

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS AGROVETERINÁRIAS – CAV**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL**

**IASMIN STRAOBEL DA SILVA**

**VIABILIDADE PARA USO ESTRUTURAL DE VIGAS DE MADEIRA LAMELADA  
COLADA REFORÇADAS COM FIBRA DE VIDRO**

**LAGES**

**2023**

**IASMIN STRAOBEL DA SILVA**

**VIABILIDADE PARA USO ESTRUTURAL DE VIGAS DE MADEIRA LAMELADA  
COLADA REFORÇADAS COM FIBRA DE VIDRO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal do Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Figueiredo Terezo

Coorientador: Prof. Dr. Alexsandro Bayestorff da Cunha

**LAGES**

**2023**

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da  
Biblioteca Universitária Udesc,  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

Silva, Iasmin Straobel

VIABILIDADE PARA USO ESTRUTURAL DE VIGAS DE MADEIRA LAMELADA COLADA REFORÇADAS COM FIBRA DE VIDRO / Iasmin Straobel Silva. -- 2023.

74 p.

Orientador: Rodrigo Figueiredo Terezo

Coorientador: Alexsandro Bayestorff da Cunha

Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Lages, 2023.

1. Madeira lamelada colada. 2. Reforço estrutural. 3. Pinus taeda. 4. Fibra de vidro. 5. Polímero reforçado com fibras (PRF). I. Terezo, Rodrigo Figueiredo . II. Cunha, Alexsandro Bayestorff da . III. Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. IV. Título.

**IASMIN STRAOBEL DA SILVA**

**VIABILIDADE PARA USO ESTRUTURAL DE VIGAS DE MADEIRA LAMINADA  
COLADA REFORÇADAS COM FIBRA DE VIDRO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal do Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Florestal.

**BANCA EXAMINADORA**

Orientador:

---

Prof. Dr. Rodrigo Figueiredo Terezo  
Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC.

Membro interno:

---

Prof. Dra. Polliana D'Angelo Rios  
Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC.

Membro externo:

---

Prof. Dr. Tiago Morkis Siqueira  
Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.

Membro Suplente:

---

Prof. Dr. Márcio Carlos Navroski  
Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC.

Lages, 08 de Novembro de 2023.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus, por me proporcionar força e determinação ao longo desta jornada acadêmica.

À Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, minha gratidão por oferecerem um ambiente de aprendizado e pesquisa excepcional, que enriqueceu minha formação.

Meu orientador, Dr. Rodrigo Figueiredo Terezo, merece uma menção especial e meu mais profundo agradecimento. Sua orientação, apoio incansável e vasto conhecimento foram fundamentais para o sucesso deste trabalho.

Aos demais professores que contribuíram para a minha formação ao longo desta jornada. Ao meu coorientador, Alexsandro Bayestorff da Cunha, agradeço por sua valiosa colaboração e orientação.

Minha sincera gratidão à empresa DelRei, parceira neste estudo. Agradeço ao Marcelo Risso, proprietário, por investir seu tempo, conhecimento e recursos em prol do sucesso desta pesquisa. Seu generoso apoio e comprometimento refletem uma firme convicção no valor do progresso do conhecimento e da inovação.

Agradeço também à empresa em que trabalho, Vossko do Brasil. Aos meus colegas de setor e ao gerente Nino Marcel Broecker, minha gratidão pela compreensão, apoio e flexibilidade que tornaram possível conciliar meu trabalho e estudos.

Aos meus pais, Cleusa Straobel e Antônio Carlos Mendes, meu eterno agradecimento por seu amor incondicional, apoio emocional e incentivo constante ao longo de toda a minha trajetória acadêmica.

Por fim, agradeço aos meus colegas de laboratório: Jonatas, Isac e Gustavo, pelo apoio inestimável que me ofereceram durante inúmeros dias, ajudando nos testes e tornando esta jornada acadêmica mais suave e produtiva.

A todos vocês, meu sincero agradecimento por terem sido parte essencial desta conquista. Suas contribuições e apoio foram fundamentais para o sucesso desta dissertação.

## RESUMO

A madeira desempenha papel crucial na construção civil; no entanto, há necessidade de melhorias para que elementos estruturais atendam demandas impulsionadas pelo avanço da sociedade, tornando-se mais exigentes. É crucial o desenvolvimento de técnicas industriais conferindo a elementos estruturais resistência a cargas elevadas, permitindo vencer vãos mais extensos e tornar estruturas mais esbeltas. Perante esta realidade, apresenta-se a técnica da Madeira Lamelada Colada (MLC). O uso da MLC na construção permite que peças de madeira com menores dimensões e pequenos defeitos possam ser utilizadas como solução estrutural, unidas por emendas longitudinais, como a emenda por entalhes múltiplos *finger joints* - esta técnica pode ser aprimorada com a adição de reforços em fibra. A fibra é adicionada para desempenhar o mesmo papel que a armadura de aço no concreto armado: tornar peças mais resistentes a choques, tração e flexão, aumentando resistência mecânica e rigidez. Este trabalho buscou analisar e comparar o desempenho estrutural de vigas em madeira de *Pinus taeda* de mesmo lote, estas feitas de 3 formas: i) madeira maciça para caracterização da matéria prima; ii) MLC confeccionado pelo método convencional; iii) MLC com reforços realizados em tecido bidirecional de fibra de vidro, estes aplicados somente sobre os *finger joints*. As vigas foram submetidas aos ensaios de Flexão Estática, tração paralela às fibras, cisalhamento e densidade. Análises se deram empregando-se os testes de Tukey com 95% de confiabilidade. A resistência do MLC, quando comparada à da madeira maciça, apresentou incremento de 50,17% nos testes de flexão estática, aumento de 61,9% na rigidez e acréscimo de 85,71% na resistência ao cisalhamento do MLC em relação à madeira maciça. Dada a superioridade demonstrada pelo MLC em relação à madeira maciça, ressaltando o potencial de aprimoramento por métodos industriais, os resultados do MLC reforçado revelam perspectivas ainda mais promissoras. Com o reforço em fibra de vidro bidirecional, constatou-se um aumento de 60,25% na resistência à tração paralela às fibras, além de uma melhoria de 45,24% na resistência ao cisalhamento quando comparado ao MLC convencional. Esses dados reforçam a viabilidade e eficácia do aprimoramento por meio de técnicas industriais no contexto do MLC.

**Palavras chave:** Madeira lamelada colada; *Pinus taeda*; Fibra de vidro; Reforço estrutural; Polímero reforçado com fibras (PRF);

## ABSTRACT

Wood plays a pivotal role in construction; however, enhancements are needed for structural elements to meet the demands driven by societal advancements, becoming more stringent. The development of industrial techniques to provide Glued Laminated Timber (Glulam) with resistance to high loads, enabling the spanning of larger spaces and creating slender structures, is crucial. In this context, the technique of Glulam is introduced. The use of Glulam in construction allows smaller and slightly defective wooden pieces to be employed as a structural solution, joined by longitudinal joints such as multiple finger joint notches - this technique can be enhanced with the addition of fiber reinforcements. The fiber is added to perform the same role as steel reinforcement in reinforced concrete: to make components more resistant to shocks, tension, and flexion, increasing mechanical strength and rigidity. This study aimed to analyze and compare the structural performance of beams made of *Pinus taeda* wood from the same batch, crafted in three forms: i) solid wood for raw material characterization; ii) Glulam produced by the conventional method; iii) Glulam with reinforcements made of bidirectional fiberglass fabric, applied only on the finger joints. The beams underwent tests for Static Bending, tension parallel to the fibers, shear, and density. Analyses were conducted using Tukey tests with 95% reliability. The strength of Glulam, when compared to solid wood, showed an increase of 50.17% in static bending tests, a 61.9% increase in stiffness, and an 85.71% increase in shear strength. Given the demonstrated superiority of Glulam over solid wood, emphasizing the potential for improvement through industrial methods, the results of reinforced Glulam reveal even more promising prospects. With bidirectional fiberglass reinforcement, there was a 60.25% increase in tension strength parallel to the fibers, along with a 45.24% improvement in shear strength compared to conventional Glulam. These data reinforce the feasibility and effectiveness of enhancement through industrial techniques in the context of Glulam.

**Keywords:** Glued laminated timber (Glulam); *Pinus taeda*; Fiberglass; Structural reinforcement; Fiber-reinforced polymer (FRP).

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Crescimento do PIB da cadeia florestal de 2010 a 2021.....	16
Figura 2. Evolução das emendas.....	20
Figura 3. Geometria de Finger Joints.....	20
Figura 4. Classificação visual das classes para Pinus spp.....	23
Figura 5. Fluxograma de confecção dos corpos de prova.....	29
Figura 6– Geometria Emenda por entalhes múltiplos utilizada pela empresa.....	31
Figura 7. Equipamento que aplica adesivo, ajustado segundo a gramatura.....	33
Figura 8. Lamela logo após a aplicação do adesivo.....	33
Figura 9. Lamelas sendo posicionadas para prensagem.....	34
Figura 10. Grupo de vigas em prensagem.....	35
Figura 11. Vigas separadas por plástico stretch.....	35
Figura 12. Tecido de Fibra de Vidro sendo aplicado sobre finger joint.....	37
Figura 13. Esquema de confecção dos tratamentos.....	38
Figura 14. Vista lateral viga com reforço em fibra.....	39
Figura 15. Organograma dos testes.....	40
Figura 16. Corpo de prova à 4 pontos.....	42
Figura 17. Viga de MLC durante a realização do teste.....	43
Figura 18. Corpos de prova de flexão à 3 pontos segundo a NBR-7190(1997).....	44
Figura 19. Corpos de prova de tração paralela às fibras.....	45
Figura 20. Esquema da retirada de corpos de prova de tração paralela às fibras....	45
Figura 21. Marcação para retirada dos corpos de prova.....	46
Figura 22. Corpo de prova de tração em máquina de ensaio.....	46
Figura 23. Corpo de prova de cisalhamento segundo a NF B 5-32.....	47
Figura 24. Corpo de prova de cisalhamento segundo a NF B 5-32.....	48
Figura 25. Corpo de prova de cisalhamento na máquina de ensaio.....	48
Figura 26. Corpo de prova de densidade segundo a NBR-7190(1997). ....	49
Figura 27. Corpo de prova de densidade sendo pesado em balança de precisão....	50
Figura 28. Desempenho do MOR de Flexão Estática.....	52
Figura 29. Desempenho da Rigidez na flexão estática.....	55
Figura 30. Resultados médios obtidos de resistência à tração paralela às fibras.....	58
Figura 31. Resultados resistência ao cisalhamento.....	61

Figura 32. Distribuição dos resultados de resistência ao cisalhamento .....	63
Figura 33. Densidade da madeira Pinus taeda .....	64

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Pressão de colagem das ligações de continuidade de lamelas. ....25

Tabela 4. Propriedades físico-mecânicas do P. taeda segundo a NBR-7190(1997).59

## LISTA ABREVIATURAS E SIGLAS

CPs – Corpos de prova;

DIC – Delineamento Inteiramente Casualizado;

EPI – Emulsão polimérica de isocianato – adesivo;

FGV IBRE - Fundação Getúlio Vargas Instituto Brasileiro de Economia;

IBA - Instituto Brasileiro de Árvores;

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística;

MLC – Madeira Laminada Colada;

MOE – Módulo de Elasticidade;

MOR – Módulo de Ruptura (resistência máxima da madeira à flexão);

MSR – Teste “Machine Stress Rate” - Máquina de Classificação por Tensão;

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora;

NF – Norma Francesa;

PIB - Produto Interno Bruto;

PRF – Polímero Reforçado com Fibras;

SiO<sub>2</sub> – Dióxido de silício (sílica);

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>14</b>
2.1 GERAL.....	14
2.2 ESPECÍFICOS.....	15
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>15</b>
3.1 A MADEIRA COMO MATERIAL ESTRUTURAL .....	15
3.2 A MADEIRA LAMELADA COLADA .....	17
3.2.1 Finger Joints – Emenda por Entalhes Múltiplos.....	19
3.3 ASPECTOS IMPORTANTES NA FABRICAÇÃO DE MLC.....	21
3.3.1 Classificação Visual das Lamelas.....	22
3.3.2 Classificação Mecânica das Lamelas .....	24
3.4 ADESIVOS E PRESSÃO DE COLAGEM .....	24
3.5 REFORÇOS COM FIBRAS .....	25
3.6 <i>Pinus taeda</i> .....	27
<b>4 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>28</b>
4.1 MATERIAL.....	28
4.2 CORPOS DE PROVA EM MLC.....	29
4.2.1 Preparação das Tábuas.....	30
4.2.2 Finger Joints .....	31
4.2.3 Colagem das Lamelas .....	32
4.3 CORPOS DE PROVA EM MADEIRA MACIÇA .....	39
4.4 ENSAIOS DE AVALIAÇÃO.....	39
4.4.1 Flexão estática.....	41
4.4.2 Tração paralela às fibras .....	44
4.4.3 Cisalhamento .....	47
4.4.4 Densidade.....	49

4.5 TRATAMENTO ESTATÍSTICO.....	51
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>51</b>
5.1 FLEXÃO ESTÁTICA .....	51
5.1.1 Resistência da madeira a flexão – módulo de ruptura .....	51
5.1.2 Rigidez – módulo de elasticidade .....	55
5.2 TRAÇÃO PARALELA ÀS FIBRAS.....	58
5.2.1 Resistência à tração paralela às fibras .....	58
5.3 CISALHAMENTO .....	61
5.3 DENSIDADE .....	63
<b>6 CONCLUSÕES .....</b>	<b>65</b>
<b>7 RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>66</b>
<b>8 BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>68</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A madeira é um dos materiais mais antigos usados pela humanidade e continua sendo um dos mais versáteis. Ela desempenha um papel crucial em uma variedade de aplicações, desde situações temporárias, como andaimes e tapumes de obras, até aplicações permanentes, como esquadrias, divisórias, pisos, móveis e, sobretudo, em estruturas.

Apesar de suas qualidades, a madeira no Brasil muitas vezes é considerada um material de baixo valor. Mattos, Silva e Magalhães (2004, p. 9) apontam que o setor florestal madeireiro tem o potencial de agregar mais valor, especialmente quando se trata de madeira de reflorestamento.

Nesse contexto, Furtado e Terezo (2014, p. 118) destacam a Madeira Laminada Colada – MLC como uma alternativa para criar produtos de maior valor agregado. A MLC envolve a reconstituição de lâminas de madeira em peças com dimensões iniciais reduzidas, unindo-as por colagem com as fibras paralelas entre si, para obtenção de peça final de dimensão estabelecida em projeto.

Glišović et al. (2015, p. 868), destaca que a MLC reduz os defeitos naturais da madeira maciça, distribuindo-os ao longo do elemento estrutural ou eliminando-os quando excedem os requisitos normativos. Isso a torna uma alternativa superior à madeira maciça, permitindo a cobertura de vãos extensos e suporte a cargas extremas.

A aplicação da MLC na construção civil ganhou destaque devido à busca por edificações sustentáveis, seu baixo consumo de energia, isolamento térmico, elétrico e acústico eficazes, bem como a facilidade de trabalhar com o material. A indústria da madeira processada mecanicamente desempenha um papel crucial na economia, gerando produtos, divisas e empregos, além de promover a educação ambiental e a pesquisa.

No entanto, é importante ressaltar que, apesar das vantagens da MLC, ainda existem desafios a serem superados no seu uso em estruturas de madeira.

Conforme destacado por Zhang et al. (2023, p. 810), as vigas de madeira são propensas a falhas por tração no comportamento à flexão, devido ao módulo de elasticidade relativamente baixo da madeira. Para abordar esse problema, pesquisadores têm estudado o reforço de vigas de madeira, incluindo a modificação

química da madeira e o uso de materiais de reforço físico, como barras de aço incorporadas, chapas de aço coladas e ligação de materiais de reforço compostos. Pesquisa de Zhang et al. (2023, p. 810), indica que o aprimoramento físico tem um impacto significativo na melhoria da capacidade de carga das vigas de MLC, incluindo a resistência à flexão e à rigidez.

Fiorelli e Dias (2006, p. 263) destacam o uso de compósitos de fibra de vidro, conhecido como polímero reforçado com fibras (PRF), como uma solução de aprimoramento físico adotada nos Estados Unidos e na Europa. Esses materiais são amplamente utilizados devido à sua alta resistência à tração (Zhang et al., 2023, p. 811).

De acordo com o autor Bertolino (2015, p. 7), a necessidade de restaurar as propriedades de rigidez e resistência ou reforçar estruturas na construção civil, buscando sistemas mais eficientes, redução de custos, peso e impacto ambiental, torna a utilização de sistemas compósitos de alto desempenho com materiais sintéticos uma opção interessante.

Nesse contexto, este trabalho apresenta uma avaliação experimental de vigas de MLC de *Pinus taeda* em três condições: sem reforço, reforçadas com fibra de vidro em diferentes tratamentos, e vigas de madeira maciça (caracterização da madeira como matéria-prima).

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 GERAL**

Realizar uma análise e comparação do desempenho estrutural de vigas MLC com reforço de tecidos bidirecionais de fibras de vidro aplicados sobre emendas por entalhes múltiplos em relação a vigas MLC convencionais e à madeira maciça, com o propósito de avaliar sua resistência e investigar o desempenho das emendas finger joint.

## 2.2 ESPECÍFICOS

Destaca-se, visando aprofundar a análise do desempenho estrutural das vigas, os seguintes objetivos específicos:

- Mensurar o ganho de resistência mecânica de MLC reforçadas com fibra de vidro em relação ao resultado de outros autores;
- Estimar o ganho de resistência mecânica proveniente da aplicação de fibras de vidro como reforço nas vigas, em comparação ao MLC convencional sem reforço.
- Estimar o ganho de resistência mecânica proveniente da aplicação de fibras de vidro como reforço nas vigas, em comparação a madeira maciça.
- Estimar ganho de resistência entre material com e sem presença de emenda “finger joints” – MLC x madeira maciça.
- Verificar a correlação entre maior quantidade de camadas de reforço em fibra de vidro, com melhor desempenho mecânico.

## 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, são reunidas as informações, normativas, e estudos relevantes que fornecem suporte e embasamento não apenas para os testes realizados, a confecção dos corpos de prova e a descrição do método aplicado na sua fabricação, mas também para os resultados obtidos e as discussões subsequentes.

### 3.1 A MADEIRA COMO MATERIAL ESTRUTURAL

A IBA (2022, p. 18) revelou que, na última década, a cadeia produtiva florestal superou significativamente o desempenho do PIB brasileiro, em termos reais. Enquanto o PIB do país registrou um crescimento de 7,4% no período de 2010 a 2021, o valor adicionado à economia pela cadeia florestal aumentou substancialmente, com um incremento de 20,5% no mesmo período.

Figura 1. Crescimento do PIB da cadeia florestal de 2010 a 2021.



Elaboração: FGV IBRE. Fonte: IBGE apud IBA (2022).

A importância da madeira na economia se tornou cada vez mais evidente devido à crescente conscientização sobre os impactos ambientais do uso contínuo de materiais como concreto e aço na indústria da construção. A madeira, com sua estética atraente e características vantajosas, tem emergido como uma alternativa desejável devido à sua relação favorável entre força e peso, facilidade de construção, integridade estrutural e custo-benefício.

Segundo Fusco (1989, apud Fagundes, 2003, p. 28), a madeira pode apresentar aproximadamente 33% do peso específico do concreto e 12% do peso do aço. É assim considerada boa opção para estruturas de grandes envergaduras, onde o peso próprio é elevado.

Pode-se ainda, citar outras vantagens da madeira enquanto material estrutural, como a sua baixa condutibilidade térmica e acústica, a facilidade na substituição de peças da estrutura, é um material ideal para utilização em meio corrosivo, (se bem aplicado não apresenta fácil deterioração), apresenta alta resistência mecânica quando em presença de fogo.

Além de seus benefícios de aplicação e econômicos, o uso crescente da madeira na construção também tem impactos ambientais positivos. A madeira é uma matéria-prima renovável, contribuindo para a redução da pressão sobre os recursos naturais não renováveis. A produção de madeira de forma sustentável envolve práticas de manejo responsável das florestas, promovendo a conservação da biodiversidade e a captura de carbono, com estudos mostrando que o uso da madeira pode reduzir significativamente também as emissões de carbono (em 14% a 31%) em comparação com outros materiais (Oliver et al. 2014, p. 262). O uso de madeira na construção pode, assim, auxiliar na mitigação das mudanças climáticas.

Essa crescente atenção dos investidores e das partes interessadas em questões ambientais, tem estimulado o investimento em pesquisas e inovações relacionadas à utilização sustentável da madeira na construção.

Como resultado, uso da madeira engenheirada (processada industrialmente), vem ganhando popularidade e participação no mercado global, principalmente quando se trata do emprego de madeiras provenientes de florestas plantadas.

De acordo com o relatório anual IBA (2022, p. 24), entre os produtos florestais com maior alta nas comercializações, estão os pisos laminados e compensados de madeira. Estes, são exemplos de produtos que resultam da aplicação de tecnologia e engenharia na transformação da madeira, oferecendo produtos com vantagens em termos de durabilidade, estabilidade, controle de qualidade e aparência em comparação com a madeira maciça.

O evidente crescimento do mercado de produtos de alto valor agregado indica que, nos próximos anos, outros produtos de madeira engenheirada também têm potencial para expandir sua presença, como é o caso da Madeira Lamelada Colada.

A desvantagem da alta variabilidade e baixa resistência da madeira serrada pode ser reduzida em produtos como a Madeira Lamelada Colada. Nas últimas décadas, o MLC tornou-se uma alternativa interessante para estruturas portantes na engenharia civil (André, A.; Johnsson, H. 2010, p. 827). A versatilidade da MLC com respeito as dimensões e formatos dos elementos estruturais e a durabilidade proporcionada pelos tratamentos químicos, vem ampliando sua difusão em diversos países.

### 3.2 A MADEIRA LAMELADA COLADA

A técnica MLC, teve seu começo no século passado, na Alemanha, sendo Otto Karl Frederich Hettzer, o detentor da primeira patente desta técnica construtiva. Desde então, a técnica passou a ser utilizada por diversos países europeus, sendo chamado em primeiro momento de “Estruturas Hettzer” (Fiorelli, 2005, p. 16).

A aplicações da MLC se davam em maior parte, para sistemas estruturais de interiores. Com o desenvolvimento da tecnologia e surgimento dos adesivos a prova d'água, a MLC passou então a ser usada em estruturas expostas a fatores ambientais. Este fato passa a permitir a utilização da MLC na construção dos mais variados tipos de estruturas.

O nome MLC se dá devido aos processos empregados na confecção dos elementos: produto engenheirado composto basicamente por madeira serrada – lamelas, dispostas paralelamente ao eixo da peça e unidas por adesivos resistentes à umidade (Iwakiri et al., 2013, p. 412).

Este processo de fabricação é notavelmente vantajoso, porque as árvores que anteriormente eram inutilizáveis como materiais de construção devido ao seu pequeno tamanho e/ou baixas propriedades mecânicas podem ser efetivamente utilizadas em uma seção lamelar.

As lamelas de comprimentos elevados são obtidas através de emendas longitudinais das tábuas, estas podem ser coladas face a face. A técnica mais utilizada é através das emendas por entalhes múltiplos ou finger joints. Esse movimento em direção a produtos de madeira engenheirada, otimiza o uso da madeira, possibilitando a quase total utilização de matéria-prima em sua fabricação, como apontado por Calil Neto (2011, p. 15).

O enfraquecimento gerado em peças de madeira maciça, devido aos defeitos naturais da madeira, é um dos principais fatores que levam ao desenvolvimento de produtos à base de lamelas em madeira. O sistema MLC reduz essa influência dos defeitos da madeira maciça, como nós, rachaduras e os lenhos de tração/compressão, dispersando-os ao longo do elemento estrutural, ou eliminando-os, quando suas proporções ultrapassam os requisitos estabelecidos pela norma, assegurando um produto final com propriedades mecânicas mais uniformes e com dimensões teoricamente ilimitadas (Glišović et al., 2015, p. 868).

A MLC tem seus usos mais frequentes em estruturas de cobertura, elementos estruturais principais para pontes, torres de transmissão, edifícios, embarcações, banzos de escadas e corrimão, equipamentos decorativos planos ou em relevos, esquadrias e móveis. (Zangiácomo, 2003, p. 4).

A capacidade de estruturas em MLC de cobrir grandes vãos e de suportar elevadas cargas proporciona uma melhoria significativa sobre a madeira serrada. Embora a sua resistência à flexão, muitas vezes, continua limitada pela presença das emendas por entalhes múltiplos (finger joints) nas zonas de concentração de tensões (Glišović et al., 2015, p. 868).

Com o objetivo de aprimorar as propriedades mecânicas de resistência e elasticidade de vigas de MLC, suprimindo a concentração de tensões causadas pelas emendas, estudos passaram a direcionar sua atenção para a associação da madeira

a outros materiais. Dentre os materiais estudados que mostram um resultado positivo, destacam-se os Polímeros Reforçados com Fibras (PRF), que estão proporcionando incremento nas propriedades mecânicas das estruturas em MLC.

Aplicações recentes mostraram a eficácia de compósitos de polímero reforçado com fibra (PRF) em melhorar o desempenho estrutural de vigas de MLC, com referência particular em sua resistência à flexão e ao cisalhamento (Fossetti, M. Minafò, G. Papia, M. 2015, p. 54).

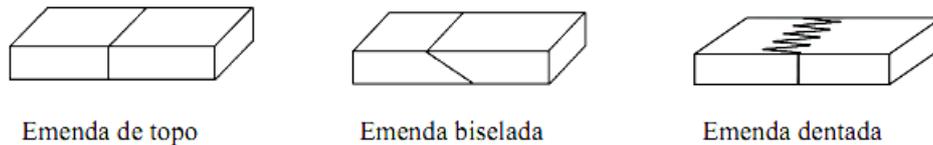
### **3.2.1 Finger Joints – Emenda por Entalhes Múltiplos**

As limitações em dimensões transversais e longitudinais máximas devido aos tamanhos dos troncos disponíveis e defeitos naturais das árvores, estão sendo superadas pelo relativamente recente desenvolvimento de produtos de madeira composta. Emendas e uniões aliadas a técnicas de laminação permitiram a fabricação de elementos de madeiras de alta qualidade em qualquer formato e tamanho, sendo restringido apenas pelos limites fabris e de transporte (Porteous et al., 2007, p. 1).

A continuidade de uma peça fabricada de MLC deve ser assegurada pela união longitudinal entre as lâminas, ou seja, a união no mesmo eixo da peça. A união deve ser confeccionada pela usinagem de diversos entalhes nas extremidades das tábuas, de modo a formar um encaixe macho/fêmea. (Azambuja et al., 2004, p. 4). As emendas longitudinais permitem que nós, rachaduras, empenamentos e outras imperfeições da madeira possam ser cortadas das lamelas, até que se atinja nível admissível de defeitos para que o elemento possa ser caracterizado como de uso estrutural.

Segundo Azambuja (2002, p. 3), 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 maior dificuldade de execução) e as dentadas/entalhes múltiplos ou finger-joints, de resistência mais uniforme que as outras emendas e de alta eficiência para produção de MLC. Tal emenda, quando bem aplicada, pode obter cerca de 80% ou mais da resistência da madeira maciça.

*Figura 2. Evolução das emendas.*



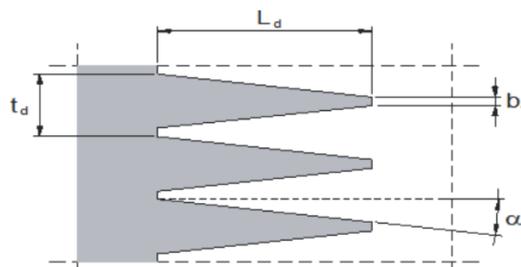
Fonte: FIORELLI (2005)

Mesmo em excelentes condições de fabricação, a força de uma emenda será menor do que a da madeira maciça. Para Lesko (2015, p. 400), é fato que emendas são os locais mais suscetíveis a falhas na estrutura, pois, além de fraquezas induzidas durante a montagem ou por conta dos entalhes, os carregamentos estáticos, dinâmicos e a deformação dos fixadores ou a secagem da madeira, também influenciam estes locais.

Visando garantir a resistência das emendas, devem ser levados em conta parâmetros como a geometria, a pressão de colagem, o tempo de cura do adesivo, o tipo do adesivo, a densidade da madeira e o teor de umidade (Ajdinaj e Habipi, 2013, p. 1973). A utilização dos adesivos nas emendas de continuidade para a confecção das peças do MLC deverão necessariamente ser estruturais e apresentar qualidades compatíveis de acordo com as condições de utilização, durante toda sua vida útil. Os usos dos adesivos bem como as quantidades empregadas nos elementos estruturais deverão seguir as recomendações dos fabricantes.

Sendo a geometria da ligação um dos parâmetros mais importantes, este é determinante quanto à classificação - destinada ao uso estrutural ou não. Os parâmetros para essa determinação de qualidade são regidos por normas como a NBR-7190(2022). Nesta, elementos para uso estrutural tem as seguintes características geométricas definidas:

*Figura 3. Geometria de Finger Joints*



Legenda:  $L_d$ = comprimento dos dentes;  $b_d$ = espessura da extremidade dos dentes;  $t_d$ = largura da base dos dentes;  $\alpha_d$ = inclinação dos flancos dos dentes. Fonte: NBR-7190(2022).

As dimensões exatas utilizadas devem ser escolhidas de acordo com a aparelhagem disponível para corte da emenda. Estabelece-se entretanto na NBR-7190(2022), intervalos de valores que devem ser seguidos:  $b_d$  deve ser de até 5% em relação a  $L_d$ , tendo de inclinação  $\alpha_d$  valor compreendido entre  $5^\circ$  e  $7^\circ$ . O grau de enfraquecimento gerado pela presença dos finger joints não pode exceder 20% em relação a madeira sem emendas.

Verifica-se também na NBR-7190(2022), que em determinadas áreas do elemento estrutural, os esforços atuantes são praticamente nulos, por exemplo, a região da linha neutra de uma viga a ser submetida ao esforço de flexão simples. Neste caso, as distâncias recomendadas são de 50cm entre finger joints que compõem a mesma lamela. Em áreas com maior requisição de resistência, como nas lamelas externas, determina-se distância mínima de 80cm entre finger joints que compõem a mesma lamela. Entre finger joints de lamelas distintas, fica determinado 20cm como distância mínima.

### 3.3 ASPECTOS IMPORTANTES NA FABRICAÇÃO DE MLC

Diversos fatores, além das emendas, influenciam diretamente nas características mecânicas do elemento estrutural. A massa específica da madeira e a densidade são fatores determinantes na resistência da MLC, além da ausência de defeitos naturais da madeira.

Fiorelli (2005, p. 20) afirma que, madeira com densidade superior a  $0,75\text{g/m}^3$ , apresentam problemas para a colagem devido a uma baixa penetração do adesivo. A NBR-7190(2022), traz como valores de referência os compreendidos entre  $0,40\text{ g/cm}^3$  e  $0,75\text{ g/cm}^3$ . Desta forma, a técnica da MLC teve que se adaptar às espécies disponíveis, visto que as indústrias produtoras se localizam, sobretudo, no Sul e Sudeste, onde as áreas de reflorestamento são predominantemente de espécies exóticas, como dos gêneros *Pinus* e *Eucalyptus* (Bourscheid, 2017, p. 23).

Por possuir densidade aproximada de  $0.50\text{g/m}^3$ , a madeira *Pinus taeda*, por exemplo, é altamente indicada para o uso em MLC.

Segundo Szücs (1992, apud Cunha e Matos, 2011, p. 99), a secagem das tábuas utilizadas também é fator determinante para se conseguir um melhor efeito na etapa da colagem. É preciso que estas tábuas se encontrem com um teor de umidade entre 7% e 14% em ambientes climatizados, e entre 12% e 16% em ambientes não

climatizados. O autor afirma ainda que, é importante que não haja uma diferença maior que 5% entre o teor de umidade das tábuas empregadas na estrutura, por exemplo, uma tábua com 10% e outra com 15%.

A presença de defeitos naturais da madeira também afeta diretamente na resistência do elemento. A ruptura de uma viga de MLC, por exemplo, geralmente se origina nas lamelas tracionadas (externas), principalmente, quando essas lamelas apresentam algum tipo de defeito, (nós, fibras inclinadas em relação ao eixo da peça, etc). A partir deste ponto, a ruptura se propaga pela viga, normalmente, por pontos com emendas, conduzindo-a ao colapso. Neste sentido, antes da preparação das lamelas de madeira, deve-se realizar uma classificação do material para eliminação dos defeitos e para o emprego das melhores peças nas zonas de maior solicitação. (Terezo, 2010, p. 35).

Em quase toda literatura pesquisada, os autores lembram que, para um bom desempenho das vigas MLC, são necessárias classificação visual e a classificação mecânica das lamelas. Esta classificação permite que lamelas de melhor qualidade sejam posicionadas nas regiões onde haja as maiores tensões, e as de qualidade inferior nas regiões sujeitas a menores tensões (Terezo, 2010, p. 38).

Já a classificação mecânica, consiste na determinação do módulo de elasticidade longitudinal das lamelas ( $E_0$ ), utilizando-se de meio não destrutivo para a obtenção destes dados. Entre estes métodos não destrutivos utilizados, destacam-se flexão estática, MSR, método de vibração transversal e “stress-wave”.

### **3.3.1 Classificação Visual das Lamelas**

A classificação visual é baseada na premissa de que as propriedades mecânicas de uma peça de madeira diferem das propriedades mecânicas da madeira isenta de defeitos devido às características de crescimento, e que tais características podem ser vistas e julgadas pelo olho humano. Com o auxílio de regras de classificação, as características de crescimento são usadas para selecionar a madeira em classes de qualidade (Carreira, 2003, p. 160).

A classificação visual consiste na inspeção visual das quatro faces e da extremidade de cada peça. Deve-se examinar todo o comprimento das peças e avaliar a localização e a natureza dos nós e outros defeitos presentes nas superfícies das mesmas (Fiorelli, 2005, p. 21).

Para os efeitos da NBR-7190(2022, p. 4) anexo 2, são considerados defeitos na madeira: presença de medula, nós, inclinação excessiva das fibras, fissuras passantes e não passantes, distorções dimensionais (encurvamento, arqueamento, encanoamento, torcimento e esmoado), ataques biológicos, danos mecânicos ou bolsas de resina.

A classificação das lamelas de uso estrutural se inicia pela classificação visual, podendo esta ser realizada a olho nu ou com o auxílio de instrumentos de aumento de imagem ou demais processos informatizados que facilitem a rotina da produção em escala. Deve-se seguir os preceitos contidos na norma (Figura 4), para classificação das peças e descarte das julgadas impróprias a uso estrutural.

*Figura 4. Classificação visual das classes para Pinus spp*

Defeito	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Medula	Não se admite		
Nós na face	$\leq 1/4$	$\leq 1/3$	$\leq 1/2$
Nós na borda	$\leq 1/5$	$\leq 1/4$	$\leq 1/3$
Inclinação das fibras (mm/mm)	$\leq 1:9$	$\leq 1:6$	$\leq 1:3$
Fissuras não passantes (m)	O comprimento das fissuras não pode ser maior que 1,0 m e nem $\frac{1}{4}$ do comprimento da peça		
Fissuras passantes (m)	Somente são permitidas as fissuras passantes nos extremos e o comprimento não pode ser maior do que a largura da peça		
Encurvamento (mm)	Menor que 8 mm para cada 3 m de comprimento		
Arqueamento (mm)	Menor que 3 mm para cada 2 m de comprimento		
Torcimento (mm/m)	Menor que 5 mm para cada 1 m de comprimento		
Encanoamento (mm)	Sem restrições		
Esmoado (mm/mm)	Transversalmente menor que $\frac{1}{4}$ da espessura ou largura da peça Sem restrições para o comprimento		
Ataques biológicos	Não se admitem zonas atacadas por fungos causadores de podridão Admitem-se zonas atacadas por fungos cromógenos Admitem-se orifícios causados por insetos com diâmetro inferior a 2 mm		
Outros	Danos mecânicos, presença de bolsa de resina e outros defeitos se limitam por analogia com alguma característica similar		

Fonte: NBR 7190 (2022), anexo A1.

Defeitos que não se enquadrarem nos valores previstos, devem ser cortados e eliminados das lamelas de uso estrutural. Seções de lamelas que não se enquadrarem nos valores previstos entre finger joints (80cm para externo e 50cm para interno) também devem ter seu uso desconsiderado.

### 3.3.2 Classificação Mecânica das Lamelas

Devido a variabilidade de idades e sítios das árvores, possíveis de ocorrer num sistema fabril, é necessária a classificação das lamelas para a produção de elementos em MLC mais homogêneos (Rosa, T.O. 2017, p. 27).

As lamelas de uso estrutural, segundo a NBR-7190(2022, p.5) anexo 2, devem passar por teste de classificação mecânica - módulo de elasticidade - não destrutiva antes de sua utilização, e teste de densidade aparente. Essa classificação permite a criação de grupos de lamelas de acordo com os valores de MOE obtidos, destinando-se, assim, os de resultado acima da média para as camadas externas do MLC, enquanto as de valor na média para as camadas internas – linha neutra.

Os parâmetros para testes a serem realizados são determinados pela norma Brasileira NBR-7190(2022), Anexo 2.

### 3.4 ADESIVOS E PRESSÃO DE COLAGEM

De acordo com de Jesus (2000, p. 2), o sucesso da MLC tem como, um dos responsáveis principais, as características de desempenho do adesivo. Estes são divididos em dois grupos: os de origem natural e os de origem sintética. Os adesivos sintéticos são os mais empregados pela indústria madeireira, pela sua resistência à umidade e por serem imunes ao ataque de micro-organismos.

Segundo a NBR-7190(2022), Projeto de Estruturas de Madeira, o adesivo utilizado para a produção de vigas de MLC deve ser o de uso estrutural e apresentar propriedades compatíveis ao ambiente em que elemento estará exposto. Para a escolha do tipo de adesivo, é importante que o projetista considere se a estrutura vai permanecer abrigada no interior da edificação, ou exposta a variação das condições atmosféricas, tais como alternância de sol e chuva. Após escolhido o tipo de adesivo a ser utilizado, a quantidade de adesivo e demais parâmetros como tempo de prensagem, temperatura, pressão e umidade da madeira e do ambiente, devem atender as especificações do fornecedor do produto.

Quando por parte do fornecedor não vierem informações quanto à pressão de colagem recomendada, deve-se seguir normas como a NBR 7190(2022), que estabelece pressão mínima de 0,7MPa entre lamelas para madeira com densidade menor ou igual a 0,5g/cm<sup>3</sup>, e 1,2MPa para madeiras de densidade superior a 0,5g/cm<sup>3</sup>.

A colagem de entalhes múltiplos deve seguir parâmetros específicos, de acordo com a natureza de sua geometria. A NBR 7190(2022) traz uma tabela com valores de referência, fazendo relação entre a pressão a ser empregada e comprimento dos dentes do finger joint.

*Tabela 1- Pressão de colagem das ligações de continuidade de lamelas.*

$L_d$ mm	Pressão de colagem MPa	
	Densidade $\leq 0,50$ kg/m <sup>3</sup>	Densidade $> 0,50$ kg/m <sup>3</sup>
10	12	14
20	8	10
30	6	8
40	4,5	6,5
50	3	5
60	2	4

Fonte: NBR 7190(2022).

A verificação da eficiência da colagem deve ser comprovada por meio de ensaios de cisalhamento na lâmina de cola ou tração normal à lâmina de cola, segundo as recomendações estabelecidas na norma NBR 7190(2022). Os resultados característicos desses ensaios deverão indicar, no mínimo, 90% do valor da resistência característica da própria madeira.

### 3.5 REFORÇOS COM FIBRAS

Durante a última década, o uso de reforço de polímero reforçado com fibra (PRF) tornou-se um método comum para aumentar a capacidade estrutural de elementos de madeira existentes ou para projetar novas estruturas de madeira de alto desempenho (Fossetti, M. Minafò, G. Papia, M. 2015, p. 54).

No início das aplicações de reforços estruturais, foram utilizados materiais tradicionais, como alumínio e aço. No entanto, uma diminuição no custo da fibra possibilitou o uso de polímeros com fibra de carbono, aramida e fibras de vidro como reforço (André, A.; Johnsson, H. 2010, p. 827).

Materiais como aço e fibras são aplicados às mais diversas técnicas, tendo sua aplicação cada vez mais ampliada com o avanço da tecnologia. Ao equiparar aço com fibras, a utilização de fibras tem uma relação mais eficiente de peso vs. resistência mecânica, não são corrosivos, têm custos de manutenção reduzidos a longo prazo e podem ser instalados no local da obra. (Nadir et al., 2016, p. 548)

Produtos engenheirados, como o MLC, quando reforçados, apresentam desempenho superior aos confeccionados por métodos tradicionais. Materiais compósitos como polímeros a base de carbono ou de fibra de vidro, tornaram-se populares como reforço de vigas de madeira devido ao seu peso leve e compatibilidade com a madeira (Schober et al. 2015, p. 116).

Segundo Lopez-Anido e Xu (2002, p. 195), após adição de fibra aos elementos, essa passa a ser responsável pela resistência à tração, contribuem para a rigidez à flexão e fornece proteção ambiental ao elemento estrutural.

Em estudo realizado por Lopez-Anido e Xu (2002, p. 2) em painéis de MLC para plataformas de pontes, os elementos com reforço estrutural unidirecional obtiveram aumento substancial na capacidade de carga final. Utilizando-se uma taxa de armadura de 2,1% em relação à seção transversal de MLC, obtiveram um aumento da capacidade de carga última de 47%. Os autores André e Johnsson (2010, p. 834), obtiveram aumento na tensão de tração máxima em cerca de 23% e rigidez em 35%.

As fibras de vidro são produzidas a partir da sílica ( $\text{SiO}_2$ ), por meio da adição de óxido de cálcio, boro, sódio e alumínio. Estas fibras são materiais amorfos e sua cristalização ocorre após prolongado tratamento com altas temperaturas. (Dias et al., 2003, p. 3)

Segundo Fiorelli (2005, p. 100), a percentagem máxima de fibra que deve ser utilizada em reforço de vigas de MLC é de 3,3% em relação à altura da peça. O autor afirma que, a partir deste ponto, o ganho de resistência e rigidez é insignificante.

Em pesquisa de vigas fabricadas a partir de MLC reforçada com fibras de vidro PRF através de método de reforço eficaz, relativamente simples e barato, obteve-se um aumento na rigidez de 7,2%. (Kociezewski e Gozdecki, 2017, *apud* Mirski et al., 2021, p. 2).

Ainda mostrando a eficiência da aplicação de fibras, Szucz (1992 *apud* Fiorelli, 2005, p. 25), confeccionou corpos-de-prova em MLC, com fibra de vidro no interior de cada junta de cola, formando assim um compósito. O tecido de fibra de vidro foi disposto perpendicular às fibras da madeira, e os materiais foram unidos utilizando-se

adesivo de resorcina-fenol-formol. O autor obteve acréscimo de aproximadamente 5 vezes a resistência à tração normal das fibras da madeira. O pesquisador afirma que o problema da baixa resistência da madeira, quanto a esforços transversais às suas fibras, pode ser solucionado com um reforço de fibras de vidro.

Graeff (1995, p. 115), avaliou a eficiência da substituição de emendas finger joints, por emendas de topo reforçadas com fibra de vidro. O autor afirma que vigas de MLC com emendas de topo reforçadas com fibra de vidro apresentaram um excelente comportamento mecânico. Além de melhorar as propriedades mecânicas do elemento estrutural, a aplicação de fibras no elemento, aumenta a confiabilidade em relação ao modo de ruptura.

### 3.6 *Pinus taeda*

O *Pinus taeda* é considerado uma das espécies madeireiras mais importantes economicamente para a região Sul do Brasil e também a mais cultivada, apesar de ser nativa da América do Norte (Estados Unidos e Canadá). As árvores podem alcançar cerca de 20 m de altura e 1 m de diâmetro à altura do peito (DAP), produzindo copa densa, casca gretada e ramos acinzentados (Bourscheid, 2017, p. 24).

Segundo Ballarin e Palma (2002, p. 372), as estimativas indicam que do volume de madeira serrada produzida no País, estimada em aproximadamente 18 milhões de m<sup>3</sup>, mais de 35% são formados de madeira de Pinus. Atualmente, no Brasil, existe aproximadamente 1,8 milhão de hectares de plantações constituídas por espécies de Pinus, das quais 46% são de *Pinus taeda*.

Em razão das condições edafoclimáticas do território brasileiro, as florestas de Pinus apresentam rápido crescimento e incremento médio anual (IMA) de 25 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, considerado excelente em comparação com a média nos EUA, onde a cultura é nativa e apresenta IMA de apenas 10 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, evidenciando a adaptação da espécie no território brasileiro (Juvenal e Mattos, 2002, p.13).

No Brasil, as plantações de pinus têm sofrido grande redução do período de colheita florestal. Segundo Westrock, por exemplo, (2017, p. 12) o material é manejado sem desbastes e tem seu corte final com 17 anos. Segundo Remasa (2016, p. 15) os regimes principais adotados são com dois desbastes e corte raso na idade de 18 a 20 anos, sendo colhidas todas as árvores remanescentes após os desbastes. Nessa idade, em geral, as árvores do gênero Pinus ainda não possuem quantidade

significativa de madeira adulta e a maior parte do lenho ainda é formada por madeira juvenil. Esse tipo de madeira apresenta características inferiores em termos de resistência e estabilidade dimensional o que pode influenciar nas suas potencialidades de utilização. (Santini et al., 2000, p.86).

Estudos mostram que as propriedades físicas e mecânicas da madeira podem ser melhoradas conforme o aumento de sua idade e distância em relação a medula. A densidade pode aumentar aproximadamente 30% entre as idades de 9 e 20 anos, a resistência a compressão pode aumentar entre 50 e 74%, a resistência a flexão aumento de 50 a 80%. (Oliveira et al., 2006, p. 68)

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo se encontram as informações essenciais relacionadas à confecção dos corpos de prova, como os materiais utilizados, os procedimentos adotados, as técnicas de coleta de dados e as estratégias de análise empregadas.

### 4.1 MATERIAL

Para a fabricação dos corpos de prova, foram utilizadas 125 tábuas de madeira de *Pinus taeda* de mesmo lote, estas disponibilizadas pelo Laboratório de Construções e Materiais (LABCOM) do CAV, UDESC. Destas, 120 se destinaram a fabricação dos corpos de prova em Madeira Lamelada Colada, e as 5 restantes para a fabricação dos CP's em madeira maciça – caracterização da madeira como matéria prima.

A madeira apresentava uma umidade de aproximadamente 15%. A determinação dessa umidade foi realizada por meio do método de determinação de umidade, utilizando a fórmula  $U=(M_s(M_u-M_s))\times 100$ . Na execução desse método, a massa úmida ( $M_u$ ) da amostra foi obtida após pesar corpos de prova saturados em água, utilizando o vácuo. Já a massa seca ( $M_s$ ) foi obtida pesando a madeira após ser colocada em uma estufa até que estivesse completamente seca, alcançando um peso constante.

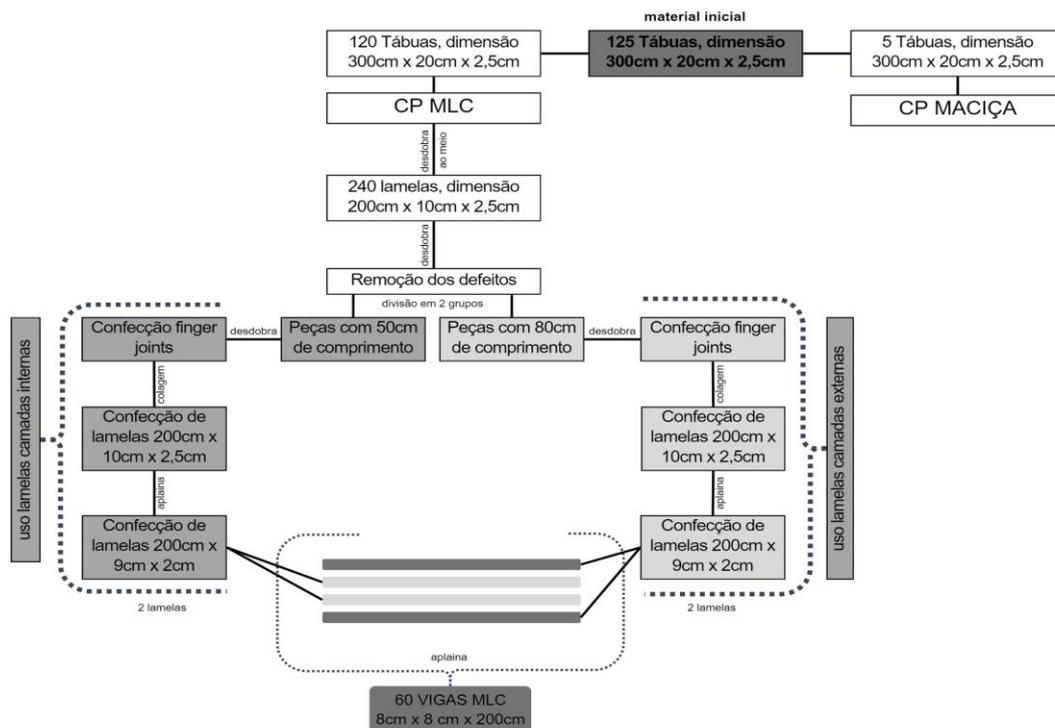
As amostras são de indivíduos com aproximadamente 18 anos de idade, proveniente de florestas plantadas na cidade de Lages-SC.

Segundo o INMET, a cidade de Lages, situada no Planalto Serrano de Santa Catarina, possui um clima caracterizado por influências tanto tropicais quanto subtropicais, devido à sua localização geográfica e altitude elevada. A cidade está a aproximadamente 930 metros acima do nível do mar, o que influencia diretamente nas características climáticas da região. A temperatura em Lages apresenta variações sazonais significativas. Durante o verão, as temperaturas médias podem variar entre 20°C e 28°C, com alguns picos de calor. No inverno, as temperaturas médias ficam entre 5°C e 15°C, sendo comuns registros de temperaturas abaixo de zero durante a noite. As estações intermediárias, primavera e outono, são caracterizadas por temperaturas mais amenas, variando entre 10°C e 25°C.

#### 4.2 CORPOS DE PROVA EM MLC

As vigas em MLC, objeto desse estudo, foram confeccionadas de acordo com o seguinte fluxograma.

*Figura 5. Fluxograma de confecção dos corpos de prova*



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

A produção das vigas em MLC foi realizada pela Indústria DelRei, parceira na pesquisa, também da cidade de Lages-SC. Os adesivos e equipamentos utilizados para confecção dos corpos de prova, bem como os métodos e geometria das emendas, são os já utilizados para produção comercial da empresa. A madeira utilizada para confecção dos corpos de prova, foi disponibilizada pelo Laboratório de Construções e Materiais (LABCOM) do CAV, UDESC.

A escolha dos testes aplicados neste estudo foi guiada pelas diretrizes estabelecidas na NBR-7190 (2022), Anexo 3, que requer para caracterização mínima da madeira, a realização dos testes de: i) resistência à compressão paralela às fibras; ii) tração paralela; iii) cisalhamento paralelo; e iv) medição da densidade aparente.

No entanto, é importante notar que autores como Lopez-Anido e Xu (2002, p. 195), e Fossetti, Minafò e Papia (2015, p. 54), não evidenciam melhorias significativas na resistência à compressão da madeira com a adição de fibras de vidro.

Nesse contexto, nessa pesquisa optou-se por não realizar o teste de resistência à compressão. Os testes aplicados foram direcionados para as propriedades mecânicas mais diretamente influenciadas pela incorporação das fibras de vidro, como a resistência à tração, ao cisalhamento e a rigidez à flexão. Essa escolha de testes foi feita com base na relevância das propriedades afetadas pela presença das fibras de vidro, visando uma avaliação mais precisa do desempenho estrutural das vigas MLC reforçadas com esse material.

#### **4.2.1 Preparação das Tábuas**

Cada uma das 120 tábuas apresentava as seguintes dimensões: 300 cm de comprimento, 20cm de largura e 2,5 cm de espessura. Estas tábuas foram cortadas ao meio, resultando em 240 tábuas de 300 cm de comprimento, 10 cm de largura e 2,5 cm de espessura.

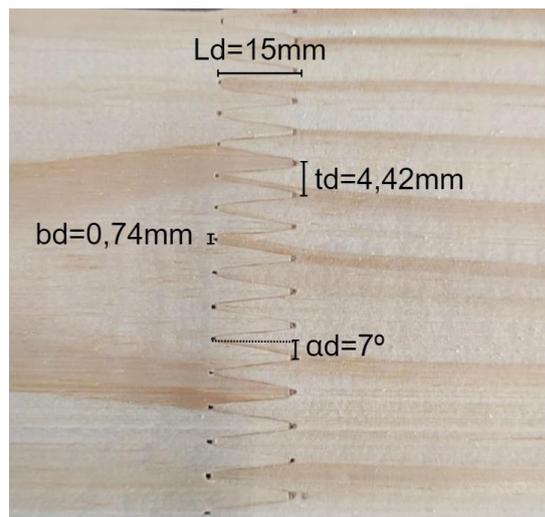
As tábuas foram inspecionadas visualmente e quaisquer defeitos foram removidos de acordo com a norma NBR-7190, que estabelece critérios para a classificação visual da madeira. Foram selecionadas peças com comprimentos entre 50 cm e 80 cm para a fabricação das lamelas das vigas. Essas lamelas, preparadas de acordo com os padrões estabelecidos, foram, em seguida, encaminhadas para o processo de confecção do finger joint.

É importante destacar que as tábuas não foram submetidas a um processo de classificação mecânica, sendo sua seleção baseada exclusivamente em critérios visuais.

#### 4.2.2 Finger Joints

As lamelas de madeira foram submetidas ao processo de finger joints. Essa etapa envolve o processamento de recortes alternados nas extremidades das lamelas, que se encaixam perfeitamente para formar uma conexão forte e contínua. Os finger joints foram feitos utilizando uma máquina específica para esse propósito, seguindo a geometria utilizada na produção da empresa DelRei.

*Figura 6– Geometria Emenda por entalhes múltiplos utilizada pela empresa*



Onde:  $b_d = 0,74\text{mm}$ .  $t_d = 4,42\text{mm}$ .  $L_d = 15\text{mm}$ .  $\alpha_d = 7^\circ$ .  
 Fonte: Elaborada pela autora (2023).

As lamelas de madeira foram divididas em dois grupos. As peças previamente cortadas com um mínimo de 50cm foram unidas longitudinalmente para formar as lamelas do meio das vigas. Simultaneamente, as peças previamente cortadas com um mínimo de 80cm foram unidas longitudinalmente para compor as lamelas externas das vigas. Entre essas etapas, foi realizada a colagem dos finger joints, aplicando uma pressão de 0,7MPa durante o processo, utilizando-se o adesivo Advantage EP-950A. Vale destacar que, nas lamelas externas, foi obrigatória a presença de finger joints na região da metade do comprimento da peça de 200cm, como parte integrante do procedimento.

A presença obrigatória de finger joints na metade do comprimento das lamelas de uso externo é justificada pelo foco na região que concentra as maiores tensões durante o teste de flexão estática. Essa abordagem direciona o teste para a área mais crítica, permitindo uma avaliação precisa da resistência dos finger joints em condições representativas das demandas reais de uso externo.

Após a colagem dos finger joints, com adesivo já seco, essas lamelas passam pelo processo de aplainamento. Este realiza a regularização da superfície e abertura de poros de modo a facilitar impregnação do adesivo aplicado posteriormente. Ao final deste processo, cada lamela passou a apresentar 200cm de comprimento, 9 cm de largura e 2 cm de espessura.

#### **4.2.3 Colagem das Lamelas**

A composição de cada viga envolveu a colagem de 4 lamelas, utilizando o adesivo Advantage EP-950A, um adesivo bicomponente de emulsão acrílica polimerizada com Isocianato (EPI). A aplicação do adesivo seguiu as recomendações do fabricante, utilizando uma gramatura de 200g/m<sup>2</sup> de linha de cola e uma camada de aproximadamente 0,178mm de espessura. A máquina de aplicação de adesivo foi previamente ajustada para atender a esses parâmetros especificados pelo fabricante do adesivo, garantindo uma aplicação precisa e consistente durante o processo de colagem das lamelas.

No processo produtivo das vigas, a lamela preparada previamente, foi alimentada pela máquina, conforme representado na figura 7. Esse procedimento resultou em uma camada homogênea e uniforme ao longo de toda a extensão da lamela, como ilustrado na figura 8.

*Figura 7. Equipamento que aplica adesivo, ajustado segundo a gramatura*



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

*Figura 8. Lamela logo após a aplicação do adesivo*



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Logo após o adesivo ser aplicado, as 4 lamelas pertencentes a cada viga são sobrepostas face a face e colocadas em prensa hidráulica. Para otimização do processo industrial, diversas vigas foram produzidas de forma contínua. Vigas eram

adicionadas uma sob a outra na prensa, separadas por plástico stretch, conforme ilustrado em figura 9. Processo foi continuado respeitando tempo máximo de 1h até a cura do adesivo.

Após vigas sobrepostas, é realizada pressão de colagem de 0,7MPa, conforme recomendada pelo fabricante para a classe de densidade da madeira utilizada. O tempo de permanência sob pressão é de aproximadamente 1 hora. Peças são alocadas sobre um berço em madeira, de modo a adaptar suas dimensões as do equipamento disponível. Processo apresentado na figura 10.

*Figura 9. Lamelas sendo posicionadas para prensagem*



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

*Figura 10. Grupo de vigas em prensagem*



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

*Figura 11. Vigas separadas por plástico stretch*



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

No total, foram fabricadas 60 vigas. Estas se dividiram em 5 distintos tratamentos, sendo 12 corpos de prova para cada.

Os tratamentos aplicados se diferiram pela quantidade de linhas de cola onde houve fibra de vidro aplicada – processo descrito em 4.2.3.1.

Após retiradas da prensa, com adesivo totalmente seco, as vigas passaram por processo de aplainamento. Este processo garante dimensões conforme o planejado, de perfeito esquadro e dá acabamento estético à peça.

Ao final, as vigas apresentaram aproximadamente 200 cm de comprimento, 8 cm de largura e 8 cm de espessura.

Os tratamentos experimentais foram implementados e testados dentro do processo de produção da empresa DelRei, sendo incorporados de maneira a se adequar à sua rotina de trabalho preexistente. O propósito principal era assegurar que essas modificações pudessem ser facilmente adotadas e executadas de forma prática pelos funcionários da fábrica, sem introduzir procedimentos complicados ou onerosos que não fossem viáveis em sua produção diária. Em resumo, busca-se garantir que as mudanças propostas sejam aplicáveis e sustentáveis no contexto industrial da empresa.

#### *4.2.3.1 Tratamentos*

Para os tratamentos descritos abaixo, foram seguidos os mesmos passos dos capítulos "Preparo das Tábuas" (Seção 4.2.1) e "Finger Joint" (Seção 4.2.2), se distinguindo no processo de "Colagem das Lamelas" (Seção 4.2.3).

Nos tratamentos VD1, VD2, VD3 e VD4, entre as lamelas, na linha de cola das vigas, foram adicionados pedaços de fibra de vidro bidirecional 300g/m<sup>2</sup>, espessura de 0,5mm, estes ultrapassando aproximadamente 5cm para cada lado sobre os finger joints (conforme figura 12), tendo medida final de 11,5cm de comprimento.

A aplicação da fibra de vidro foi direcionada exclusivamente para os finger joints, tanto na face superior quanto na face inferior, de acordo com o tratamento específico (conforme figura 14). Essa decisão se justifica devido à natureza intrínseca

da emenda finger joint, que consiste em pequenos dedos que unem as lamelas de madeira, podendo se tornar pontos críticos de concentração de tensão.

Portanto, a aplicação da fibra de vidro tem como objetivo primordial fortalecer essa área crítica. Ao reforçar os finger joints com fibras de vidro, busca-se redistribuir as tensões de maneira mais uniforme, reduzindo, assim, o risco de falhas precoces e potencialmente melhorando a resistência das vigas MLC.

*Figura 12. Tecido de Fibra de Vidro sendo aplicado sobre finger joint*



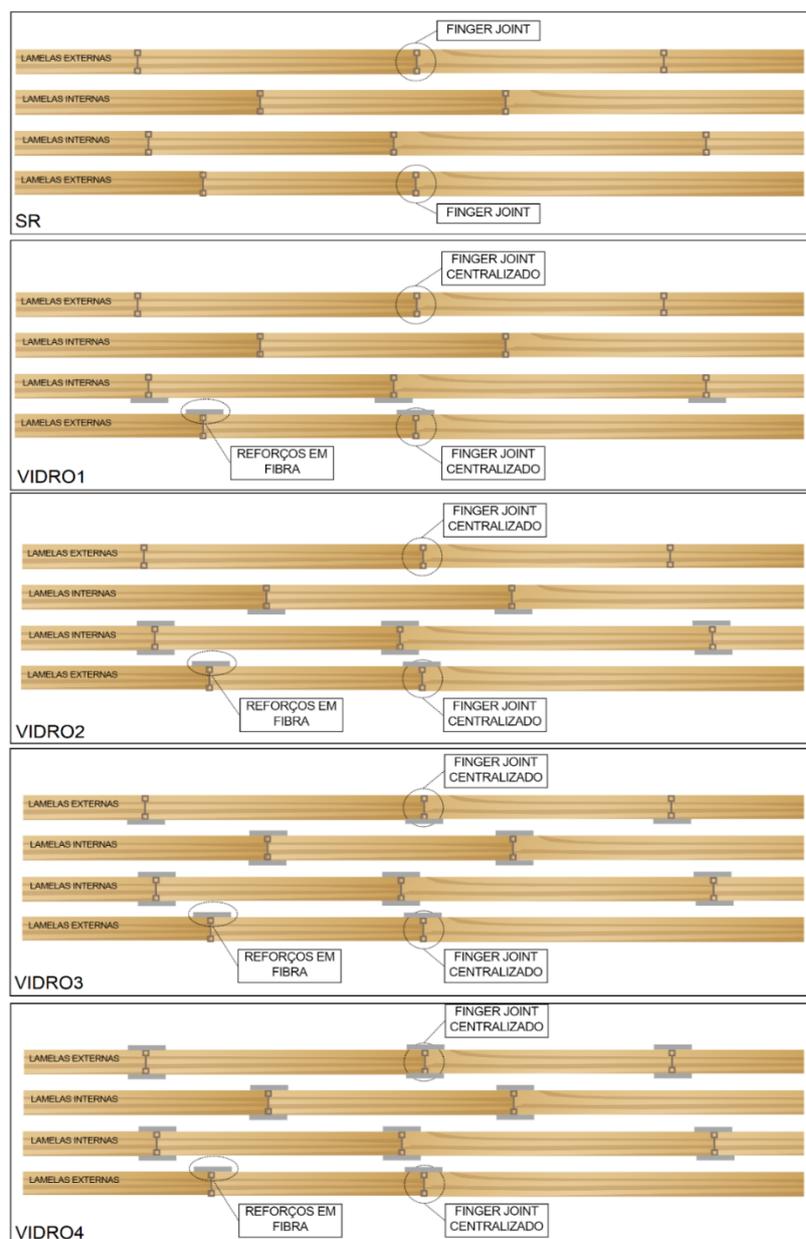
Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Foram realizados cinco tratamentos diferentes, variando a quantidade de fibra aplicada nas vigas, sendo:

- **Tratamento VD1 (Vidro1):** Neste tratamento, foi colocado fibra de vidro em apenas uma linha de cola da viga, a inferior.
- **Tratamento VD2 (Vidro2):** Neste tratamento, foi aplicada fibra de vidro em duas linhas de cola da viga – linha inferior, e linha central.
- **Tratamento VD3 (Vidro3):** Neste tratamento, foi aplicada fibra de vidro nas três linhas de cola da viga.

- **Tratamento VD4 (Vidro4):** Neste tratamento, além da aplicação de fibra de vidro nas três linhas de cola, também foi adicionado reforço de fibra de vidro na face inferior da viga (face a ser tracionada no ensaio de flexão estática).
- **Tratamento SR (Sem Reforço):** Para fins de comparação, um grupo de vigas foi mantido como controle, sem a aplicação de fibra de vidro. Esse grupo foi tratado de acordo com o método convencional de fabricação de vigas em madeira lamelada colada (descrito em 4.2.3).

Figura 13. Esquema de confecção dos tratamentos



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

*Figura 14. Vista lateral viga com reforço em fibra*



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

#### 4.3 CORPOS DE PROVA EM MADEIRA MACIÇA

Visando caracterizar o material utilizado para a confecção do MLC, foram realizados testes também com a madeira maciça.

Da madeira restante do lote, 5 tábuas foram utilizadas para confecção dos corpos de prova referentes aos testes de flexão estática à 3 pontos, tração paralela às fibras, cisalhamento e densidade.

#### 4.4 ENSAIOS DE AVALIAÇÃO

Os testes realizados se dividem-se em:

- i) testes para caracterização da madeira utilizada como lamela;
- ii) caracterização do finger joint utilizado visando o estudo da eficiência da cola e da geometria utilizada.
- iii) caracterização dos reforços em fibra de vidro, conforme figura 13.

Figura 15. Organograma dos testes



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Os 60 corpos de prova MLC produzidos inicialmente, foram testados em primeiro momento à flexão estática à 4 pontos. Após ruptura destes, foram retirados corpos de prova necessários aos testes de Tração paralelas às fibras e cisalhamento.

Devido à carga prévia aplicada durante o teste de flexão estática, a retirada subsequente dos corpos de prova deve ser executada com extrema delicadeza e atenção especial à escolha das áreas. É vital evitar regiões de grande solitação, como aquelas próximas aos pontos de carga, cutelos de carga, áreas de apoio ou locais que experimentaram ruptura durante o teste de flexão estática.

#### 4.4.1 Flexão estática

Os corpos de flexão estática se dividiram em dois grupos: flexão estática a 4 pontos (MLC) e flexão estática a 3 pontos (maciça), ambos preconizados pela NBR-7190. A referida norma preconiza que elementos estruturais em madeira devem ser testados na flexão pelo método de ensaio à 4 pontos pela NBR-7190 (2022). O ensaio de flexão, à 3 pontos, deve ser executado para a caracterização da matéria prima segundo a NBR-7190 (1997).

Através destes, foi possível obter os resultados de resistência da madeira à flexão  $f_M$ , e a rigidez  $E_{M0}$ .

A resistência da madeira à flexão  $f_M$ , também denominado “MOR” módulo de ruptura, é um valor convencional dado pela máxima tensão que pode atuar em um corpo de prova no ensaio, sendo calculado, de acordo com a NBR-7190(2022), pela seguinte fórmula (1):

$$f_M = \frac{M_{\max}}{W_e} \quad (1)$$

Onde:

$M_{\max}$  é o momento máximo aplicado ao corpo de prova, expresso em N.mm.

$W_e$  é o módulo de resistência elástico da seção transversal do corpo de prova, ele se dá por  $bh^2/6$ , expresso em  $\text{mm}^3$ .

$f_M$  é a resistência da madeira à flexão, em  $\text{N/mm}^2$  (MPa).

Foi possível também, através dos testes de flexão estática, estabelecer a rigidez  $E_{M0}$ , também denominado “MOE” módulo de elasticidade, caracterizado pela força versus o deslocamento. Este se dá pela fórmula (2) presente na NBR-7190(2022):

$$E_{M0} = \frac{(F_{M,50\%} - F_{M,10\%})L^3}{(V_{50\%} - V_{10\%})4bh^3} \quad (2)$$

Onde:

$F_M$  10 e 50 são, respectivamente, 10% e 50% da força máxima aplicada, em N.

$V$  10 e 50 são, respectivamente, 10% e 50% do deslocamento no meio do vão, correspondente a força, em mm.

$E_{M0}$  é a rigidez, módulo de elasticidade, em  $N/mm^2$ (MPa).

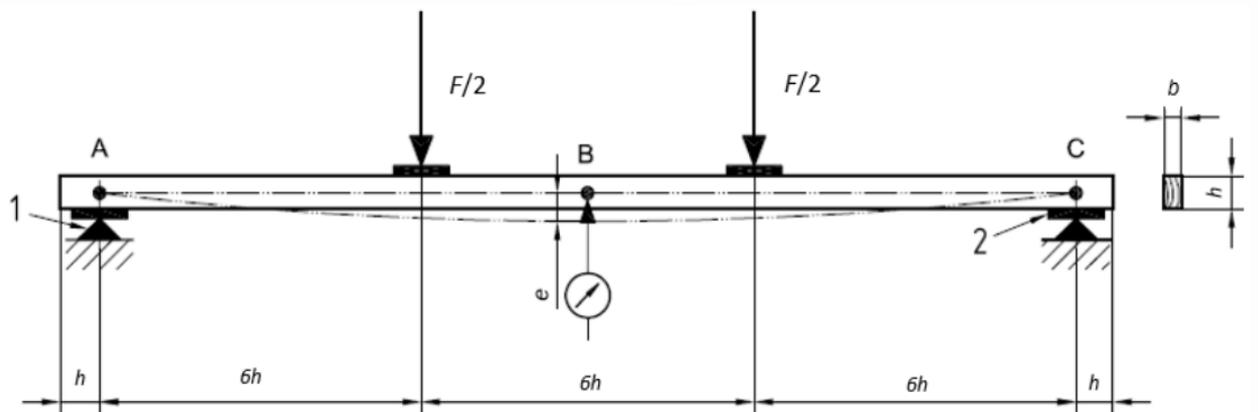
#### 4.4.1.1 Flexão Estática à 4 pontos

Os testes de flexão estática à 4 pontos foram executados em prensa hidráulica, utilizando carregamento monotônico de forma com que corpo de prova rompa entre 1 e 5 minutos. Foi utilizado o sistema de aquisição de dados da HBM com mensuração da carga e deslocamento da linha neutra.

O ensaio à 4 pontos – teste presente na NBR 7190(2022) anexo 4, serviu para caracterização do elemento quanto a seu uso estrutural. Neste, foram rompidos os 12 corpos de cada tratamento, sendo eles SR, VD1, VD2, VD3 e VD4.

Foi utilizado como distância entre os apoios, vão de  $L= 18h$ , aproximadamente 1440mm. Valores de  $b$  e  $h$  aproximadamente 80mm, conforme figura 16 e 17.

Figura 16. Corpo de prova à 4 pontos



Fonte: NBR-7190(2022) anexo 4. Onde:  $F$  é a força aplicada, 1 e 2 são apoios articulados,  $h=80mm$  e  $b=80mm$ .

*Figura 17. Viga de MLC durante a realização do teste*



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

#### *4.4.1.2 Flexão Estática à 3 pontos*

Os testes de flexão estática à 3 pontos foram executados em máquina universal de ensaios EMIC, modelo DL 3000®, utilizando carregamento monotônico com taxa de 10MPa/min. Foi utilizado o sistema de aquisição de dados da HBM com mensuração da carga e deslocamento da linha neutra.

O ensaio à 3 pontos é previsto em NBR-7190(1997). O teste foi realizado visando verificar as características da madeira utilizada para a fabricação dos corpos de prova. Conhecendo-se os valores específicos do material enquanto matéria prima, é possível estabelecer as relações de comparação quanto a eficiência do finger joint utilizado e da adição dos reforços.

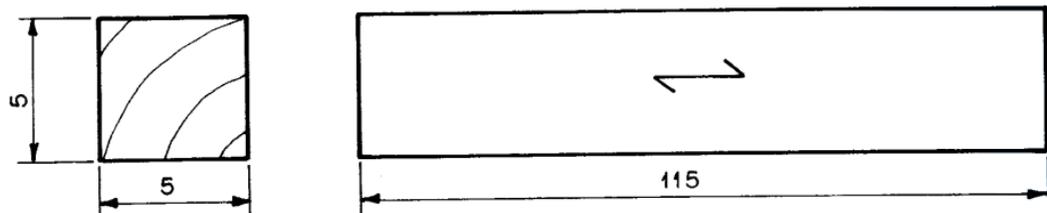
Neste teste, foram rompidos 12 corpos de prova referentes ao tratamento denominado “Maciça”.

A NBR-7190(1997) estabelece corpos de prova com dimensões 5cm x 5cm x 115cm. Valores foram ajustados proporcionalmente, adotando-se CPs com 2,5cm x

2,5cm x 57,5cm, devido a dimensão das tábuas disponíveis para confecção. Estes foram compostos por madeira maciça.

Quanto ao efeito da escala, é importante observar que, uma vez que os resultados dos ensaios são relacionados à área da seção transversal dos corpos de prova, a manutenção da proporção nas dimensões preserva a escala relativa entre os corpos de prova. Dessa forma, o impacto da escala não seria significativo neste contexto, uma vez que os resultados permanecem proporcionais às dimensões originais, garantindo a validade comparativa dos ensaios realizados. Portanto, a validade comparativa dos ensaios realizados não foi afetada pela redução proporcional das dimensões dos corpos de prova.

*Figura 18. Corpos de prova de flexão à 3 pontos segundo a NBR-7190(1997).*



Legenda: medidas em cm. Fonte: NBR 7190(1997).

#### 4.4.2 Tração paralela às fibras

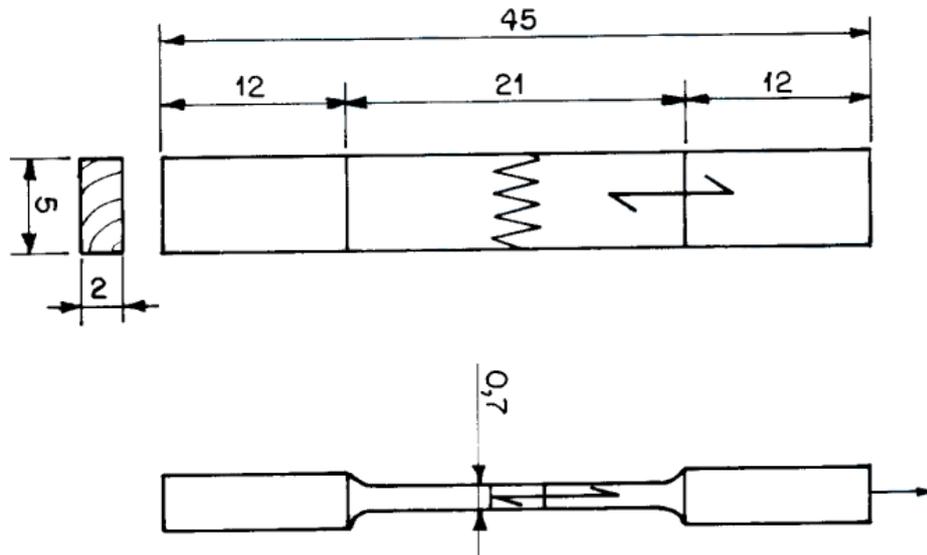
Os testes de tração seguiram as orientações previstas na NBR-7190(1997), tendo a geometria ilustrada na figura 19. Seus tratamentos se dividiram em:

**Maciça** – 12 corpos de prova em madeira maciça, confeccionados com as 5 tábuas já citadas anteriormente. Teste para caracterização da madeira, qualidade da lamela;

**MLC** – 12 corpos de prova com presença de finger joint no meio, confeccionados a partir da madeira após ruptura em teste de flexão estática. Este apresenta caracterização da qualidade do finger joint. Esquema de retirada ilustrado em figura 20.

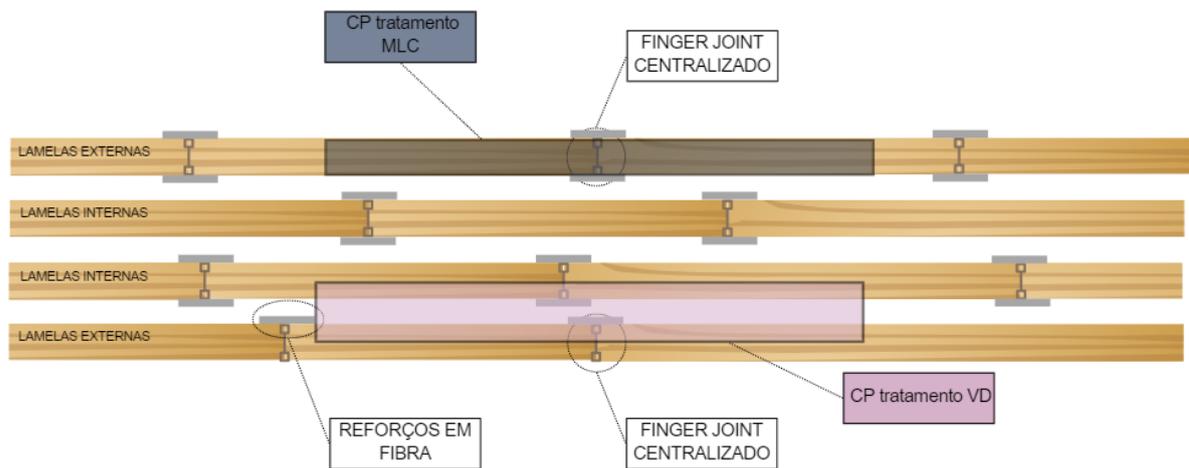
**VD** – 12 corpos de prova com presença de finger joint no meio, com presença também de uma camada de fibra de vidro sobre o finger joint, ilustrado na Figura 20. Estes foram confeccionados a partir da madeira após ruptura em teste de flexão estática. Este apresenta caracterização da qualidade do finger joint reforçado com fibra.

Figura 19. Corpos de prova de tração paralela às fibras.



Legenda: medidas em cm. Fonte: NBR-7190(1997).

Figura 20. Esquema da retirada de corpos de prova de tração paralela às fibras



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

*Figura 21. Marcação para retirada dos corpos de prova*



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

*Figura 22. Corpo de prova de tração em máquina de ensaio*



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

A resistência à tração paralela às fibras ( $f_{t0}$ ) é dada pela máxima tensão de tração que pode atuar em um corpo de prova alongado com trecho central de seção transversal uniforme. Este, se dá pela fórmula (3) presente na NBR-7190(2022).

$$f_{t0} = \frac{F_{t0,max}}{A} \quad (3)$$

Onde:

$F_{t0,max}$  é a máxima força de tração aplicada durante o ensaio, em N.

A é a área inicial da seção tracionada, em mm<sup>2</sup>.

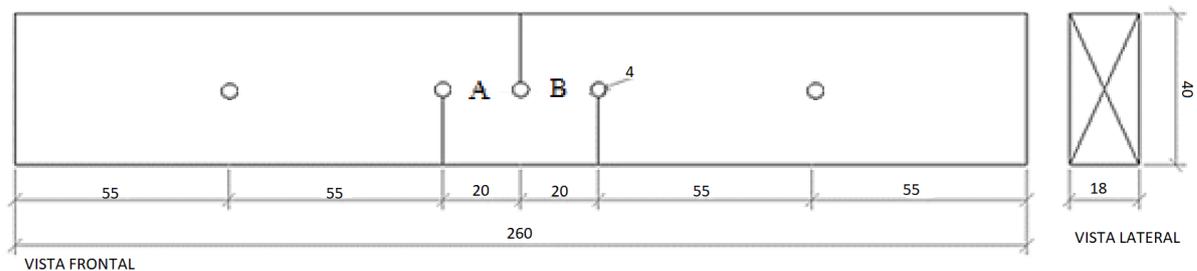
$F_{t0}$  é a resistência à tração paralela às fibras, expressa em MPa.

#### 4.4.3 Cisalhamento

Os ensaios de cisalhamento se dividiram em três tratamentos:

a) Maciça – Madeira maciça, análise da lamela visando a verificação da qualidade da madeira. 12 corpos de prova retirados das 5 tábuas previamente citadas, ilustrado em figura 23.

Figura 23. Corpo de prova de cisalhamento segundo a NF B 5-32.



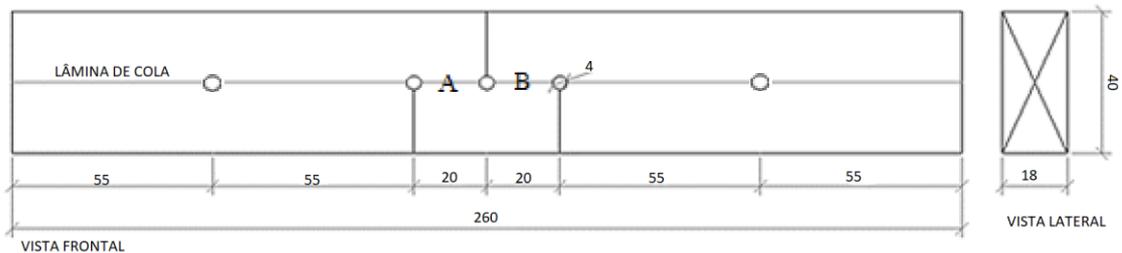
Legenda: Cotas em mm. Corpo para teste Maciça – sem linha de cola na parte central.  
Fonte: Elaborada pela autora (2023), adaptado da NF B5-32.

b) VD – 12 corpos de prova confeccionados a partir do material obtido após ruptura em teste de flexão estática. CP deve conter uma camada de tecido em fibra de vidro na linha de cola central. Ilustrado em figura 24.

c) MLC – 12 corpos de prova confeccionados a partir do material obtido após ruptura em teste de flexão estática. Deve ter presença de linha de cola em sua parte central – sem presença de reforço em fibra. Ilustrado em figura 24.

Foi utilizada para a confecção dos CP's e realização dos testes, a Norma Francesa NF B 5- 32 (1942), cujas dimensões são mais apropriadas aos recursos e equipamentos disponíveis para este trabalho. O teste foi realizado em máquina universal de ensaios EMIC, modelo DL 3000®, utilizando carregamento monotônico com taxa de 10MPa/min. Foi utilizado o sistema de aquisição de dados da HBM com mensuração da carga e deslocamento da linha neutra.

*Figura 24. Corpo de prova de cisalhamento segundo a NF B 5-32.*



Legenda: Cotas em mm. Corpo para testes VD e MLC – com presença de linha de cola em sua parte central. Em tratamento “VD” presença de camada de fibra de vidro entre a linha de cola. Fonte: Elaborada pela autora (2023), adaptado da NF B5-32.

*Figura 25. Corpo de prova de cisalhamento na máquina de ensaio*



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Os corpos de prova foram tracionados com velocidade constante de aplicação de carga equivalente a aproximadamente 2 Mpa/min.

Através da fórmula (4) presente na NF B 5-32, determinou-se a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras para cada corpo de prova.

$$\tau_{ci}^{rup} = \frac{P}{S_c} \quad (4)$$

Onde:

P é a carga atuante, em N.

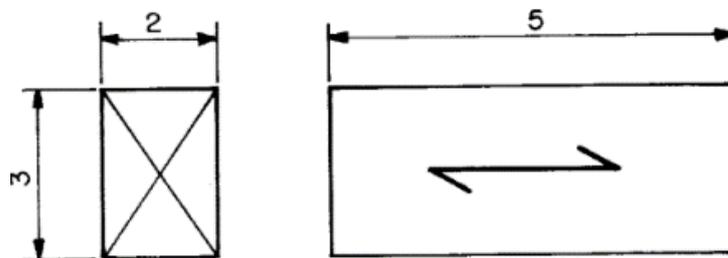
$S_c$  é a seção crítica, em mm<sup>2</sup>.

$\tau_{ci}^{rup}$  é a resistência ao cisalhamento, em MPa.

#### 4.4.4 Densidade

Para caracterização da madeira utilizada como matéria prima, determina-se a densidade do material. Segundo a NBR-7190(1997), os corpos-de-prova devem ter forma prismática com seção transversal retangular de 2,0 cm x 3,0 cm de lado e comprimento ao longo das fibras de 5,0 cm. Estes foram retirados das 5 tábuas previamente citadas. Foram analisados 16 corpos de prova para o teste em questão.

Figura 26. Corpo de prova de densidade segundo a NBR-7190(1997).



Legenda: medidas em cm. Fonte: NBR 7190(1997).

Figura 27. Corpo de prova de densidade sendo pesado em balança de precisão



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Através da fórmula (5) presente na NBR-7190(1997), foi possível calcular a densidade básica. Esta é uma massa específica convencional, definida pela razão entre a massa seca e o volume úmido do corpo de prova.

$$\rho_{\text{bas}} = \frac{m_s}{V_{\text{sat}}} \quad (5)$$

Onde:

$m_s$  é a massa do corpo de prova seca, em kg.

$V_{\text{sat}}$  é o volume do corpo de prova saturado, em  $\text{m}^3$ .

$\rho_{\text{bas}}$  é a densidade básica, em  $\text{kg}/\text{m}^3$ .

Segundo Moreschi (2012, p. 190), para se verificar se outros fatores como, por exemplo, o ângulo das fibras em relação ao eixo longitudinal da peça e o grau de polimerização da celulose não estão prejudicando características estruturais das peças, deve-se realizar teste quanto a densidade da madeira utilizada.

## 4.5 TRATAMENTO ESTATÍSTICO

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado (DIC), tendo sistemas fatoriais distintos para cada tipo de teste.

Os tratamentos estatísticos empregados são: i) de Grubbs para valores espúrios e para detecção de valores outliers nos tratamentos; ii) de normalidade dos resíduos por Shapiro-Wilk para verificação de distribuição normal. Valores que não apresentarem, devem sofrer transformação por logarítmica; iii) de homogeneidade das variâncias por Levene; iv) análise de variância ANOVA; e v) comparação entre médias por Tukey.

Todos os testes foram realizados com 95% de confiabilidade, utilizando-se dos programas Rstudio e Excel.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, são abordadas as análises e interpretações dos dados obtidos por meio dos ensaios e estudos realizados, são estabelecidas relações e conclusões que contribuirão para uma compreensão aprofundada do desempenho estrutural das vigas.

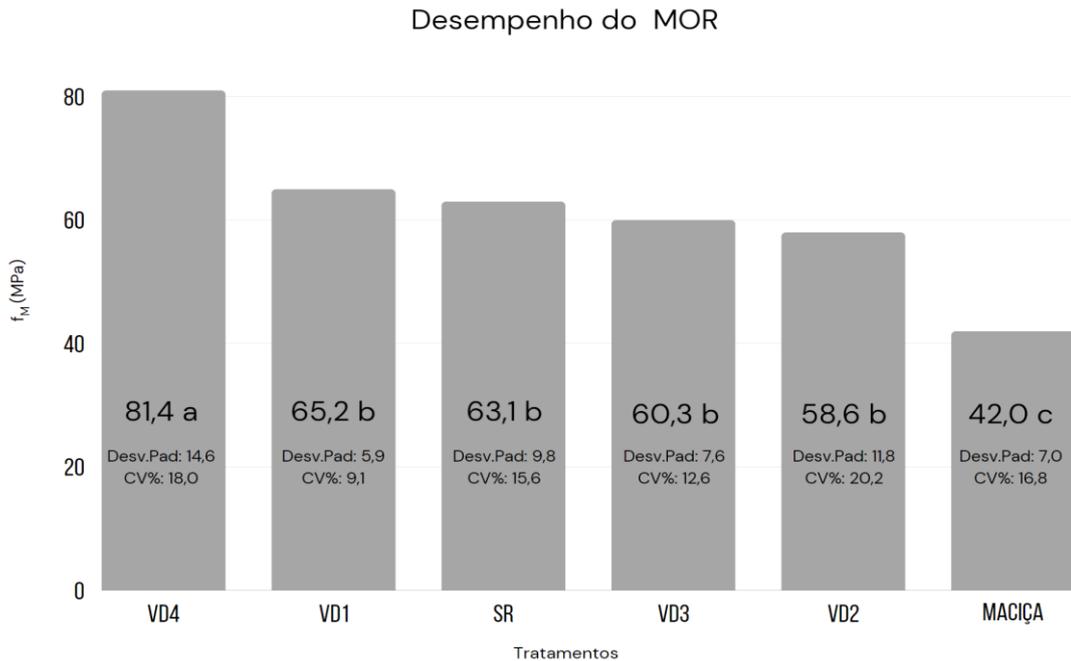
### 5.1 FLEXÃO ESTÁTICA

Neste item, constam os resultados e discussões dos valores de resistência e rigidez dos tratamentos.

#### 5.1.1 Resistência da madeira a flexão – módulo de ruptura

Através da fórmula apresentada, utilizando-se dos dados obtidos no teste de flexão estática, obtiveram-se os seguintes resultados médios de ruptura corrigidos para 12% de teor de umidade:

Figura 28. Desempenho do MOR de Flexão Estática



Legenda:  $f_M$  = módulo de ruptura médio à flexão estática a 12% de umidade; CPs= quantidade de corpos de prova; MACIÇA = tratamento sem presença de emenda; SR = tratamento com emendas, MLC convencional; VD1 = tratamento com emendas, MLC com uma camada de reforço em fibra de vidro; VD2 = tratamento com emendas, MLC com duas camadas de reforço em fibra de vidro; VD3 = tratamento com emendas, MLC com três camadas de reforço em fibra de vidro; VD4 = tratamento com emendas, MLC com quatro camadas de reforço em fibra de vidro; \* Médias seguidas de letras iguais na mesma coluna não diferenciam entre si pelo teste de Tukey ( $p > 0,05$ ). Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Mustefaga et al. (2019, p. 475) realizaram caracterização das propriedades físico mecânicas para *Pinus taeda*, relatando valores de  $f_M$  entre 48,9 MPa e 56,3 MPa. A conformidade entre os valores do autor e os aqui obtidos, sugerem consistência da variação esperada na resistência à flexão estática da espécie de madeira utilizada.

A madeira tratamento “Maciça” utilizada neste estudo demonstrou propriedades de resistência à flexão estática semelhantes às relatadas por Mustefaga et al. (2019, p. 475) para *Pinus taeda* – aproximadamente 85,92% do menor valor encontrado pelo autor. Entretanto, o tratamento “SR” já alcançou uma melhora significativa - 128,98% em relação ao menor valor obtido pelo autor.

De acordo com a NBR-7190 (1997), é estabelecido que elementos estruturais de Madeira Laminada Colada (MLC) devem apresentar no mínimo 80% da resistência em relação a da madeira maciça utilizada. No entanto, observou-se que o tratamento SR não apenas atendeu aos requisitos estabelecidos pela NBR 7190, como também

os superou de forma significativa, atingindo 150,17% da resistência da madeira maciça, sugerindo um aprimoramento significativo nas propriedades de resistência à flexão com a aplicação dos métodos de fabricação tradicionais empregados ao MLC.

O autor Graeff (1995, p. 115), buscando aprimorar as características do MLC, avaliou a eficiência da substituição de emendas finger joints, por emendas de topo reforçadas com fibra de vidro. O autor afirma que vigas de MLC reforçadas com fibra de vidro apresentaram um excelente comportamento mecânico. Além de melhorar as propriedades mecânicas do elemento estrutural, a aplicação de fibras no elemento, aumenta a confiabilidade em relação ao modo de ruptura a flexão.

Os tratamentos aqui empregados utilizando de reforço em fibra de vidro, particularmente o VD4, apresentaram melhoria em relação ao modo de ruptura a flexão conforme descrito por Graeff (1995, p. 115), obteve-se aumento de aproximadamente 93,81% em relação ao tratamento “maciça”. Esses resultados enfatizam a eficácia da aplicação de reforço em fibra de vidro quanto a resistência da madeira à flexão para *Pinus taeda*.

Com base nos resultados apresentados na imagem 28, é evidente que os tratamentos VD1, SR, VD3 e VD2 exibem médias semelhantes (indicadas pela mesma letra "b") em relação à resistência à flexão ( $f_M$ ). Isso sugere que esses tratamentos não apresentam diferenças estatisticamente significativas em termos de resistência à flexão.

Uma observação importante a ser destacada é que o aumento no número de camadas de reforço em tratamentos como VD3 e VD4 não pareceu ter um impacto significativo no valor do Módulo de Ruptura (MOR) em comparação com os tratamentos que possuem menos camadas de reforço ou nenhum reforço. Isso pode ser atribuído às condições e parâmetros específicos do estudo, indicando que a adição de camadas de reforço pode não ter afetado de maneira mensurável a resistência à flexão.

Além disso, os resultados sugerem que a quantidade de camadas de reforço utilizadas nos tratamentos pode não ter sido suficiente para gerar um impacto significativo no MOR em comparação com tratamentos que não possuem reforço ou são feitos de madeira maciça – tratamento com maior número de camadas representando apenas 1,05% da seção.

Embora os resultados apresentados na imagem 28 sejam de reforços em fibra de vidro, na resistência à flexão, é relevante estabelecer uma conexão com o estudo

realizado por Dagher (1999 *apud* Fiorelli, 2005, p. 18), que investigou a capacidade de carga de vigas de MLC reforçadas com fibras de carbono. O autor estudou a utilização de reforço em vigas de MLC com lamelas em fibras de carbono, tendo estas espessuras de 1,5mm. As fibras foram aplicadas na última camada de adesivo da região tracionada da viga. Foram obtidos resultados positivos, com significativo aumento da resistência da viga. Para as vigas reforçadas com 1,1% de reforço em relação a sua altura, o autor obteve incremento na capacidade de carga de 25%, enquanto para vigas reforçadas com 3,3% o incremento estrutural foi de 60%.

Em ambos os estudos, aprimorar as propriedades da madeira é o objetivo central. Essa relação é significativa porque a resistência à flexão é uma das características fundamentais que contribuem para a capacidade de carga de uma estrutura. Os resultados do estudo de Dagher (1999 *apud* Fiorelli, 2005, p. 18) demonstraram um aumento notável na capacidade de carga das vigas reforçadas com fibras de carbono. Da mesma forma, este estudo sugere que a madeira tratada pode ser empregada em estruturas com maior confiabilidade e capacidade de carga superior em comparação com a madeira maciça não tratada.

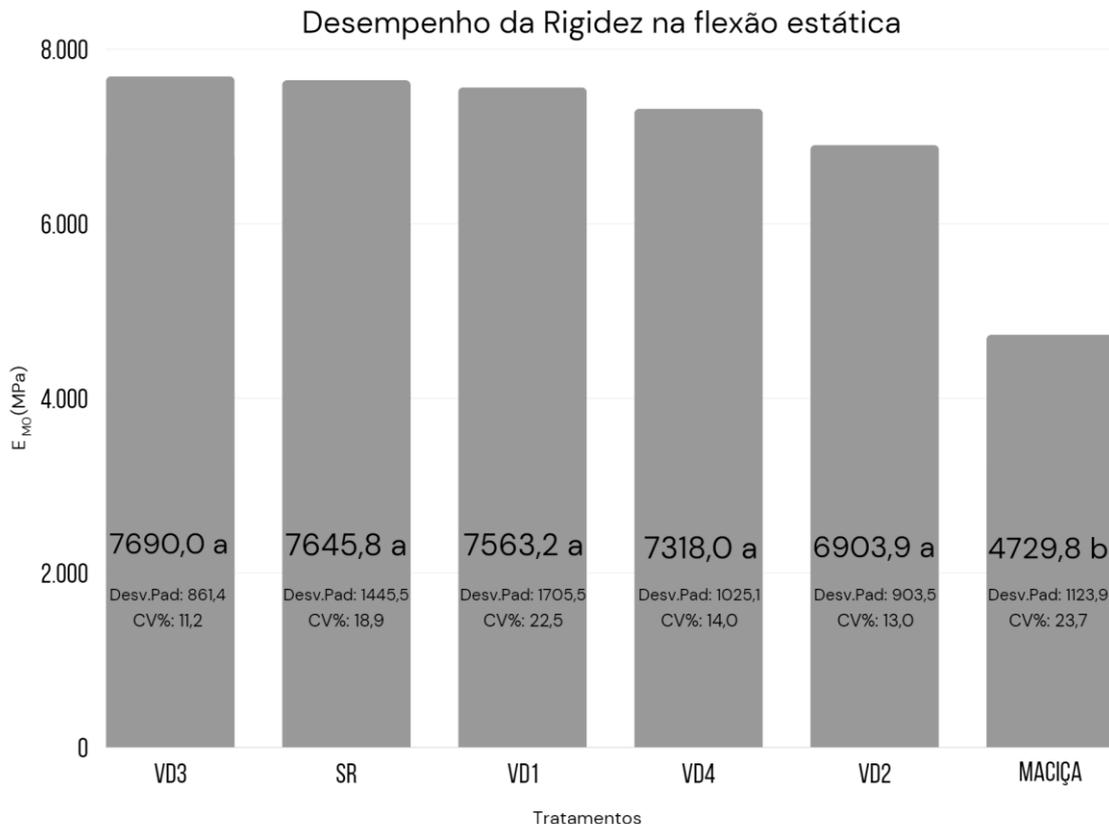
É de grande relevância compreender por que o resultado de um tratamento ter demonstrado uma melhoria na resistência à flexão (MOR) em comparação com a madeira sem tratamento (maciça), especialmente no contexto de sua aplicação em estruturas. A melhoria na resistência à flexão por meio de reforços em fibra significa que é possível utilizar uma quantidade menor de madeira para atender aos requisitos de resistência – redução de seção. Isso se traduz em eficiência de recursos, uma vez que menos madeira é necessária para uma aplicação específica. Isso é relevante tanto do ponto de vista econômico quanto ambiental, contribuindo para a sustentabilidade ao reduzir o consumo de recursos naturais.

A aplicação de MLC com maior MOR em estruturas aumenta a resistência do sistema construtivo. Estruturas mais resistentes à flexão têm menos probabilidade de deformação excessiva ou falha estrutural, o que é crucial para garantir a segurança das pessoas e a integridade das edificações.

### 5.1.2 Rigidez – módulo de elasticidade

Na Figura 29, são apresentados os resultados relacionados à rigidez das vigas, abrangendo os ensaios de flexão tanto a 4 pontos quanto a 3 pontos.

Figura 29. Desempenho da Rigidez na flexão estática



Legenda:  $E_{M0}$  = rigidez média à flexão estática a 12% de umidade; Maciça = tratamento sem presença de emenda; SR = tratamento com emendas, MLC convencional; VD1 = tratamento com emendas, MLC com uma camada de reforço em fibra de vidro; VD2 = tratamento com emendas, MLC com duas camadas de reforço em fibra de vidro; VD3 = tratamento com emendas, MLC com três camadas de reforço em fibra de vidro; VD4 = tratamento com emendas, MLC com quatro camadas de reforço em fibra de vidro; \* Médias seguidas de letras iguais na mesma coluna não diferenciam entre si pelo teste de Tukey ( $p > 0,05$ ). Fonte: Elaborada pela autora (2023).

No estudo realizado por Dias e Starguelin (2017, p. 4) com madeira de *Eucalyptus sp.*, foram investigadas diferentes condições de emenda por entalhes múltiplos e a aplicação de reforços. Os tratamentos utilizados no estudo foram os seguintes: T1 Peças sem emenda; T2 Peças com emenda, mas sem reforço; T3 Peças com emenda reforçada com compósito de fibra de vidro. T4 Peças com emenda reforçada com fibra natural (curauá). O objetivo do autor era avaliar como a existência

de emendas dentadas e a aplicação de reforços afetariam as propriedades da madeira. Dias e Starguelin (2017, p. 4) obtiveram para módulo de elasticidade a flexão os valores de 22.250MPa, 22.557MPa, 27.956MPa e 21.389MPa, respectivamente.

No estudo acima mencionado, observou-se um aumento de 7,5% na resistência à flexão no tratamento "T2" em relação ao tratamento "T1". Já neste estudo, foi obtido um aumento de 61,9% na resistência à flexão para o tratamento "SR" em relação ao tratamento "Maciça". Autor observou também um aumento de 20,7% na resistência à flexão no tratamento "T3" em relação ao tratamento "T1". Já neste estudo, foi obtido um aumento de 59,9% na resistência à flexão para o tratamento "VD1" em relação ao tratamento "Maciça".

Os resultados evidenciam que os tratamentos empregados neste estudo conseguiram promover uma melhoria mais significativa nas propriedades mecânicas da madeira, em comparação aos tratamentos utilizados no estudo anterior, mesmo a matéria prima utilizada na confecção dos elementos sendo de resistência inferior. Portanto, as técnicas de finger joint, colagem e outros processos de preparo da Madeira Laminada Colada descritas neste estudo, demonstraram-se eficientes quanto a melhoria do módulo de elasticidade dos elementos.

Em estudo realizado por Silva (2022, p. 105), foi obtido módulo de elasticidade para corpos de madeira maciça em *Pinus taeda*, valor de 9.734 MPa. Valores do autor se aproximaram de valores encontrados para outras espécies, como 9.800 MPa para o *Pinus sylvestris* (Ling et al., 2020, p. 2), 9.760 MPa para o Álamo de rápido crescimento (LU et al., 2015, p. 24), 10.434 MPa para o *Pinus elliottii* (Donadon et al., 2020, p. 2). Em um estudo realizado por Lenzi et al. (2018, p.133), foram fabricadas sete vigas de madeira laminada colada da espécie *Pinus Taeda*, utilizando o adesivo Melamina Uréia Formaldeído MUF e aplicando reforço com fibras de vidro entre as lamelas, com variações na posição de aplicação do reforço entre diferentes vigas. Os resultados obtidos para o módulo de elasticidade à flexão (MOE) variaram entre 8.798,34 e 10.601,43 MPa.

Os resultados obtidos no presente estudo demonstraram valores inferiores de módulo de elasticidade à flexão (MOE) em relação aos estudos anteriormente citados. Especificamente, o tratamento de madeira maciça neste estudo registrou valores cerca de 46,28% abaixo do menor valor de MOE relatado por Lenzi et al. (2018, p. 133), e cerca de 51,41% em relação aos resultados obtidos por Silva (2022, p. 105). Este fato, evidencia uma diferença significativa na rigidez à flexão da madeira da

espécie *Pinus Taeda* entre os estudos. Portanto, a influência direta da matéria-prima de madeira utilizada neste estudo, também afetou os demais tratamentos aplicados. Diante das divergências nos valores de módulo de elasticidade à flexão (MOE) em comparação com estudos anteriores, é importante considerar que a variação nos resultados pode ter sido influenciada pelo método de teste utilizado. Notavelmente, este estudo empregou o teste a 4 pontos, ao passo que os estudos citados adotaram o teste a 3 pontos. Essa diferença na metodologia de ensaio também pode ter contribuído para as disparidades observadas na rigidez à flexão da madeira de *Pinus taeda* entre os diversos estudos, reforçando a relevância de aspectos metodológicos na interpretação e comparação dos resultados obtidos.

Os tratamentos que incluíram reforço em fibras de vidro, embora tenham proporcionado melhorias na resistência à flexão em relação à madeira maciça – por exemplo, melhoria de 62.53% em VD3, ainda não foram capazes de elevar os valores de MOE aos níveis obtidos por Lenzi et al. (2018, p. 133) e Silva (2022, p. 105).

Os tratamentos VD3 e SR mostraram MOE mais alto quando comparados aos demais tratamentos, conforme ilustrado na figura 29. Segundo Moreschi (2012, p.174), madeiras com maior módulo de elasticidade, tem maior densidade e resistência. Uma vez que a densidade da madeira utilizada em todos os tratamentos foi distribuída de forma aleatória, não havendo uma seleção específica para um tratamento em detrimento de outro, isso garantiu que os resultados obtidos fossem representativos da variabilidade dos tratamentos aplicados, sem viés em relação à densidade.

A observação de que o tratamento VD3, que inclui três camadas de reforço, não mostrou um impacto significativo no valor do módulo de elasticidade (MOE) em comparação com outros tratamentos, como o tratamento SR, que não inclui camadas de reforço, é um aspecto importante a ser considerado. Uma possível explicação para essa observação é que a adição de camadas de reforço pode não ter um efeito significativo na elasticidade da peça, pelo menos nas condições e parâmetros específicos do estudo.

Além disso, a análise dos resultados pode sugerir que a quantidade de camadas de reforço usada nos tratamentos não foi suficiente para causar um impacto mensurável no MOE em comparação com tratamentos sem reforço e maciça.

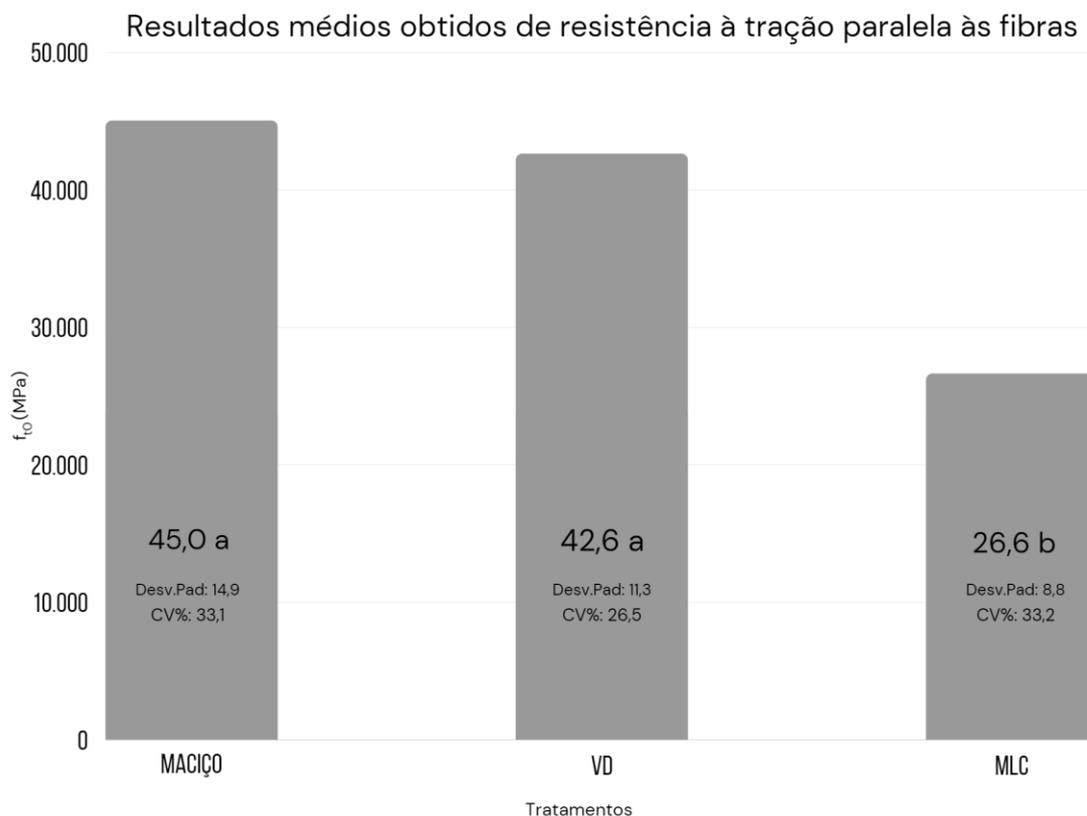
## 5.2 TRAÇÃO PARALELA ÀS FIBRAS

Neste capítulo, são abordados os resultados e discussões do teste de resistência à tração paralela às fibras em vigas de madeira maciça, vigas em MLC reforçadas com fibras de vidro e vigas MLC sem reforço.

### 5.2.1 Resistência à tração paralela às fibras

Utilizando-se os dados obtidos em ensaio de tração paralela, obtiveram-se os resultados conforme ilustra a figura 31.

Figura 30. Resultados médios obtidos de resistência à tração paralela às fibras



Legenda:  $F_{10}$  = resistência à tração paralela às fibras a 12% de umidade; Maciça = tratamento sem presença de emenda; MLC = tratamento com emendas finger joints, MLC convencional; VD = tratamento com emendas finger joints, MLC com uma camada de reforço em fibra de vidro; Fonte: Elaborada pela autora (2023).

A NBR 7190(1997) traz como referência para *Pinus taeda* os valores contidos na Tabela 5. A madeira da espécie em questão se enquadra na classe de resistência C-30 (quando em umidade 12%).

Tabela 2. Propriedades físico-mecânicas do *P. taeda* segundo a NBR-7190(1997).

Nome comum (coníferas)	Nome Científico	$\rho_{ap}$ Kg/m <sup>3</sup>	$f_{co}$ MPa	$f_{to}$ MPa	$f_{t90}$ MPa	$f_v$ MPa	$E_{co}$ MPa	n
<i>Pinus taeda</i>	<i>Pinus taeda L.</i>	645	44,4	82,2	2,8	7,7	13.304	15

Onde:

- $\rho_{ap}$  Massa específica aparente  
 $f_{co}$  Resistência à comp. paralela as fibras  
 $f_{to}$  Resistência à tração paralela às fibras  
 $f_{t90}$  Resistência normal às fibras  
 $f_v$  Resistência ao cisalhamento  
 $E_{co}$  Módulo de elasticidade longitudinal – comp. Paralela às fibras

Notas:

1. Coeficiente de variação para resistências a solicitações normais 18%.
2. Coeficiente de variação para resistências a solicitações tangenciais 28%.

Fonte: adaptado de NBR-7190(1997).

No presente estudo, os resultados obtidos para a resistência à tração ( $F_{t0}$ ) foram substancialmente inferiores ao valor de referência estabelecido pela norma, registrando-se um valor de 45,06 MPa. Esta disparidade significativa entre os resultados experimentais e o padrão normativo de 82,2 MPa ( $F_{t0}$ ) sugere que o material utilizado nas análises possui uma resistência à tração abaixo do especificado pelas diretrizes normativas. A análise crítica desses resultados ressalta não apenas a necessidade de uma prévia avaliação criteriosa da qualidade do material empregado na pesquisa, mas também destaca que o coeficiente de variação foi superior a 18% em relação ao normativo, adicionando uma camada de complexidade à interpretação dos dados. Ressalta-se a possibilidade de que os demais tratamentos estudados possam ser afetados pela inferioridade da matéria-prima utilizada, o que levanta importantes questões sobre a viabilidade e a eficácia desses tratamentos se em condições de material dentro dos parâmetros especificados em norma.

Raftery & Harte (2013, p. 726), quando estudaram a espécie Irish-Grown Sitka Spruce, obtiveram resistência máxima à tração paralela às fibras de 104 MPa para corpos de prova maciços e de 45 MPa para os corpos de prova com emendas por entalhes múltiplos. Isso significa que obtiveram uma eficiência de apenas 43,3% com relação à madeira maciça. Em relação à resistência à tração no presente estudo, os

resultados demonstraram uma diferença significativa entre as amostras de madeira maciça (MACIÇO) e aquelas submetidas ao processo de laminação colada (MLC), indicando uma redução de 40,47% na resistência à tração nas amostras de MLC.

Essa diferença sugere que a presença do finger joint, que é característico do processo de MLC, pode prejudicar a resistência da madeira à esforços de tração.

Entretanto, é importante notar que, estatisticamente, as amostras de MLC reforçada com fibra de vidro (tratamento "VD") e as amostras de madeira maciça (tratamento "MACIÇO") não apresentaram diferenças significativas em relação a resistência à tração. Além disso, vale ressaltar que as amostras de MLC reforçadas com fibra de vidro (VD) também incluíram a presença do finger joint, o que demonstra que a aplicação do reforço em fibra de vidro foi eficaz em melhorar as propriedades da madeira, equiparando-as às da madeira maciça.

Em um estudo conduzido por Bui, Milner e Williams (1996, *apud* Dias e Starguelin, 2017, p. 2), foram empregados compósitos de fibra de vidro e resina epóxi com o objetivo de reforçar as emendas dentadas. Os resultados obtidos revelaram melhorias na resistência à tração, com incrementos de 40% a 60% ao aplicar tecidos de fibra de vidro.

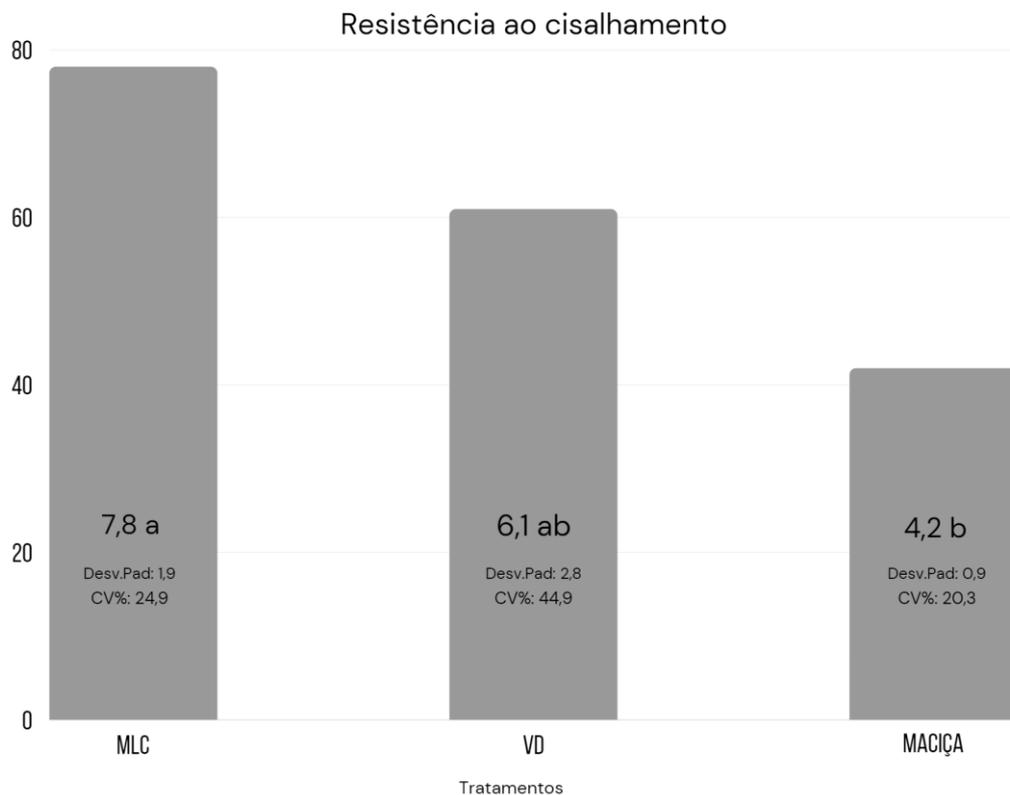
Szücs (1992, *apud* Fiorelli, 2005, p. 19) também propôs uma estratégia de reforço utilizando um tecido de fibra de vidro com fios orientados, disposto de forma cruzada em relação às fibras da madeira, em vigas de MLC. Como resultado, foi possível alcançar um aumento de aproximadamente seis vezes na resistência à tração nessa direção.

É importante observar que, em comparação com o estudo de Bui, Milner e Williams (1996, *apud* Dias e Starguelin, 2017, p. 2), este estudo também demonstrou uma melhoria significativa de aproximadamente 60.15% no tratamento "VD" em relação ao tratamento "MLC". No entanto, é necessário destacar que os resultados deste estudo se distanciaram consideravelmente das melhorias alcançadas no estudo de Szücs (*apud* Fiorelli, 2005, p. 19).

### 5.3 CISALHAMENTO

Seguindo-se a metodologia estabelecida pela Association Française de Normalization (AFNOR)-NF B 5-32, obtiveram-se os resultados de resistência ao cisalhamento presentes na figura 31.

Figura 31. Resultados resistência ao cisalhamento



Legenda: Resistência média ao cisalhamento a 12% de umidade; MACIÇA = tratamento sem presença de emenda; MLC = tratamento com emendas, MLC convencional; VD = tratamento com emendas, MLC com uma camada de reforço em fibra de vidro; \* Médias seguidas de letras iguais na mesma coluna não diferenciam entre si pelo teste de Tukey ( $p > 0,05$ ). Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Arruda (1995, p. 49) obteve resultados de cisalhamento em um estudo utilizando também *Pinus taeda*, com uma média de 5,52 MPa. No presente estudo, os resultados de cisalhamento para os tratamentos MLC, VD e MACIÇA foram obtidos, com médias de 7,8 MPa, 6,1 MPa e 4,2 MPa, respectivamente. Esses resultados indicam que, em comparação com a pesquisa de Arruda (1995, p. 49), os tratamentos MLC e VD apresentaram valores mais elevados de cisalhamento da madeira, enquanto o tratamento MACIÇA obteve um valor inferior, sugerindo uma possível influência das características da madeira ou das condições do estudo nas diferenças

observadas. No presente estudo, os resultados de cisalhamento para os tratamentos MLC, VD e MACIÇA indicam que houve uma melhoria de aproximadamente 41,42%, 10,15% e 23,91% respectivamente, em comparação com a pesquisa de Arruda (1995).

Em um estudo conduzido por Bohn (1995, p. 41), a média de resistência ao cisalhamento encontrada foi de 5,522 MPa para a madeira de *Pinus taeda*. Comparativamente, Bianchi (2020) identificou uma faixa de resistência ao cisalhamento na linha de cola para o *Eucalyptus grandis*, com adesivo poliuretano bicomponente, variando de 6 a 8 MPa. Já Silva (2022, p. 121) obteve um valor de 5,2 MPa para o Eucalipto.

Em comparação com os resultados de Bohn (1995, p. 41), a resistência ao cisalhamento da madeira maciça neste estudo (4,2 MPa) ficou abaixo, enquanto os tratamentos VD (6,1 MPa) e MLC (7,8 MPa) se aproximaram dos valores relatados por Bianchi (2020) para o *Eucalyptus grandis* com adesivo poliuretano bicomponente. Silva (2022, p. 121) também obteve resultados próximos (5,2 MPa) para o eucalipto, sugerindo uma similaridade no desempenho em relação ao cisalhamento.

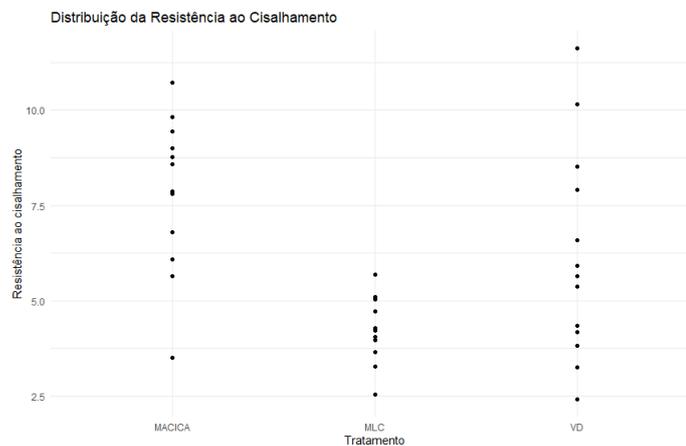
A análise dos resultados obtidos revelou que a introdução da linha de cola no tratamento "MLC" resultou em uma melhoria significativa de 85,71% na resistência ao cisalhamento em comparação com o tratamento "Maciça".

O tratamento "VD" apresentou uma resistência ao cisalhamento inferior à do tratamento "MLC", sugerindo que a presença da fibra de vidro pode ter afetado a aderência da linha de cola, resultando em um desempenho de apenas 45,24% a mais em relação a "MACIÇA",

O tratamento "Maciça," que representou a madeira natural sem adições, exibiu a menor variação, com um desvio padrão de apenas 0,9 MPa e um coeficiente de variação de 20,3%, inferior ao valor de 28% trazido em normativa. Isso sugere que a madeira maciça teve resultados mais consistentes e previsíveis em termos de resistência ao cisalhamento, já que não foram introduzidos elementos adicionais que pudessem influenciar significativamente suas propriedades. Este teve o resultado seguido pelo tratamento "MLC," que consistiu na utilização de uma linha de cola no meio das amostras, a variação foi moderada, com um desvio padrão de 1,9 MPa e um coeficiente de variação de 24,9%. Isso sugere uma consistência razoável nos resultados desse tratamento, indicando que a aderência da linha de cola se manteve relativamente estável.

Por outro lado, o tratamento "VD," que envolveu a adição de uma camada de fibra de vidro junto à linha de cola, apresentou uma variação mais ampla, conforme ilustrado na figura 32, com um desvio padrão de 2.8 MPa e um coeficiente de variação de 44.9%. Essa maior variação indica que a presença da fibra de vidro teve um impacto nas propriedades de cisalhamento, tornando os resultados mais dispersos. Portanto, enquanto houve uma melhoria significativa na resistência ao cisalhamento com a adição da fibra de vidro, porém também foi observada uma maior variabilidade nos resultados, o que pode ser um aspecto a ser considerado na avaliação desse tratamento em aplicações práticas.

Figura 32. Distribuição dos resultados de resistência ao cisalhamento

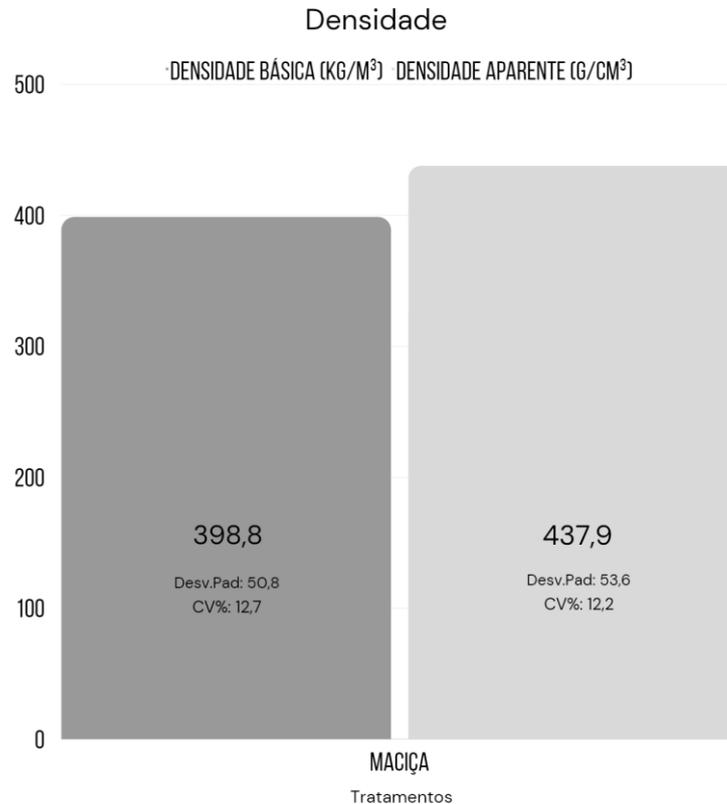


Legenda: Resistência média ao cisalhamento a 12% de umidade; MACIÇA = tratamento sem presença de emenda; MLC = tratamento com emendas, MLC convencional; VD = tratamento com emendas, MLC com uma camada de reforço em fibra de vidro; Fonte: Elaborada pela autora (2023).

### 5.3 DENSIDADE

Na figura 33 são apresentados os valores obtidos para densidade básica e densidade aparente da madeira da espécie *Pinus taeda*.

Figura 33. Densidade da madeira *Pinus taeda*



Legenda: Densidade básica e aparente; Maciça = tratamento sem presença de emenda; Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Segundo a NBR-7190(1997) a densidade aparente média a 12% de umidade encontrada para a espécie *Pinus taeda* foi de 645 kg/m<sup>3</sup> (conforme tabela 4, p. 59), para a matéria prima das vigas analisadas, este valor médio foi de 437,90 kg/m<sup>3</sup>, 32,09% inferior ao descrito na norma.

Os resultados obtidos no presente estudo demonstraram uma proximidade considerável em relação aos valores encontrados por Lermen (2014, p. 36) em sua pesquisa com *Pinus taeda*. A densidade básica média de 398,800 kg/m<sup>3</sup> e a densidade aparente de 437,900 g/cm<sup>3</sup> neste estudo se aproximam dos valores de 368,68 kg/m<sup>3</sup> e 426,25 kg/m<sup>3</sup> encontrados por Lermen (2014, p. 36), respectivamente. Essa similaridade indica uma consistência nas características da madeira utilizada em ambos os estudos.

Em um estudo realizado por Silva (2022, p. 108), foram avaliadas propriedades da madeira de *Eucalyptus urophylla* COP 1404. Os resultados indicaram uma densidade média ( $\rho_m$ ) das peças de 552,09 kg/m<sup>3</sup> a 12% de umidade, bem como uma

densidade característica ( $\rho_k$ ) de 487,10 kg/m<sup>3</sup>. Comparativamente, no presente estudo, utilizando madeira de *Pinus taeda*, obteve-se uma densidade média ( $\rho_m$ ) de 437,90 kg/m<sup>3</sup>. Portanto, observa-se que a madeira de *Eucalyptus urophylla* apresentou uma densidade superior em relação à madeira de *Pinus taeda*, o que sugere que a primeira pode oferecer propriedades mecânicas superiores em algumas aplicações, proporcionando maior resistência e durabilidade. Essa diferença na densidade entre as espécies pode ser um fator relevante a ser considerado em escolhas de materiais em projetos que requerem uma maior capacidade estrutural.

## 6 CONCLUSÕES

Por meio das análises realizadas neste experimento, foi possível concluir que a madeira maciça de *Pinus taeda* utilizada, registrou valores de resistência à flexão ( $E_{M0}$ ), resistência à tração ( $f_{t0}$ ), cisalhamento e densidade inferiores aos apresentados por demais autores e normativas. Estes resultados, evidenciam a baixa resistência do material utilizado, demonstrando que este não é adequado ao uso estrutural tal como normatizado pela NBR 7190.

Foi possível também concluir que a adição de reforços em fibra de vidro tem a capacidade de promover melhora na resistência mecânica dos elementos.

Houve ganho de resistência mecânica do MLC com aplicação de fibras de vidro como reforço, em comparação ao MLC convencional sem reforço. Apresentaram melhora o Módulo de Ruptura (MOR), Módulo de Elasticidade (MOE) e a resistência à tração. Observou-se uma piora na resistência da linha de cola, mostrando que presença da fibra prejudicou a aderência entre as lamelas. Entretanto resultado da aplicação de reforço em fibra de vidro ainda se mostra positivo quanto ao cisalhamento, tendo desempenho superior em relação a Maciça.

Houve ganho de resistência mecânica do MLC com aplicação de fibras de vidro como reforço, em comparação a madeira maciça. Apresentaram melhora os resultados de Módulo de Elasticidade (MOE), Resistência à Ruptura na Flexão (MOR) e resistência ao cisalhamento. No caso da resistência à tração ( $f_{t0}$ ), o tratamento VD registrou um valor cerca de 5,33% inferior ao da madeira maciça, indicando que a adição da camada de vidro não foi suficiente para superar o desempenho da madeira maciça neste aspecto específico.

Tratamentos com a presença de reforços em fibra de vidro, exibiram médias estatisticamente semelhantes na resistência à flexão ( $f_M$ ), indicando que a adição de camadas de reforço não teve impacto mensurável no valor do Módulo de Ruptura.

Os resultados indicam que o MLC (Madeira Lamelada Colada) sem reforço, apresentou melhora em relação a madeira maciça. Obteve-se melhora no Módulo de Elasticidade (MOE), Resistência à Ruptura na Flexão (MOR) e resistência ao cisalhamento. Estes resultados demonstram eficiência dos processos de classificação, preparo e colagem das lamelas. Entretanto, é importante destacar que, no que diz respeito à resistência à tração, o tratamento MLC demonstrou uma desvantagem significativa em relação à madeira maciça, apresentando uma redução de cerca de 40,8%. Isso evidencia a necessidade de aprimorar os processos de fabricação do finger joint do MLC para fortalecer essa propriedade mecânica específica.

## **7 RECOMENDAÇÕES**

A qualidade inferior da matéria-prima utilizada aponta para a importância de conduzir testes preliminares e eliminatórios nesse material. Isso assegurará que as vigas sejam produzidas exclusivamente com materiais estruturais adequados, o que é fundamental para alcançar todo o potencial de resultados do estudo.

O teste de tração revelou fragilidade no finger joint, e a falta de dados adicionais limitou a identificação precisa dos fatores envolvidos. Portanto, em trabalhos futuros, explorar diferentes geometrias ou adesivos permitiria uma análise mais aprofundada para determinar o impacto de cada elemento na resistência à tração do finger joint.

No ensaio de cisalhamento, observa-se que a adição da camada de fibra de vidro resultou em melhorias na resistência, porém, parece prejudicar a união entre os elementos. Recomendamos que futuros trabalhos incluam testes adicionais, como o teste de delaminação conforme a norma NBR-7190 (2022) no Anexo 6, ou explorem diferentes métodos de colagem dos reforços para identificar a abordagem mais eficaz.

Não foi possível mensurar o impacto da variação na quantidade de camadas de reforço no estudo atual. Portanto, recomenda-se que pesquisas futuras explorem a utilização de um maior número de lamelas, possibilitando um espaçamento mais significativo entre os reforços. Isso permitirá determinar a quantidade ideal de reforço

que otimiza o desempenho das vigas e torna mensurável a influência desse parâmetro.

## 8 BIBLIOGRAFIA

ANDRÉ, A.; JOHNSON, H. Flax Fiber-Reinforced Glued-Laminated Timber in Tension Perpendicular to the Grain: Experimental Study and Probabilistic Analysis. **Journal Of Materials In Civil Engineering**, Miami, v. 22, n. 9, p. 827-835, set. 2010. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000070](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000070). Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/260036962\\_Natural\\_fibre\\_composites\\_for\\_strengthening\\_of\\_gluedlaminated\\_timber\\_in\\_tension\\_perpendicular\\_to\\_the\\_grain/stats](https://www.researchgate.net/publication/260036962_Natural_fibre_composites_for_strengthening_of_gluedlaminated_timber_in_tension_perpendicular_to_the_grain/stats). Acesso em: 14 out. 2023.

ARRUDA, H. A. C. **Influência da classificação das lâminas em vigas de madeira laminada-colada**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1995. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/111816>. Acesso em: 4 out. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MADEIRA PROCESSADA MECANICAMENTE. **Estudo sensorial 2007 ano base 2006: indústria de madeira processada mecanicamente**. Curitiba, 2007. Disponível em: <https://abimci.com.br/>. Acesso em: 4 out. 2023.

AZAMBUJA, M. A. **Avaliação do adesivo poliuretano a base de mamona para fabricação de madeira laminada colada (MLC)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/88/88131/tde-11072017-151910/pt-br.php>. Acesso em: 4 out. 2023.

Azambuja, M.A., Carreira, M.R., Dias, A.A., Fiorelli, J., Carrasco, E.V.M., Duarte, R.S., DIAS, G.L., Szücs, C.A., Valle, A. Proposta de normalização para Madeira Laminada Colada (MLC). **Revista Madeira: arquitetura e engenharia**, v. 5, n. 13, P. 10, maio/ago. 2004. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/001396182>. Acesso em: 4 out. 2023.

BALLARIN, A.W. & PALMA, H.A.L. Propriedades de resistência e rigidez da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* L. **Revista Árvore**, v. 27, n. 3, p. 371-380, Viçosa-MG, jun. 2003. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622003000300014>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rarv/a/nFCF6T6gwgCnxLBMpkhHjYD/>. Acesso em: 4 out. 2023.

BERTOLINO, C. A. A., MASCIA N.T., BASAGLIA C.D., DONADON B.F. Analysis of Fiber Reinforced Laminated Timber Beams. **Key Engineering Materials**, v. 668, p. 100-109, out. 2015. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.668.100>. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/283787623\\_Analysis\\_of\\_Fiber\\_Reinforced\\_Laminated\\_Timber\\_Beams](https://www.researchgate.net/publication/283787623_Analysis_of_Fiber_Reinforced_Laminated_Timber_Beams). Acesso em: 10 out. 2023.

BERTOLINO, C. A. A. **Estudo teórico de vigas de madeira laminada colada reforçadas por fibras sintéticas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), Campinas, 2015. Disponível em: <https://www.repositorio.unicamp.br/acervo/detalhe/946870?guid=1697385294757&returnUrl=%2fresultado%2fflistar%3fguid%3d1697385294757%26quantidadePaginas%3d1%26codigoRegistro%3d946870%23946870&i=1>. Acesso em: 10 out. 2023.

BOHN, A. R. **Influência da espessura das lâminas e da cola na madeira laminada colada**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1995. Disponível em: <https://core.ac.uk/display/30357371>. Acesso em: 10 out. 2023.

BOURSCHEID, C.B.; **Avaliação Tecnológica de Emendas por Entalhes Múltiplos reforçadas com Fibras para Madeira Laminada Colada**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal), Centro de Ciências Agroveterinárias, Universidade do Estado de Santa Catarina. Lages, 2017. Disponível em: [https://www.udesc.br/arquivos/cav/id\\_cpmenu/1484/DISSERTA\\_\\_O\\_Cleide\\_Bourscheid\\_1568210452964\\_1484.pdf](https://www.udesc.br/arquivos/cav/id_cpmenu/1484/DISSERTA__O_Cleide_Bourscheid_1568210452964_1484.pdf). Acesso em: 10 out. 2023.

CALIL NETO, C. **Madeira Laminada Colada (MLC): controle de qualidade em combinações espécie – adesivo – tratamento preservativo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências dos Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011. DOI: <https://doi.org/10.11606/D.88.2011.tde-19042011-171909>. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/88/88131/tde-19042011-171909/pt-br.php>. Acesso em: 10 out. 2023.

CARREIRA, M. R.; **Critérios para classificação visual de peças estruturais de Pinus Sp.** 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2003. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-02082003-215557/publico/mrcarreira.pdf>. Acesso em: 10 out. 2023.

CUNHA, A. B. ; MATOS, J. L. M. Estimativa do módulo de elasticidade em vigas laminadas coladas pelos métodos estático e dinâmico. **FLORESTA**, Curitiba, v. 41, n. 1, p. 97-112, jan./mar 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/ufpr.v41i1.21189>. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/floresta/article/viewFile/21189/13978>. Acesso em: 10 out. 2023.

CUNHA. A.B.; MATOS J.L.M.; Avaliação da rigidez de vigas estruturais de madeira laminada colada unidas por adesivo poliuretano. **Cerne**, Lavras, v. 17, p. 593-600, out./dez. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0104-77602011000400019>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cerne/a/Wj4LyJKd8xkgnzKNLVyvWFF/?lang=pt#>. Acesso em: 14 out. 2023.

DE JESUS, J.M.H.; **Estudo do adesivo de poliuretano à base de mamona em madeira laminada colada (MLC)**. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2000. DOI: <https://doi.org/10.11606/T.88.2016.tde-16092016-161024>. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/88/88131/tde-16092016-161024/pt-br.php>. Acesso em: 14 out. 2023.

DIAS, A. A.; STARGUELIN, L. **Emendas Dentadas Reforçadas com Fibras de Vidro e Naturais para Utilização em Madeira Laminada Colada**, 2001. Anais UNNOBA, Buenos Aires, Argentina, 2017.

DIAS, M., F. M., FIORELLI, J. , LAHR, F. A. R. , DIAS, A. A. D. A utilização de fibra de vidro como reforço em Madeira Compensada. **Revista Madeira: arquitetura e engenharia**, v.10, n. 5, jan/jun. 2003. Disponível em: <http://madeira.set.eesc.usp.br/article/download/389/pdf>. Acesso em: 14 out. 2023.

DONADON, B. F.; MASCIA, N. T.; VILELA, R.; TRAUTWEIN, L. M. Experimental investigation of glued-laminated Timberg beams with Vectran-FRP reinforcement. **Engineering Structures**, Campinas, v. 202, p. 109818-109829, jan. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109818>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029619325672?via%3Dihub>. Acesso em: 14 out. 2023.

FAGUNDES, H. A. V. **Diagnóstico da produção de madeira serrada e geração de resíduos do processamento de madeira de florestas plantadas no Rio Grande do Sul**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/4567>. Acesso em: 14 out. 2023.

FIORELLI, J. ; DIAS, A. A. Fiberglass-reinforced glulam beams: mechanical properties and theoretical model. **Materials Research**, v. 9, n. 3, p. 263–269, set. 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1516-14392006000300004>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/mr/a/fJNhm8Wg3NPtq9GSMcfvTpy/?format=html&lang=en>. Acesso em: 10 out. 2023.

FIORELLI, J. **Estudo teórico e experimental de vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibra de vidro**. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/dis>

poniveis/88/88131/tde-19072005-110613/publico/tesejuliano.pdf. Acesso em: 20 set. 2023.

FIORELLI, J.; DIAS, A. A. Avaliação do Comportamento da Madeira na Compressão Paralela às Fibras e Sua Influência na Resistência de Vigas de MLC Reforçadas com PRF. **Madeira Arquitetura e Engenharia**, v.16, 2005. Disponível em: <http://madeira.set.eesc.usp.br/article/view/246>. Acesso em: 10 out. 2023.

FOSSETTI, M. MINAFÒ, G. PAPIA, M. Flexural behaviour of glulam timber beams reinforced with FRP cords. **Construction and Building Materials**, v. 95, p. 54-64, out. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.116>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061815301379>. Acesso em: 09 out. 2023.

FURTADO, F.R.C.; TEREZO, R.F. Certificação para madeira laminada colada. **Revista do Instituto Florestal**, São Paulo, v. 26, n. 1, p. 117–125, 2014. DOI: 10.4322/rif.2014.009. Disponível em: <https://rif.emnuvens.com.br/revista/article/view/175>. Acesso em: 14 out. 2023.

GLIŠOVIĆ, I.; STEVANOVIĆ, B.; PETROVIĆ, M. Bending behavior of glulam beams reinforced with carbon FRP plates. **Journal of Civil Engineering and Management**, v. 21, n. 7, p. 923-932, 2015. DOI: <https://doi.org/10.3846/13923730.2014.897969>. Disponível em: <https://journals.vilniustech.lt/index.php/JCEM/article/view/2694>. Acesso em: 4 set. 2023.

GRAEFF, A. **Estudo da madeira laminada colada com emendas de topo reforçadas com fibra de vidro**. Dissertação (Mestrado em Materiais e Processos Construtivos) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1995. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/111828>. Acesso em: 4 set. 2023.

HABIPI, B., AJDINAJ, D. Study of five joint slope angels on bending strength of poplar wood (*Populus alba* L.) finger joint connection. **International Journal of Current**

**Engineering and Technology**, v. 3, n. 5, p. 1973-1976, dez. 2013. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/327338727\\_Study\\_of\\_five\\_joint\\_slope\\_angles\\_on\\_bending\\_strength\\_of\\_poplar\\_wood\\_Populus\\_alba\\_L\\_finger\\_joint\\_connection](https://www.researchgate.net/publication/327338727_Study_of_five_joint_slope_angles_on_bending_strength_of_poplar_wood_Populus_alba_L_finger_joint_connection). Acesso em: 4 set. 2023.

HABIPI, B.; ÇOTA, H.; KODRA, A. The effect of fingers tips position on tensile strength of finger joint connection. **Journal of International Academic Research for Multidisciplinary**. v. 4, n. 1., p. 133-139, fev. 2016. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/330620327\\_THE\\_EFFECT\\_OF\\_FINGERS\\_TIPS\\_POSITION\\_ON\\_TENSILE\\_STRENGTH\\_OF\\_FINGER\\_JOINT\\_CONNECTION\\_BESNIK\\_HABIPI\\_HOLTA\\_COTA\\_AGRON\\_KODRA](https://www.researchgate.net/publication/330620327_THE_EFFECT_OF_FINGERS_TIPS_POSITION_ON_TENSILE_STRENGTH_OF_FINGER_JOINT_CONNECTION_BESNIK_HABIPI_HOLTA_COTA_AGRON_KODRA). Acesso em: 4 set. 2023.

IBA - Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório Anual 2022**. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2022-compactado.pdf>. Acesso em: 4 set. 2023.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA DO BRASIL – **INMET**. Normais Climatológicas (1991/2020). Brasília - DF, 2022.

IWAKIRI S. et al. Avaliação da resistência de juntas coladas da madeira de *Eucalyptus benthamii* com diferentes adesivos e faces de colagem. **ScientiaForestalis**. Piracicaba, v. 41, n. 99, p. 411-416, set. 2013. Disponível em: <http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br:80/handle/123456789/15584>. Acesso em: 5 set. 2023.

JUVENAL, T.L. & MATTOS, R.L.G. **O setor florestal no Brasil e a importância do reflorestamento**. BNDES Setorial, 16:3- 30, 2002. Disponível em: <http://bibliotecaflorestal.ufv.br/handle/123456789/4176?show=full>. Acesso em: 14 out. 2023.

LENZI, F.; MATIAS, P. O.; RISSON, A. V. Análise da Utilização de Fibras de Vidro em Vigas de Madeira Laminada Colada Submetidas à Flexão Simples. REEC - **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v 14, nº 1, 2018. DOI:

<https://doi.org/10.5216/reec.v14i1.44320>. Disponível em: <https://revistas.ufg.br/reec/article/view/44320>. Acesso em: 5 set. 2023.

LERMEN, B. **Avaliação experimental do uso de fibra de vidro no reforço de madeira**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2014. Disponível em: <https://portaldeinformacao.utfpr.edu.br/Record/riut-1-6276/Details>. Acesso em: 5 set. 2023.

LESKO, A. Modern moment resisting timber connections – theory and numerical modelling. **Procedia Engineering**, v. 153, p. 400-406, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.140>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816322883>. Acesso em: 5 set. 2023.

LING, Z.; LIU, W.; SHAO, J. Experimental and theoretical investigation on shear behaviour of small-scale timber beams strengthened with Fiber-Reinforced Polymer composites. **Composite Structures**, v. 240, p. 111989, mai. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.111989>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822319333112>. Acesso em: 7 set. 2023.

LOPEZ-ANIDO,R.; XU, H. Structural Characterization of Hybrid Fiber-Reinforced Polymer-Glulam Panels for Bridge Decks. **Journal of composites for construction**, v. 6, n. 3, p. 194-203, jul. 2002. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2002\)6:3\(194\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2002)6:3(194)). Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%291090-0268%282002%296%3A3%28194%29>. Acesso em: 7 set. 2023.

LU, W.; LING, Z.; GENG, Q.; LIU, W.; YANG, H.; YUE, K. Study on flexural behaviour of glulam beams reinforced by Near Surface Mounted (NSM) CFRP laminates. **Construction And Building Materials**, v. 91, p. 23-31, ago. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.04.050>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061815004936>. Acesso em: 8 set. 2023.

MACEDO, A. N. **Fadiga em emendas dentadas em madeira laminada colada.** 2000. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2000. DOI: <https://doi.org/10.11606/T.18.2018.tde-18052018-202939>. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-18052018-202939/pt-br.php>. Acesso em: 8 set. 2023.

MATTOS, P. P.; SILVA, V. P.; MAGALHÃES, W.L.E.; **Agregação de valor à produção florestal madeireira.** Embrapa, 2004. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/310333>. Acesso em: 8 set. 2023.

MIRSKI, R.; DZIURKA, D.; KULIŃSKI, M.; TROCIŃSKI, A.; KAWALERCZYK, J.; ANTONOWICZ, R. Strength Properties of Structural Glulam Manufactured from Pine (*Pinus sylvestris* L.) Side Boards. **Materials**, v. 14, p. 7312, nov. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14237312>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/23/7312>. Acesso em: 8 set. 2023.

MORESCHI, J. C. **Propriedades da Madeira.** Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná – Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal. 4. ed. Curitiba, 2012. Disponível em: <http://www.madeira.ufpr.br/disciplinasmoreschi/PROPRIEDADES%20DA%20MADEIRA.pdf>. Acesso em: 10 set. 2023.

MUSTEFAGA, E. C. Caracterização físico-mecânica da madeira juvenil de *Pinus*. **Scientia Forestalis**, v. 47, p. 472-481, set. 2019. DOI: [doi.org/10.18671/scifor.v47n123.09](https://doi.org/10.18671/scifor.v47n123.09). Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr123/cap09.pdf>. Acesso em: 8 set. 2023.

NADIR, Y. et al. Flexural stiffness and strength enhancement of horizontally glued laminated wood beams with GFRP and CFRP composites heets. **Construction and Building Materials**, v. 112, p. 547-555, jun. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.133>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061816301921>. Acesso em: 10 set. 2023.

NBR 7190 - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de estruturas de madeira**. Rio de Janeiro: ABNT, 1997, 107p.

NBR 7190 - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de estruturas de madeira**. Rio de Janeiro: ABNT, 2022, 93p.

OLIVER, C.D.; NASSAR, N.T.; LIPPKE, B.R.; MCCARTER, J.B. Carbon, Fossil Fuel, and Biodiversity Mitigation With Wood and Forests. **Journal of Sustainable Forestry**, v. 33, p. 248–275, mar. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1080/10549811.2013.839386>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/citedby/10.1080/10549811.2013.839386?scroll=top&needAccess=true>. Acesso em: 10 set. 2023.

OLIVEIRA, F. L.; LIMA I. L.; GARCIA J. N.; FLORSHEIM S. M. B.; **Propriedades da madeira de Pinus taeda L. em função da idade e da posição radial na tora**. Revista do Instituto Florestal, v. 18, n. 1, p. 59-70, 2006. DOI: <https://doi.org/10.24278/2178-5031.200618324>. Disponível em: <https://rif.emnuvens.com.br/revista/article/view/324>. Acesso em: 10 set. 2023.

PEREZ, P. L.; BACHA, C. J. C. Mercado de madeira serrada. **AgroANALYSIS**, v. 26, n. 8, p. 21-23, ago. 2006. Disponível em: <https://hml-bibliotecadigital.fgv.br/ojs/index.php/agroanalysis/article/view/35630>. Acesso em: 10 set. 2023.

PORTEOUS, J.; KERMANI, A. **Structural Timber Design to Eurocode 5**. Blackwell Publishing, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1002/9780470697818.ch1>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470697818>. Acesso em: 20 ago. 2023.

RAFTERY, G. M.; HARTE, A. M. Low-grade glued laminated timber reinforced with FRP plate. **Composites Part B: Engineering**, v. 42, n. 4, p. 724-735, jun. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.01.029>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836811000576>. Acesso em: 20 ago. 2023.

REMASA REFLORESTADORA S.A. **Plano de Manejo Florestal: Resumo Público**. 7 eds. Grupo Remasa, 2016. Disponível em: <https://remasa.com.br/download-plano-de-manejo/>. Acesso em: 20 ago. 2023.

ROSA, T. O. **Vigas de Madeira Laminada Colada de Paricá (*Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Huber ex Ducke) Barneby) Reforçadas com Fibras Sintéticas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Centro de Ciências Agroveterinárias, Universidade do Estado de Santa Catarina, 2017. Disponível em: [https://www.udesc.br/arquivos/cav/id\\_cpmenu/1484/Disserta\\_\\_o\\_TALITHA\\_OLIVEIRA\\_ROSA\\_15682106227354\\_1484.pdf](https://www.udesc.br/arquivos/cav/id_cpmenu/1484/Disserta__o_TALITHA_OLIVEIRA_ROSA_15682106227354_1484.pdf). Acesso em: 20 ago. 2023.

SANTINI, E. J.; HASELEIN, C. R.; GATTO, D. A. Análise comparativa das propriedades físicas e mecânicas da madeira de três coníferas de florestas plantadas. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 10, n. 1, p.85-93, 2000. Disponível em: <http://bibliotecaflorestal.ufv.br/handle/123456789/12131>. Acesso em: 20 ago. 2023.

SCHOBBER, K.-U. et al. FRP Reinforcement of Timber Structures. **Construction and Building Materials**. v. 97, p. 106-118, out. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.020>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061815007011>. Acesso em: 20 ago. 2023.

SILVA, M. L. de J. S. **Estudo da aderência da fibra de carbono em elementos de madeira laminada colada**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) , Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2022. Disponível em: [https://repositorio.ufba.br/handle/ri/37857?locale=pt\\_BR](https://repositorio.ufba.br/handle/ri/37857?locale=pt_BR). Acesso em: 20 ago. 2023.

TEREZO, R. F. Analysis of glued laminated beams performance of parica species (*Schizolobium Amazonicum* Huber ex. Ducke). **Forest Sciences**, v. 38, n. 87, p. 471-480, set. 2010. Disponível em: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:83299394>. Acesso em: 20 ago. 2023.

TEREZO, R. F. **Avaliação tecnológica do Paricá e seu uso em estruturas de madeira laminada colada**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade

Federal do Estado de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2010. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/94191>. Acesso em: 20 ago. 2023.

ZANGIÁCOMO, A. L. **Emprego de Espécies Tropicais Alternativas na Produção de Elementos Estruturais de Madeira Laminada Colada**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2003. Disponível em: [https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-26052006150001/publico/2003ME\\_AndreLZangiacomo.pdf](https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-26052006150001/publico/2003ME_AndreLZangiacomo.pdf). Acesso em: 20 ago. 2023.

WESTROCK. **Resumo Público do Plano de Manejo**. Três Barras: Divisão Florestal WestRock, 2017. Disponível em: <https://acr.org.br/portfolio/resumo-publico-do-plano-de-manejo-westrock-2017/>. Acesso em: 20 ago. 2023.

ZHANG, X.; ZHANG, Y.; XIE, X. Investigação experimental e analítica do comportamento à flexão de vigas ocas de MLC reforçadas com polímero reforçado com fibras. **Structures**, v. 50, p. 810-822, abr. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.02.018>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352012423001765>. Acesso em: 20 ago. 2023.