PRS, respectivamente com delaminações totais médias de 0,64%, 0,83% e 2,26%.

De maneira geral, os melhores resultados, ou seja, menores percentuais de delaminação, foram associados às combinações que empregaram as madeiras no estado in natura e aquelas com adesivo resorcinol-formaldeído.

A Figura 29 apresenta exemplares da melhor combinação (em termos de percentual de delaminação média), ERS. Em (A), um CP com apenas 0% de delaminação (aceitável) e em (B) um CP com 5,51% de delaminação (rejeitado pela norma).

Figura 29 - CPs de delaminação da combinação ERS: (A) CP com delaminação aceitável; (B) CP com delaminação acima do percentual máximo



Fonte: Autoria própria.

6.2 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DA LINHA DE COLA

6.2.1 Análise da linha de cola

Todas as linhas de cola, identificadas como LC 1, LC 2, LC 3 ou LC 4, apresentaram P-valor maior que 0,05, de modo a indicar a normalidade dos dados. A única população que possuiu P-valor menor que 0,05 foi a LC 2 e a LC 4 da combinação ERT com CP de altura 7,5 cm. Devido a essa heterogeneidade dos dados, nesse caso, foi efetuada uma análise não paramétrica (Kruskal-Wallis).

As Tabelas 5 e 6 apresentam os resultados médios de resistência ao cisalhamento das linhas de cola para CPs de 7,5 e 10 cm de altura, respectivamente. Médias de resistência que compartilham a mesma letra não diferem estatisticamente. Foram desconsideradas da análise todas as linhas de cola que romperam completamente antes de seu ensaio ou imediatamente após seu início.

Tabela 5 - Resistências médias ao cisalhamento da linha de cola (MPa) de CPs de 7,5 cm de altura.

Identificação	LC* 1	LC 2	LC 3	LC 4
ERS	9,64 A	9,44 A	5,96 B	9,19 A
EMS	7,36 A	6,78 A	6,45 A	7,64 A
EBS	8,00 A	6,28 AB	7,11 B	7,20 B
ERT	8,43 A	6,35 B	8,01 A	7,72 AB
EMT	6,90 A	4,17 A	5,56 A	4,52 A
EBT	9,10 AB	8,15 B	8,74 B	9,05 A
PRS	5,94 A	4,99 B	4,29 B	4,95 B
PMS	5,75 A	7,04 B	4,87 B	6,98 A
PBS	5,55 A	3,36 B	3,28 B	7,00 A
PRT	8,40 A	5,47 B	6,99 A	8,16 A
PMT	7,29 A	5,74 A	7,49 A	6,81 A
PBT	9,11 A	6,74 C	7,76 AB	6,03 BC

* LC = linha de cola.

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 6 - Resistências médias ao cisalhamento da linha de cola (MPa) de CPs de 10 cm de altura.

Identificação	LC* 1	LC 2	LC 3	LC 4
ERS*	-	-	-	-
EMS	6,68 A	6,12 A	5,99 A	6,32 A
EBS	7,57 AB	7,34 AB	8,11 A	6,66 B
ERT	7,55 A	6,57 B	7,99 A	7,45 A
EMT	7,65 A	7,48 A	7,88 A	6,27 A
EBT	7,58 A	6,13 B	5,69 B	7,04 A
PRS*	-	-	-	-
PMS	6,15 A	5,29 B	5,50 AB	5,34 AB
PBS	6,63 A	5,64 A	6,77 A	6,94 A
PRT	7,71 A	5,81 A	7,46 A	7,02 A
PMT	9,00 A	6,71 A	7,75 A	6,09 A
PBT	6,57 A	4,14 A	5,88 A	6,42 A

*Não foram realizados ensaios em CPs de 10 cm de altura para as combinações ERS e PRS.

Fonte: Elaboração própria.

A partir das Tabelas 5 e 6 foi possível verificar uma grande heterogeneidade entre os resultados. Tal fato se verificou mesmo nos casos onde foram comparados, para uma mesma combinação, resultados médios entre linhas de cola de CPs de 7,5 cm e de 10 cm, não indicando qualquer tendência entre os dados. Ou seja, visando uma possível redução do número de ensaios, a partir de tais resultados, não se pode afirmar que uma ou outra linha não tem necessidade de ser ensaiada em detrimento da outra. Caso fosse notada uma tendência de que as linhas não diferissem entre si, então, seria possível afirmar que o ensaio poderia ser reduzido para um número de linhas de cola inferior ao total.

É importante ressaltar que grande parte da variabilidade entre as resistências médias das linhas de cola entre as combinações deve ser atribuída ao fato de que cada lamela possui diferentes classificações visual e mecânica, além de possuir diferentes densidades aparentes e levando em consideração que a madeira é um material de heterogeneidade intrínseca. Tal heterogeneidade pode acarretar estruturas anatômicas diferentes dentro de uma mesma espécie de madeira, além do fato de que a secagem das lamelas foi feita naturalmente. A secagem natural é de difícil controle, uma vez que não se pode evitar a variação de umidade, temperatura e ventilação, como ocorre na secagem controlada em estufa, de modo que a secagem natural pode causar diferentes respostas na estrutura da madeira, inclusive, em função da posição da lamela nos tabiques. Assim sendo, a heterogeneidade da madeira e do próprio processo de confecção de elementos de MLC pode causar diferentes ancoragens do adesivo, resultando em diferentes desempenhos em cada linha de cola, ainda que dentro de uma mesma amostra.

Na maioria dos casos, a LC 3 apresentou médias de resistência ao cisalhamento inferiores (provavelmente em função da menor qualidade das lamelas mais internas), mas não diferiu estatisticamente de maneira significativa das outras linhas de cola.

Em relação à altura do CP, pode-se observar que os CPs de 7,5 cm de altura (Tabela 5) apresentaram maior variabilidade entre as resistências médias ao cisalhamento das linhas de cola do que os CPs de 10 cm (Tabela 6). Tal variabilidade pode ser decorrente do fato de que os ensaios com CPs de 7,5 cm de altura possuem o dobro de amostras, favorecendo a maior dispersão.

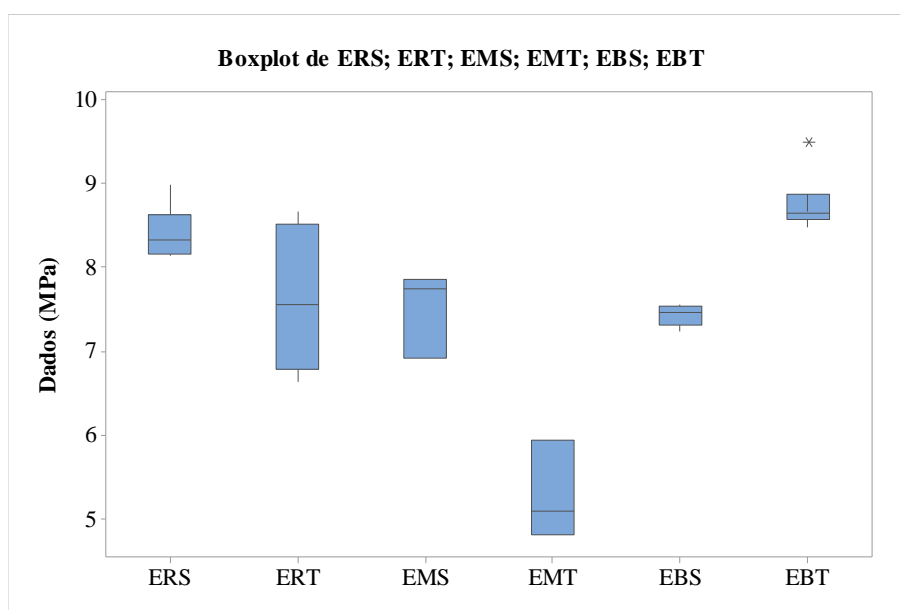
6.2.2 Comparação entre combinações

Todas as combinações apresentaram um P-valor maior que 0,05, de modo a indicar a normalidade dos dados (os gráficos de análise de normalidade desta seção estão localizados nos Apêndice C). As análises desta seção foram realizadas utilizando os CPs de altura 7,5 cm.

- Comparação das combinações com madeira não tratadas e tratadas

A Figura 30 apresenta o boxplot utilizado para comparação entre as combinações que empregaram a madeira de Eucalipto e a Tabela 7 exhibe os p-valores obtidos através do teste t de comparação de médias.

Figura 30 - Boxplot de comparação entre tratamentos para combinações com Eucalipto.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 7 - P-valor para a comparação de combinações com Eucalipto com e sem tratamento.

Combinação	P-valor	Diferem
ERS x ERT	0,076	Não
EMS x EMT	0,016	Sim
EBS x EBT	0,000	Sim

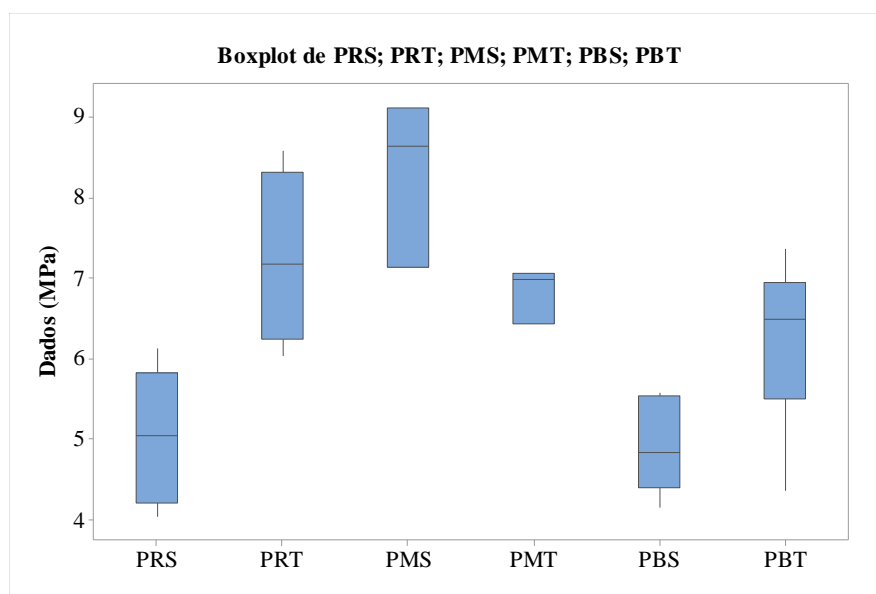
Fonte: Elaboração própria.

Como observado na Tabela 7, ERS e ERT não apresentaram diferença significativa, ainda que o intervalo verificado no boxplot (Figura 30) que o intervalo de resistências fornecido por ERT tenha sido maior que aquele relacionado a ERS, indicando uma maior dispersão dos dados.

EMS apresentou média mais elevada que EMT, estatisticamente. Segundinho *et al.* (2017) também encontraram propriedades inferiores para elementos de MLC produzidos com madeira de Eucalipto tratada e resina poliuretana quando comparadas com a mesma não tratada. Por outro lado, EBT apresentou média mais elevada que EBS.

A Figura 31 apresenta o boxplot para comparação entre combinações utilizando madeira de Pinus tratada e não tratada, acompanhada da Tabela 8, que exibe o P-valor fornecido para cada teste de comparação de médias.

Figura 31 - Boxplot de comparação entre tratamentos para combinações com Pinus.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 8 - P-valores para comparação de combinações com Pinus com e sem tratamento.

Combinação	P-valor	Diferem
PRS x PRT	0,003	Sim
PMS x PMT	0,143	Não
PBS x PBT	0,031	Sim

Fonte: Elaboração própria.

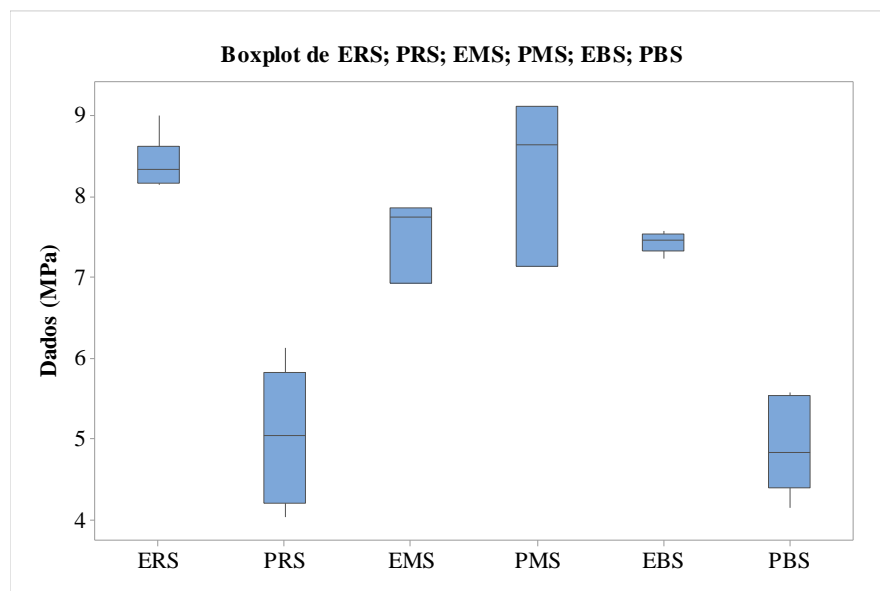
Tanto entre PRS e PRT quanto entre PBS e PBT apresentaram médias estatisticamente diferentes e resultados superiores para a madeira tratada quando comparada com a não tratada. Azambuja (2002), estudando elementos e MLC de madeira de reflorestamento, obteve médias de resistência ao cisalhamento diferentes entre madeiras com e sem tratamento. O autor também alcançou resultados de resistência ao cisalhamento da linha de cola que indicaram que os elementos de MLC com madeira tratada apresentaram médias superiores aos que empregaram madeira não tratada.

Pela Tabela 8, PMS e PMT não apresentaram diferença estatística significativa, ainda que PMS tenha apresentado uma maior dispersão dos dados, conforme visto na Figura 70.

- Comparação entre espécies utilizadas nas combinações

A Figura 32 exibe o boxplot utilizado para comparação entre as espécies dentro das combinações que empregam madeira no estado in natura. A Tabela 9 apresenta os P-valores fornecidos pelo teste de comparação de médias.

Figura 32 - Boxplot combinação entre espécies sem tratamento.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 9 - P-valores para comparação de espécies entre combinações sem tratamento.

Combinação	P-valor	Diferem
ERS x PRS	0,000	Sim
EMS x PMS	0,357	Não
EBS x PBS	0,000	Sim

Fonte: Elaboração própria.

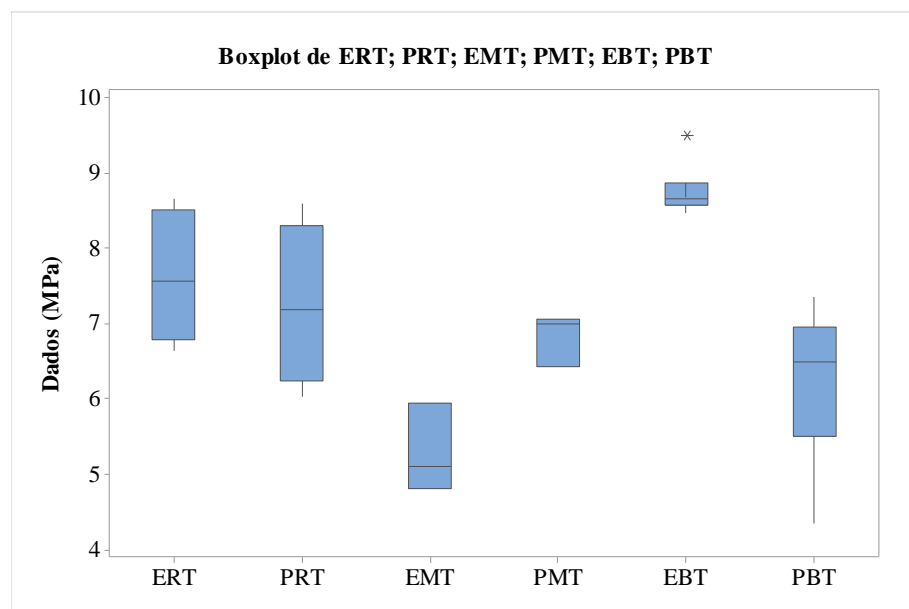
A espécie de Eucalipto in natura apresentou médias de resistência ao cisalhamento da linha de cola superiores ao Pinus, tanto empregando o adesivo resorcinol-formaldeído quanto a resina poliuretana bicomponente, conforme a Figura 32.

EMS e PMS não apresentaram diferença estatística significativa.

Serpa *et. al* (2003) encontraram valores médios de resistência ao cisalhamento da linha de cola significativamente maiores para espécies de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* do que para *Pinus elliottii*.

A Figura 33 exhibe o boxplot empregado para comparação entre as espécies dentro das combinações que empregam madeira tratada. A Tabela 10 apresenta os P-valores fornecidos pelo teste de comparação de médias.

Figura 33 - Boxplot combinação entre espécies tratadas.



Fonte: Autorial própria.

Tabela 10 - P-valores para comparação de espécies entre combinações tratadas.

Combinação	P-valor	Diferem
ERT x PRT	0,519	Não
EMT x PMT	0,029	Sim
EBT x PBT	0,001	Sim

Fonte: Elaboração própria.

As combinações ERT e PRT não apresentam diferença estatística significativa. As resistências médias apresentadas por ambas as combinações foram relativamente elevadas. De acordo com Segundinho *et al.* (2017), o adesivo resorcinol-formaldeído melhores em termos de desempenho na colagem devido à sua alta penetração, mesmo empregando madeira tratada, o que pode ser verificado por meio de análise da interface madeira-adesivo.

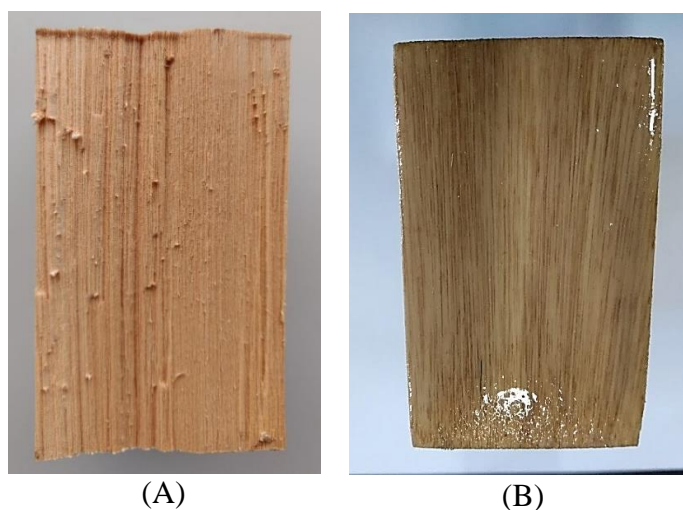
PMT apresentou maiores valores de resistência que EMT, indicando uma maior ancoragem do adesivo na madeira de Pinus neste caso do que na madeira de Eucalipto. Em comparação às médias verificadas na Figura 32 para as PMS e EMS (as mesmas relações espécie-adesivo, porém, sem tratamento), PMT e EMT apresentaram menores resistências ao cisalhamento na linha de cola. Segundinho *et al.* (2017) verificaram a influência do tratamento da madeira com CCA em elementos de MLC que empregaram resina poliuretana à base de mamona e afirmam que os sais presentes na madeira preservada prejudicaram a resistência ao cisalhamento na linha de cola.

EBT apresentou maiores valores de resistência que PBT.

6.2.3 Falha na madeira

O percentual de falha na madeira foi analisado através de quantificação visual. Na Figura 34 (A), um CP da combinação ERS rompeu completamente na madeira (100% de falha na madeira), de modo que não se visualiza a coloração marrom escura do adesivo resorcinol-formaldeído sobre a madeira, resultado que indica uma colagem eficiente. Por outro lado, na Figura 34 (B), o CP representado é da combinação PMS, na qual a resina utilizada (poliuretana monocomponente) é transparente e, por isso, a superfície do CP apresentou o brilho característico da película de resina. Neste último CP, observe que a película brilhante cobre toda superfície da amostra, indicando que a ruptura, neste caso, ocorreu completamente no adesivo (0% de falha na madeira, correspondendo a uma colagem completamente ineficiente).

Figura 34 - Ruptura por cisalhamento da linha de cola: (A) CP com 100% de falha na madeira, combinação ERS; (B) CP com 0% de falha na madeira, combinação PMS.



Fonte: Autoria própria.

O percentual médio de falha na madeira (FM) dos CP para cada combinação é apresentado pela Tabela 11. Percentuais mais elevados indicam uma boa qualidade de colagem, de modo que a linha de cola apresentou resistência ao cisalhamento maior do que a própria madeira.

Tabela 11 - Resultados de percentual médio de falha na madeira (FM).

Combinação	FM* (%)	Combinação	FM (%)
ERS	87,14	ERT	91,00
EMS	91,87	EMT	92,80
EBS	93,57	EBT	89,00
PRS	80,05	PRT	84,90
PMS	83,75	PMT	76,11
PBS	78,26	PBT	79,12

* FM = falha na madeira

Fonte: Elaboração própria.

Pela Tabela 11, pode-se verificar que a maioria das combinações apresentou falha na madeira próxima ou acima de 90%, indicando colagem eficiente segundo a ABNT NBR 7190:1997. Menores percentuais de falha na madeira foram encontrados para combinações que empregaram Pinus em sua composição, de modo que a densidade aparente mais elevada

verificada para esta espécie do que aquela encontrada para a madeira de Eucalipto pode ter prejudicado a perfeita ancoragem do adesivo. Serpa *et al.* (2003) investigaram o fenômeno da falha na madeira para espécies de *Eucalyptus saligna*, *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliottii*. Ainda que tenham sido encontrados valores de falha na madeira elevados para as três espécies (ou seja, todas elas apresentaram boa eficiência de colagem), a madeira de *Pinus elliottii* foi, também, aquela que apresentou o menor dos percentuais de falha na madeira.

Plaster *et al.* (2008) encontraram o valor médio de falha na madeira de 74,41% para MLC de *Eucalyptus sp* e resorcinol-formaldeído.

Calil Neto *et al.* (2016) apresentaram resultados de modo de ruptura com falha majoritária na madeira para elementos de MLC com *Pinus* empregando resina poliuretana e fenol-resorcinol-formaldeído.

Segundinho *et al.* (2017) obteve falha média na madeira de 91,89% para MLC de *Eucalyptus cloeziana* tratada com CCA e adesivo resorcinol-formaldeído e 44,17% para a mesma madeira e resina poliuretana à base de mamona.

Algumas das linhas de cola rompidas das amostras da combinação ERS, combinação na qual fica visualmente mais evidente a diferença entre a coloração da madeira e do adesivo, são exibidas na Figura 35. Na figura, as regiões mais escuras (coloração marrom do adesivo resorcinol-formaldeído) indicam a ruptura na linha de cola e as regiões mais claras indicam a ruptura na madeira de Eucalipto.

Figura 35 - Exemplos de modo de ruptura da combinação ERS.



Fonte: Autoria própria.

Um importante aspecto que pode ter influenciado nos resultados é a gramatura empregada.

Jesus (2000), em estudo com madeiras de Pinus (pressão de colagem de 0,4 MPa) e Eucalipto (pressão de colagem de 0,6 MPa), afirma que o adesivo poliuretano bicomponente à base de mamona, quando empregado à gramatura de 350 g/m² (linha dupla), é adequado ao emprego em estruturas de MLC.

Segundinho *et al.* (2019) aplicaram a gramatura de 300 g/m² (linha dupla) na produção de de MLC de *Corymbia citriodora* com resorcinol-fenol-formaldeído, empregando a pressão de colagem de 1,0 MPa.

Calil Neto *et al.* (2016) utilizaram gramatura de 180 a 200 g/m² (linha dupla) atrelado a pressão de colagem de 1,0 MPa, empregando quatro diferentes espécies de madeira de reflorestamento e três tipos de adesivos.

Dado que a gramatura empregada neste trabalho foi de 240 g/m² para os três adesivos estudados, o consumo de cola pode ter sido insuficiente para alguns dos casos, tendo em vista as recomendações da literatura. No entanto, foi verificado durante a montagem das vigas que

o adesivo escorreu pelas bordas das mesmas em alguns casos, o que pode indicar gramatura ou pressão excessiva.

Além dos parâmetros comentados, Calil Neto (2011) afirma que a espécie e o adesivo são fatores muito sensíveis a variações de umidade, temperatura, tempo e pressão, de modo que é necessário um controle de qualidade minucioso.

Outro fator que pode ter influenciado nos resultados foi a viscosidade dos adesivos, de modo que foi verificado uma maior dificuldade de espalhamento durante a confecção das vigas de MLC com resinas poliuretanas do que com o resorcinol formaldeído.

Bianche *et al.* (2011) afirmam que adesivos de baixa viscosidade proporcionam um melhor espalhamento na madeira devido à sua maior fluidez, sendo assim, maior é a penetração do adesivo e sua absorção pela madeira. Uma vez que as resinas poliuretanas apresentam viscosidade mais alta que o resorcinol-formaldeído, o melhor desempenho do adesivo resorcinol-formaldeído em relação aos poliuretanos em alguns aspectos deste trabalho pode ser justificado em função das viscosidades.

7 CONCLUSÕES

A metodologia proposta pelo projeto de norma ABNT NBR PN 02:126.10-0001-5, baseado no método B do documento EN 14080:2013, foi satisfatória para análise da eficiência de colagem das combinações estudadas.

Os valores médios de delaminação obtidos a partir dos ensaios revelaram que as combinações ERS, EBS e PRS foram as únicas que apresentaram valores dentro do aceitável (menores ou iguais) de 4% pela ABNT NBR PN 02:126.10-0001-5.

A análise das resistências ao cisalhamento das linhas de cola dos CPs demonstrou uma grande heterogeneidade entre os resultados. Tal fato se verificou mesmo nos casos onde foram comparados, para uma mesma combinação, resultados médios entre linhas de cola de CPs de 7,5 cm e de 10 cm, não indicando qualquer tendência entre os dados. Na maioria dos casos, a LC 3 apresentou médias de resistência ao cisalhamento inferiores (devido às classificações visual e mecânica relacionadas às lamelas dessas regiões) mas não diferiu estatisticamente de maneira significativa das outras linhas de cola. A partir da verificação de tais resultados, pode-se afirmar que é necessária a investigação de todas as linhas de cola de um mesmo CP durante o ensaio de resistência ao cisalhamento da linha de cola. Atenção especial deve ser dada às linhas de cola centrais, as quais concentram maiores tensões de cisalhamento combinadas muitas vezes com madeiras de classificações visual e mecânica inferiores.

No que se trata da altura do CP, foi observado que os CPs de 7,5 cm de altura apresentaram maior variabilidade entre as linhas de cola do que os CPs de 10 cm, provavelmente em função do maior número de CPs. Sendo assim, visando a redução do número de ensaios de resistência ao cisalhamento da linha de cola, recomenda-se que o pior caso (o de maior dispersão dos dados e maior diferença entre as linhas de cola) seja investigado em pesquisas do gênero. Vale ressaltar que os resultados podem ser afetados pelo fato de que o CP com 10 cm de altura exige maior força para rompimento da área cisalhante e, conseqüentemente, maiores reforços no dispositivo de ensaio. Assim, uma lamela de mesma espessura que aquela utilizada para os CPs de 7,5 cm deverá sofrer maior rasgamento e esmagamento devido às áreas de cisalhamento maiores.

Em relação ao desempenho das combinações nos ensaios de resistência ao cisalhamento da linha de cola, foram observados alguns pontos:

- Comparando-se a presença ou ausência de tratamento preservante e combinações espécie-adesivo, a presença do CCA influenciou positivamente as combinações com adesivo

bicomponente (EBT e PBT), de modo que maiores resistências ao cisalhamento da linha de cola foram encontradas nas combinações com madeira tratada; para combinações com adesivo monocomponente (EMT e PMT), sua influência na resistência foi negativa (reduzindo a resistência ao cisalhamento da linha de cola); para as combinações com resorcinol-formaldeído, não houve influência significativa do CCA para o Eucalipto (ERT) e para o Pinus houve influência positiva (PRT). Conclui-se que, de modo geral, o tratamento preservante nas espécies estudadas não influenciou totalmente de forma negativa a resistência ao cisalhamento dos elementos de MLC. Ainda assim, vale lembrar que nenhuma das combinações empregando madeira tratada com CCA atendeu ao percentual mínimo de 4% aceitável pela ABNT NBR PN 02:126.10-0001-5.

- Comparando-se as espécies, o Eucalipto apresentou melhor desempenho que o Pinus, de modo geral (nas combinações ERS, EBS e EBT). Não houve diferença significativa entre as combinações com resorcinol-formaldeído com madeira tratada (ou seja, entre ERT e PRT) e poliuretana monocomponente com madeira in natura (entre EMS e PMS). A única ocorrência em que a madeira de Pinus apresentou melhor desempenho na resistência ao cisalhamento da linha de cola foi na combinação PMT, significativamente mais resistente que EMT.

A maioria das combinações apresentou falha na madeira próxima ou superior a 90%, indicando colagem eficiente segundo a ABNT NBR 7190:1997. De modo geral, a madeira de Eucalipto apresentou percentuais de falha na madeira mais elevados que Pinus.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como recomendações para trabalhos futuros, recomenda-se a investigação de diferentes gramaturas para os adesivos estudados, uma vez que não há consenso bem estabelecido na literatura neste sentido. Além disso, recomenda-se que seja estudada em paralelo a pressão adequada à gramatura utilizada, de modo que a gramatura apresente uma boa ancoragem no CP.

Recomenda-se também avaliar a influência da espessura e das direções ortogonais da madeira das lamelas na resistência ao cisalhamento da linha de cola.

Recomenda-se o desenvolvimento de um *software* de análise de imagem capaz de quantificar com maior precisão o percentual de falha na madeira, como alternativa à análise visual, a qual submete os resultados à subjetividade humana.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, A. S. *et al.* Influence of CCA-A preservative on physical-mechanical properties of brazilian tropical woods. **BioResources**, Durham, v. 14, n. 2, p. 3030-3041, 2019.
- ALMEIDA, D. H. *et al.* Madeira laminada colada (MLC) da espécie de Paricá. **Madeira: arquitetura e engenharia**, São Carlos, v. 12, n. 30, p. 71-82, 2012.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D2559**: standard specification for adhesives for structural laminated wood products for use under exterior (wet use) exposure conditions. West Conshohocken: ASTM, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190/97**: projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **CB-02 2º PN revisão ABNT NBR 7190/97**: projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **PN 02:126.10-001-1**: madeiras: critérios de classificação visual e mecânica de peças estruturais de madeira de florestas plantadas. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **PN 02:126.10-0001-5**: madeira laminada colada estrutural: métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
- AZAMBUJA, M. A. **Avaliação do adesivo poliuretano a base de mamona para fabricação de madeira laminada colada (MLC)**. 2002. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.
- BARROS, L. S. **Comparação da rigidez de elementos de MLC a partir de ensaios de flexão estática e técnica de excitação por impulso**. 2019. 73 f. TCC (Graduação em Engenharia Industrial Madeireira) - Universidade Estadual Paulista, Itapeva, 2019.
- BERTOLINI, M. S. **Painéis de resíduos madeireiros e de borracha de pneu associados à espuma poliuretana à base de mamona para aplicação como composições termoacústicas**. 2014. 282 f. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.
- BIANCHE, J. J. *et al.* Cisalhamento na Linha de Cola de Eucalyptus sp. Colado com Diferentes Adesivos e Diferentes Gramaturas. **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 1, p 1 - 9, 2017.
- CALIL NETO, C. **A Madeira Laminada Colada**. Disponível em http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=1473&subject=MLC&title=A%20madeira%20laminada%20colada. Acesso em 09 mai. 2019.
- CALIL NETO, C. **Madeira Laminada Colada (MLC): controle de qualidade em combinações espécie-adesivo-tratamento preservativo**. 2011. 118 f. Dissertação (Mestrado

em Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

CALIL NETO, C. *et al.* Avaliação da resistência ao cisalhamento e à delaminação em madeira laminada colada. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 24, n. 4, p. 989-996, 2014.

CALIL NETO, C. *et al.* Specie – treatment – adhesive combinations for glulam purpose. **Revista de Engenharia Civil IMED**, Passo Fundo, v. 3, n. 2, p.16-23, 2016.

CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. **CSA 0112.9**: evaluation of adhesives for structural wood products (exterior exposure). Mississauga: CSA, 2004.

CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. **CSA 0112.10**: evaluation of adhesives for structural wood products (limited moisture exposure). Mississauga: CSA, 2007.

CARPINTERIA. **Que tipo de estrutura você procura?** Disponível em: <https://carpinteria.com.br/>. Acesso em: 20 jun. 2019.

CAVALHEIRO, R. S. **Madeira Laminada Colada de *Schizolobium amazonicum* Herb. (Paricá)**: combinação adesivo/tratamento preservante. 2014. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

CERCHIARI, A. M. F. **Aprimoramento do poliuretano a base de óleo de mamona na manufatura de Madeira Laminada Colada (MLC) de *Cupressus lusitanica*, *Corymbia maculata* e *Hevea brasiliensis***. 2013. 106 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

CHIPANSKI, E. R. **Proposição para melhoria do desempenho ambiental da indústria de aglomerado do Brasil**. 2006. 193 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

DERIKVAND, M.; PANGH, H. A modified method for shear strength measurement of adhesive bonds in solid wood. **BioResources**, Durham, v. 11, n. 1, p. 354-364, 2016.

DIAS, F. M. **Aplicação de resina poliuretana à base de mamona na fabricação de painéis de madeira aglomerada**. 2005. 178 f. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

DIAS, F. M. **A densidade aparente como estimador de propriedades de resistência e rigidez da madeira**. 2000. 170 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 301**: adhesives, phenolic and aminoplastic, for load-bearing timber structures: classification and performance requirements. Brussels: EN, 2013.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 385**: finger-jointed structural timber: performance requirements and minimum production requirements. Brussels: EN, 2001.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 391**: Glued laminated timber: delamination test of glue lines. Brussels: EN, 2001.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 408**: timber structures: structural timber and glued laminated timber: determination of some physical and mechanical properties. Brussels: EN, 2011.

FIORELLI, J. **Estudo teórico e experimental de vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibra de vidro**. 2005. 108 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

ICIMOTO, F. H. *et. al.* Physical and mechanical properties of Paricá wood species treated with CCB preservative. **International Journal of Materials Engineering**, Rosemead, v. 3, n. 4, p. 82-86, 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura**. Disponível em https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/media/com_mediaibge/arquivos/15f538e9095614fc3204f828b22fa714.pdf. Acesso em: 09 mai. 2019.

JANKOWSKI, I. P.; BARILLARI, C. T.; FREITAS, V. P. Preservação. **Revista da Madeira**, 2003. Disponível em: http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=264&subject=Preserva%C3%A7%C3%A3o&title=Preserva%C3%A7%C3%A3o. Acesso em: 09 maio 2019.

JESUS, J. M. H. **Estudo do adesivo poliuretano à base de mamona em madeira laminada colada (MLC)**. 2000. 125 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

LEPAGE E.S. Química da madeira. *In*: LEPAGE, E.S. **Manual de preservação de madeiras**. São Paulo: IPT, 1986.

LOGSDON, N. B. **Influência da umidade nas propriedades de resistência e rigidez da madeira**. 1998. 200 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

MIOTTO, J. L. **Estruturas mistas de madeira-concreto: avaliação das vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibras de vidro**. 2009. 357 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

MOYA, L. *et. al.* Relación entre parâmetros de producción y propiedades estructurales de madera laminada encolada de *Eucalyptus grandis*. **Maderas: Ciencia y tecnología**, Concepción, v. 21, n. 3, p. 327-340, 2019.

NOGUEIRA, R. S. **Proposta de um método de ensaio para controle de qualidade na produção de elementos estruturais de MLC e de LVL**. 2017. 152 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

OKADA, T. *et. al.* Evaluating the durability of structural glulam bonded with aqueous polymer-isocyanate adhesive by two kinds of accelerated aging treatments. **European Journal of Wood and Wood Products**, München, v. 78, n. 1, p. 1 - 10, 2019.

PÁSCHOA, D. P. **Avaliação da qualidade de colagem de elementos de MLC confeccionados com madeiras de eucalipto e resina fenólica**. 2018. 63 f. TCC (Graduação em Engenharia Industrial Madeireira) - Universidade Estadual Paulista, Itapeva, 2018.

PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de madeira**. 6. ed., Rio de Janeiro. LTC. 2003.

PLASTER, O. B. *et. al.* Comportamento de juntas coladas de madeira serrada de *Eucalyptus sp.* **Cerne**, Lavras, v. 14, n. 3, p. 251-258, 2008.

PRÖLLER, M. *et al.* Influence of processing parameters and wood properties on the edge gluing of green *Eucalyptus grandis* with a one-component PUR adhesive. **European Journal of Wood and Wood Products**, München, v. 76, n. 1, p. 1195 – 1204, 2018.

SANTOS, T. G. **Controle da qualidade de elementos de madeira laminada colada**. 2017. 61 f. TCC (Graduação em Engenharia Industrial Madeireira) - Universidade Estadual Paulista, Itapeva, 2017.

SANTOS, C. M. T.; DEL MENEZZI, C. H. S. Efeito da gramatura sobre a resistência ao cisalhamento da linha de cola de duas madeiras tropicais: Seru (*Allantoma lineata*) e Marupá (*Simarouba amara*). **Floresta**, Curitiba, v. 40, n. 2, p. 345-354, 2010.

SERPA, P. N. *et. al.* Avaliação de algumas propriedades da madeira de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* e *Pinus elliottii*. **Árvore**, Viçosa, v.27, n.5, p.723-733, 2003.

SEGUNDINHO, P. G. A. *et. al.* Eficiência da colagem de madeira tratada de *Eucalyptus cloeziana* F. Muell para produção de madeira laminada colada (MLC). **Matéria**, Rio de Janeiro, v.22, n.2, p. 1 – 13, 2017.

SEGUNDINHO, P. G. A. *et. al.* Comparação entre propriedades físicas e mecânicas de madeiras e madeira laminada colada de *Corymbia citriodora*. **Sci. For.**, Piracicaba, v. 47, n. 123, p. 421-429, 2019.

SEGUNDINHO, P. G. A. *et. al.* Avaliação de vigas de madeira laminada colada de cedrinho (*Erisma uncinatum* Warm.). **Cerne**, Lavras, v. 19, n. 3, p. 441-449, 2013.

ZANGIÁCOMO, A. L. **Emprego de espécies tropicais alternativas na produção de elementos estruturais de madeira laminada colada**. 2003. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

ZENID, G. J. *et al.* **Madeira: uso sustentável na construção civil**. 2 ed. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2009.

ZHANG, J; KAMDEM, D. P. Interaction of Copper-Amine with southern pine: retention and migration. **Wood and Fiber Science**, Pennsylvania, v. 32, n. 3, p. 332 – 339, 2000.