

# VIABILIDADE E DESEMPENHO ESTRUTURAL DA MADEIRA FRAGMENTADA COLADA DE *Eucalyptus urograndis*

## VIABILITY AND STRUCTURAL PERFORMANCE OF GLUED FRAGMENTED *Eucalyptus urograndis* TIMBER

OLINDO SAVI<sup>1</sup>, JOÃO HENRIQUE FREITAS<sup>2</sup>, CRISTIANE MENGUE FENIMAN MORITZ<sup>3</sup>, SABRINA AGUIAR DA SILVA<sup>4</sup>, ALAN RIZZATO ESPESSATO<sup>5</sup>, ALINE NAIARA ZITO<sup>6</sup>, MARIANA NATALE FIORELLI FABICHE<sup>7</sup>, SIDNEI REINA COUTINHO<sup>8\*</sup>

1. Olindo Savi, mestre em Engenharia Urbana, professor do Curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá - Campus Regional de Umuarama; 2. João Henrique de Freitas, Mestre em engenharia civil, professor do Curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá - Campus Regional de Umuarama; 3. Cristiane Mengue Feniman Moritz, doutora em Biologia Geral e Aplicada, professora do Curso de Engenharia de Alimentos da Universidade Estadual de Maringá - Campus Regional de Umuarama; 4. Sabrina Aguiar da Silva, mestra em Inovações Tecnológicas em Saneamento e Recursos Hídricos, doutoranda em Engenharia Civil, professora do Curso de Engenharia Civil do Instituto Federal do Mato Grosso do Sul - Campus Aquidauana; 5. Alan Rizzato Espessato, Mestre em engenharia civil, professor do Curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá - Campus Regional de Umuarama; 6. Aline Naiara Zito, mestre em Engenharia Urbana, professora do Curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá - Campus Regional de Umuarama; 7. Mariana Natale Fiorelli Fabiche, Doutora em engenharia civil, professora do Curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá - Campus Regional de Umuarama; 8. Sidnei Reina Coutinho, Tecnólogo em construção civil, Técnico em laboratório da Universidade Estadual de Maringá - Campus Regional de Umuarama.

\* Avenida Dr. Ângelo Moreira da Fonseca, 1800, Parque Danielle, Umuarama, Paraná, CEP: 87506-370. [osavi@uem.br](mailto:osavi@uem.br)

Recebido em 01/04/2026. Aceito para publicação em 08/06/2026

### RESUMO

O estudo se refere a caracterização mecânica de fragmentos da madeira de eucalipto oriundos do desdobramento. O uso da madeira de reflorestamento é fundamental para a sustentabilidade, pois se caracteriza como material de baixo carbono. Sua utilização, contudo, exige uma origem responsável, basicamente proveniente de florestas plantadas com manejo adequado. No contexto brasileiro, o setor de reflorestamento prioriza espécies de rápido crescimento, como o *Eucalyptus urograndis*, com árvores tipicamente entre 12 a 15 anos de idade e, consequentemente, resultando em toras de pequeno diâmetro. Neste cenário, a madeira engenheirada surge como solução tecnológica capaz de compensar as desvantagens da madeira juvenil no que tange às suas características mecânicas. Além disso, o desdobro de toras de pequeno diâmetro gera fragmentos de baixo valor econômico. A colagem desses fragmentos para produzir madeira com dimensões apropriadas agrega valor ao material e permite o aproveitamento integral da tora, evitando que o subproduto seja caracterizado como resíduo e, portanto, descartado. Diversos estudos buscam avaliar as propriedades mecânicas do eucalipto. Este trabalho, em particular, foca no aproveitamento do subproduto do desdobro para produzir material colado com propriedades mecânicas compatíveis com a da Madeira Lame-lada Colada (MLC). Os resultados obtidos indicam que a madeira fragmentada colada, embora apresente propriedades ligeiramente inferiores às da MLC, atende aos requisitos para ser classificada como madeira estrutural com Classe de Resistência Estrutural D50 (densidade), D70 (compressão e módulo de elasticidade) e D24 (resistência à flexão).

**PALAVRAS-CHAVE:** fragmentos de madeira; madeira engenheirada; madeira colada; madeira de eucalipto colada; madeira fragmentada colada.

### ABSTRACT

This study refers to the mechanical characterization of eucalyptus wood fragments resulting from sawing. The use of reforestation wood is fundamental for sustainability, as it is characterized as a low-carbon material. Its use, however, requires responsible sourcing, basically from planted forests with proper management. In the Brazilian context, the reforestation sector prioritizes fast-growing species, such as *Eucalyptus urograndis*, with trees typically between 12 and 15 years old, consequently resulting in small-diameter. In this scenario, engineered wood emerges as a technological solution capable of compensating for the disadvantages of juvenile wood in terms of its mechanical characteristics. Furthermore, sawing small-diameter logs generates fragments of low economic value. Gluing these fragments together to produce wood with appropriate dimensions adds value to the material and allows for the full utilization of the log, preventing the byproduct from being characterized as waste and therefore discarded. Several studies seek to evaluate the mechanical properties of eucalyptus. This work, in particular, focuses on utilizing the byproduct of sawing to produce glued material with mechanical properties compatible with those of Glued Laminated Timber (Glulam). The results obtained indicate that the glued fragmented timber, although exhibiting slightly inferior properties to Glulam, meets the requirements to be classified as Structural wood with Structural Strength Class D50 (density), D70 (compression and modulus of elasticity) and D24 (flexural strength).

**KEYWORDS:** wood fragments; engineered wood; glued wood; glued eucalyptus wood; glued fragmented wood.

### 1. INTRODUÇÃO

Na Ciência, na Gestão Ambiental e na Engenharia, a

sustentabilidade é um conceito que se refere à capacidade de um sistema se manter ao longo do tempo, atendendo às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de suprirem as suas<sup>1</sup>.

A sustentabilidade tem ganhado destaque na mitigação das mudanças climáticas, impulsionando o desenvolvimento de materiais de construção de baixo carbono incorporado, que buscam substituir o concreto e o aço<sup>2</sup>. Neste aspecto, a madeira é uma alternativa amplamente estudada devido à sua capacidade de atuar como estoque de carbono biogênico<sup>3</sup>. Isso ocorre porque, durante seu ciclo de crescimento, a árvore absorve CO<sub>2</sub> da atmosfera, e quando utilizada em edificações de longa duração, o carbono permanece fixado. Estudos mostram que há uma redução de até 80% nas emissões em comparação com construções convencionais<sup>2</sup>.

A sustentabilidade do uso da madeira está diretamente ligada à sua origem, normalmente proveniente de florestas plantadas com manejo sustentável. O setor de reflorestamento brasileiro concentra-se no plantio de espécies de crescimento rápido, como o *Pinus* e o *Eucalyptus*. O *Eucalyptus*, em particular, tem se adaptado a regiões do Paraná com climas mais quentes, como o Noroeste, que em 2017 representava 8,72% da área plantada no estado, sendo o núcleo regional de Umuarama responsável por 2,84% dessa área<sup>4</sup>. Atualmente, essas espécies tem sido cultivadas principalmente para a produção de celulose e energia.

A madeira apresenta grande potencial de aplicação, relevância tecnológica e sustentável no Brasil. Embora a utilização de madeiras nativas exija certificação das áreas de manejo, o uso de madeiras provenientes de florestas plantadas surge como alternativa mais sustentável, pois apresenta ciclos de renovação mais curtos, permite o plantio próximo aos locais de industrialização, viabiliza a mecanização do processo e a incorporação de novas tecnologias<sup>5</sup>. Outro aspecto econômico relevante é a possibilidade de aproveitamento integral da matéria-prima nos processos industriais<sup>5</sup>. O combate ao desperdício é reforçado pela adoção de tecnologias menos intensivas em energia e que requerem menos matéria-prima<sup>5</sup>.

O eucalipto é uma das espécies de madeira de reflorestamento que, além de apresentar rápido crescimento, permite a melhoria genética, o que pode aprimorar as propriedades mecânicas desejáveis para seu uso na construção civil<sup>6</sup>. Apesar de serem extraídas com idades inferiores às das florestas nativas, resultando em maior quantidade de lenho<sup>6</sup>, a madeira engenheirada surge como um processo industrial que potencializa e aprimora a madeira, tornando-se mais resistente.

No caso do eucalipto com grande quantidade de lenho juvenil, a madeira engenheirada compensa a perda das propriedades mecânicas da madeira jovem, pois o processo permite a remoção de falhas como trincas e nós, e o alinhamento das fibras<sup>7</sup>. As tábuas resultantes do desdobramento da tora são transformadas em lâminas que após um processo de colagem, dão origem a produtos como a Madeira Lamelada Colada (MLC ou *Glued Laminated Timber - Glulam*), a Madeira Microlaminada

(LVL ou *Laminated Veneer Lumber*) ou a Madeira Laminada Colada Cruzada (CLT ou *Cross Laminated Timber*)<sup>7</sup>.

No Brasil, a MLC é pouco conhecida e, consequentemente, pouco procurada para aplicação na construção civil, não sendo utilizada em larga escala, embora possua um conjunto de características e vantagens sobre outros materiais construtivos<sup>8</sup>.

Países desenvolvidos e de alta renda, como a Suécia, Canadá e Alemanha, utilizam a madeira na construção civil em larga escala, indo além do uso residencial de pequeno porte e predominando em edificações de maior complexidade<sup>9</sup>.

No Brasil o uso da madeira engenheirada ainda se encontra em estágio inicial de desenvolvimento, principalmente quando comparado ao cenário internacional, que está em franca ascensão<sup>10</sup>. Apesar de a madeira engenheirada apresentar elevado potencial tecnológico e ambiental, um número limitado de edificações emprega esta tecnologia. No entanto, sua expansão deve ser planejada e fundamentada em critérios técnicos e de sustentabilidade, visando a racionalidade construtiva e a eficiência estrutural que caracterizam esse material<sup>10</sup>.

Em 2018, o Brasil contava com 41 empresas atuando na produção de MLC, OSB e Viga I<sup>11</sup>. A Abracine<sup>12</sup>, associação de produtores de madeira engenheirada, possui 9 empresas ativas no mercado de produção de edificações de madeira engenheirada, mas há pelo menos outras cinco empresas no mercado brasileiro atuando neste setor, conforme evidenciado em publicações digitais.

No núcleo regional de Umuarama, madeiras de eucalipto (*E. urograndis*) e de *Corymbia citriodora* já são exploradas para fins industriais. Atualmente, duas empresas da região estão em fase de desenvolvimento de projetos focados na aplicação desse material, especificamente em MLC, para construção de edificações.

A madeira produzida na região de Umuarama é extraída de árvores com idades entre 12 e 14 anos, resultando em toras de pequenos diâmetros, variando aproximadamente entre 30 e 40 centímetros. A solução técnica adequada para o aproveitamento e viabilidade econômica dessa madeira é o processo de Madeira Lamelada Colada (MLC), pois permite o uso de tábuas curtas e de pequenas seções transversais, que seriam subutilizadas na madeira serrada maciça<sup>13;14</sup>. O processo de laminação também permite o aproveitamento do alborno, que é a madeira juvenil e de menor valor comercial, possibilitando a conversão de praticamente 100% da matéria-prima em um produto<sup>15</sup>.

Diversos estudos e ensaios de laboratório tem sido realizado para a avaliação das propriedades físicas e mecânicas do eucalipto. A Tabela 1 apresenta resultados de pesquisas feitas com:

- MLC de *E. urograndis* produzida por empresa localizada na cidade de Altônia (região do núcleo de Umuarama), a partir de amostra obtida em dezembro de 2021 de árvores de 12 anos, colada com adesivo *Miltibound X-080 (Franklin & Polimers)* para 12% de umidade de equilíbrio<sup>16</sup>;
- MLC de *E. urophilla* x *E. grandis* com adesivo de

poliuretano bicomponente (PUR), à base de óleo de mamona, a partir de madeiras extraídas nas direções tangencial, radial e mista<sup>17</sup>,

- MLC de *E. Grandis*, cujos valores publicados para 15% de umidade corrigidos para 12%<sup>18</sup>;
- *Eucalyptus sp*, com 14 anos e adesivos de poliuretano (PUR) e resorcinol-fenol-formaldeído (RFF)<sup>19</sup>;
- *E. urograndis* com 3 lâminas e adesivo a base de óleos vegetais<sup>20</sup>;
- MLC de *E. urophilla x E. grandis*<sup>21</sup>;
- MLC de *E. grandis*, com adesivo Poliuretano e Resorcinol<sup>22</sup>;
- MLC de *E. urophilla x E. grandis*<sup>23</sup>; e
- MLC selecionada de *E. urograndis*<sup>24</sup>.

**Tabela 1.** Valores médios das propriedades mecânicas da MLC.

| Tipo             | $\rho_{ap}^1$<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | $f_{c0}^2$<br>(MPa) | $E_{c0}^3$<br>(MPa) | $f_m^4$<br>(MPa) | $f_{t0}^5$<br>(MPa) | $f_v^6$<br>(MPa) |
|------------------|---------------------------------------|---------------------|---------------------|------------------|---------------------|------------------|
| 1 <sup>16</sup>  | 638,67                                | 51,93               | 18942               | 78,03            | 59,67               | 10,04            |
| 2 <sup>17</sup>  | 650                                   | 58,19               | -                   | -                | -                   | 11,83            |
| 3 <sup>17</sup>  | 650                                   | 54,27               | -                   | -                | -                   | 9,68             |
| 4 <sup>17</sup>  | 650                                   | 52,85               | -                   | -                | -                   | 7,98             |
| 5 <sup>18</sup>  | -                                     | 45,89               | 12613               | 82,71            | -                   | -                |
| 6 <sup>19</sup>  | 509                                   | 54,49               | -                   | -                | -                   | 11,91            |
| 7 <sup>19</sup>  | 539                                   | 47,77               | -                   | -                | -                   | 11,07            |
| 8 <sup>20</sup>  | 461                                   | 42,87               | -                   | -                | -                   | 9,13             |
| 9 <sup>21</sup>  | 630                                   | -                   | 16470               | -                | -                   | -                |
| 10 <sup>22</sup> | -                                     | 56,04               | 11879               | -                | -                   | -                |
| 11 <sup>22</sup> | -                                     | 50,92               | 11726               | -                | -                   | -                |
| 12 <sup>23</sup> | 790                                   | 69,4                | 20433               | 94,8             | 82,9                | 7,5              |
| 13 <sup>24</sup> | 761                                   | 58,4                | -                   | 54,5             | -                   | 10,3             |
| 14 <sup>24</sup> | 782                                   | 67,1                | -                   | 63,9             | -                   | 11,7             |

Nota: <sup>1</sup> $\rho_{ap}$ : densidade aparente; <sup>2</sup> $f_{c0}$ : resistência à compressão paralela às fibras; <sup>3</sup> $E_{c0}$ : módulo de elasticidade longitudinal obtido no ensaio de compressão paralela às fibras; <sup>4</sup> $f_m$ : módulo de ruptura (resistência à flexão); <sup>5</sup> $f_{t0}$ : resistência à tração paralela às fibras e <sup>6</sup> $f_v$ : resistência ao cisalhamento; Tipo: 1: *E. urograndis*, 2: *E. urograndis* direção tangencial, 3: *E. urograndis* direção mista, 4: *E. urograndis* direção radial, 5: *E. grandis*, 6: *Eucalyptus sp* PUR, 7: *Eucalyptus sp* RFF, 8: *E. urograndis*, 9: *E. urophilla x E. grandis*, 10: *E. grandis* PUR, 11: *E. Grandis* RES, 12: *E. urophilla x E. grandis* e 13 e 14: *E. urograndis* de madeira selecionada. **Fonte:** <sup>16,17,18,19,20,21,22,23,24</sup>.

Com base nos resultados publicados sobre as propriedades físicas e mecânicas da MLC de *E. urograndis* (clone de *E. urophilla x E. grandis*) e *E. grandis*, o objetivo deste trabalho é a produção de madeira engenheirada a partir da colagem de fragmentos de madeira provenientes do desdobro (peças de pequenas dimensões tanto na seção transversal quanto no comprimento). Além disso, busca-se avaliar as propriedades físicas e mecânicas desse material, compará-las com as das MLC e verificar ele pode ser utilizado como produto para elementos estruturais de edificações em madeira.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo apresenta delineamento experimental e comparativo, visando avaliar as propriedades físicas e mecânicas da madeira obtida pela colagem de peças fracionadas de madeira serrada de *Eucalyptus urograndis* e compará-las aos resultados de referência da Madeira Lamelada Colada (MLC), da mesma espécie e

procedência, e, também com outras madeiras de eucalipto.

### Material de referência

Os dados da MLC de referência (paradigma) foram obtidos a partir de estudos publicados<sup>16</sup> que avaliaram as propriedades da MLC de *E. urograndis*, correspondente ao tipo 1 da Tabela 1, na qual também constam resultados de outras espécies de madeira, utilizados para fins comparativos. A madeira indicada como tipo 1 na Tabela 1 é da mesma espécie e procedência da madeira obtida por colagem de peças fragmentadas empregada nesta pesquisa, proveniente da empresa Integração Florestal, localizada no município de Altônia-PR (rodovia PR-487, km 5). O material é proveniente de um clone híbrido de *E. urophilla x E. grandis* (*E. urograndis*), oriundo de árvores colhidas aos 12 anos de idade. A pesquisa foi conduzida em conformidade com os preceitos da NBR 7190-4<sup>25</sup>, assegurando a confiabilidade, a reprodutividade e a comparabilidade dos resultados obtidos.

### Produção do compósito de peças fracionadas e coladas

A madeira composta (compósito) foi fabricada utilizando material proveniente da mesma empresa e região da madeira empregada no estudo de referência (MLC). Essa correspondência assegurou uniformidade quanto a origem, idade e condições de crescimento das árvores.

O processo de confecção das peças fracionadas envolveu o uso de elementos curtos e de pequenas seções transversais, provenientes do subproduto do desdobro da madeira serrada. O objetivo foi o aproveitamento de material residual que seria normalmente descartado devido à presença de defeitos naturais, como rachaduras e nós, ou imperfeições do corte.

O adesivo empregado foi o Multibound X-080 (Franklin & Polimers), um acetado de polivinila (PVAc) bicomponente com sistema *cross-linking*, idêntico ao utilizado na produção da MLC de referência. A utilização do mesmo adesivo eliminou a variabilidade associada ao tipo de adesivo na análise comparativa.

A colagem foi realizada em uma coladeira de bordas da marca Rocafer, que emprega tecnologia de radiofrequência (6.000 Hz). Os parâmetros de prensagem seguiram aqueles adotados no estudo paradigmático: pressão de 90 a 100 bar e tempo de prensagem de 350 a 400 segundos.

Após o período de cura, as peças coladas foram cortadas para a preparação dos corpos de prova (CPs), de acordo com as dimensões prescritas na norma NBR 7190-4<sup>25</sup>. As amostras foram devidamente identificadas e mantidas em ambiente laboratorial protegido até a realização dos ensaios.

### Propriedades físicas

As propriedades físicas do material foram avaliadas em corpos de prova específicos ou em testemunhos obtidos após os ensaios mecânicos. Todos os procedimentos seguiram as diretrizes estabelecidas nas normas NBR 7190-3<sup>26</sup> e NBR 7190-4<sup>25</sup>.

### Teor de umidade:

O teor de umidade foi determinado pelo método da estufa, conforme a Seção 5.1 da NBR 7190-3<sup>26</sup>.

Foram extraídos aleatoriamente 14 corpos de prova do mesmo lote de madeira utilizado para obtenção das amostras destinadas aos ensaios das propriedades mecânicas. A massa de cada corpo de prova foi determinada em balança eletrônica Mark 2200, com capacidade de 2,2 kg e resolução de 0,01 g.

Em seguida os testemunhos foram secos em estufa a  $103 \pm 2$  °C, com pesagens realizadas a cada 6 h, até a determinação de massa constante, caracterizada por variação menor ou igual a 0,5%. As dimensões foram aferidas com um paquímetro metálico (resolução de 0,05 mm).

### Densidade aparente:

A densidade aparente foi determinada conforme a Seção 5.2 da NBR 7190-3<sup>26</sup>. O cálculo foi realizado pela razão entre a massa e o volume dos corpos de prova utilizados no ensaio de compressão paralela às fibras, considerando a umidade de ensaio e posteriormente corrigido para a umidade de equilíbrio de 12%, conforme prescrição normativa.

### Ensaio mecânicos

Foram realizados ensaios para a determinação da resistência à compressão paralela às fibras, de módulo de elasticidade na compressão e da resistência à flexão estática. Os ensaios foram conduzidos nos Laboratórios de Materiais de Construção da Universidade Estadual de Maringá (UEM), abrangendo os campi Regional de Umuarama (ensaio de compressão e de flexão) e Sede (módulo de elasticidade).

### Equipamentos e instrumentação:

Os ensaios foram executados em prensas universais de ensaio EMIC 23-600 e EMIC 300, Figura 1. O conjunto instrumental dispõe de células de carga com capacidade de 300 kN e extensômetro de alta precisão, com resolução de 0,0001 mm.



**Figura 1.** Prensa universal de ensaio EMIC 23-600 (à esquerda) e EMIC 300, adaptada com dispositivo para ensaio de flexão (à direita).

Fonte: os Autores.

Durante a execução dos ensaios, foram registrados, para posterior análise, as curvas de carga x deformação, a carga de ruptura, os deslocamentos correspondentes e o modo de falha dos corpos de prova.

Os ensaios foram realizados com base no procedimento de caracterização simplificada estabelecido pela norma NBR 7190-3<sup>26</sup>, utilizando o seguinte número de corpos de prova: compressão paralela às fibras e módulo de elasticidade (Seção 5.4), com seis corpos de prova cada; e resistência à flexão (Seção 5.10), com 8 corpos

de prova.

### Qualidade experimental

Os ensaios foram realizados com equipamentos calibrados e submetidos à verificação metrológica, precedidos de inspeção visual dos corpos de prova. Foram utilizados apenas elementos da amostra isentos de defeitos, como nós excessivos, inclinação acentuada das fibras ou rachaduras. Também foi realizada documentação fotográfica dos ensaios e dos modos de falha ou ruptura.

### Análise estatística

Os dados experimentais foram submetidos a tratamento estatístico visando à sua caracterização e à comparação com os valores médios publicados. Foram realizadas análises descritivas e inferenciais.

Inicialmente, a presença de *outliers* nos conjuntos de dados foi avaliada por meio do diagrama de caixa (*box-plot*), sendo calculados a média, o desvio-padrão, a amplitude e o coeficiente de variação.

Para comparação entre as médias, adotou-se o teste t de *Student* para amostras independentes, conforme a Equação 1.

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{S_p \cdot \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad \text{Eq. 1}$$

Onde:  $\bar{x}_1$  e  $\bar{x}_2$  são as médias das amostras;  $n_1$  e  $n_2$  são os tamanhos das amostras; e  $S_p$  é o desvio padrão agrupado. O grau de liberdade é de  $gl = n_1 + n_2 - 2$ .

Com o valor de t calculado, obteve-se o valor p (*p-value*) utilizando o software Excel, por meio da função DIST.T. A partir deste valor, determinou-se o nível de confiança para aceitação da hipótese nula ( $H_0$ ). Assim, quando  $p > \alpha$ , considera-se que não há diferença estatisticamente significativa entre as médias. O nível de significância adotado foi de 5% ( $\alpha = 0,05$ ).

A resistência característica ( $f_k$ ) e módulo de elasticidade característico ( $E_k$ ) foram determinados conforme a Seção 4.6 da norma NBR 7190-3<sup>26</sup>.

### Análise comparativa

Os resultados médios das propriedades físico-mecânicas foram ajustados para o teor de umidade de equilíbrio de 12%.

As comparações foram apresentadas em tabelas e gráficos, com o objetivo de evidenciar as diferenças percentuais, as variações relativas e os níveis de significância estatística.

A análise contemplou a comparação da resistência à compressão paralela às fibras, do módulo de elasticidade na compressão e da resistência à flexão entre a madeira produzida a partir de fragmentos colados e a MLC da mesma espécie e origem, vem como em relação a outras espécies. O objetivo foi evidenciar a influência do fracionamento da matéria-prima na integridade das peças coladas e o impacto da variabilidade natural da madeira de *Eucalyptus urograndis* sobre o desempenho mecânico.

## 3. ESTUDO DE CASO

As madeiras provenientes de reflorestamento são,

em geral, obtidas de árvores jovens, em função de critérios econômicos. No caso específico deste estudo, a matéria-prima foi extraída de árvores com 12 anos de idade, resultando em toras de pequeno diâmetro, entre 30 e 40 cm. A madeira serrada de eucalipto, como amplamente conhecido pela indústria, apresenta elevada instabilidade dimensional e maior incidência de tensões de crescimento, o que a torna particularmente suscetível à formação de fissuras durante o processo de secagem.

A principal estratégia para conferir estabilidade dimensional a esse material consiste na sua conversão em madeira lamelada colada (MLC), conforme já observado por pesquisas anteriores<sup>16</sup>. Nesse processo, durante o desdobro, a madeira é cortada em pranchas finas, o que acarreta elevado índice de perdas e a geração de fragmentos de menores dimensões. Tal ocorrência decorre de quatro fatores principais: (i) o corte das pranchas em lamelas com larguras pré-determinadas; (ii) os ajustes dimensionais nas extremidades das pranchas para garantir o alinhamento e a padronização das dimensões; (iii) as porções laterais que resultam em menores larguras; e (iv) a conicidade e o encurvamento natural das toras, que demandam cortes laterais significativos para o alinhamento das peças.

Esses fatores reduzem o rendimento do processo de desdobro e resultam na obtenção de fragmentos de menor comprimento, o que representa uma limitação importante à eficiência produtiva e ao aproveitamento do material.

A Figura 2 ilustra um sistema hipotético de corte que exemplifica as perdas mencionadas. Nessa representação, as peças destacadas em tonalidade mais escura correspondem aos fragmentos removidos para eliminação de rachaduras, às seções de menor largura obtidas nas extremidades e à configuração de uma tora cônica e outra encurvada, responsáveis pela geração de peças de menor comprimento.



**Figura 2.** Representação esquemática do desdobro de tora, evidenciando as regiões sujeitas à fragmentação em razão de defeitos (trincas e rachaduras), redução dimensional das seções por conicidade ou encurvamento natural do tronco. **Fonte:** os Autores (com uso da IA - Gemini e ChatGPT).



**Figura 3.** Resíduos do desdobramento (esquerda), fragmentos cortados e com *joint-finger* (centro) e peça de MFC (direita). **Fonte:** os Autores (remoção de fundo via IA Gemini).

A quantidade de fragmentos gerados é expressiva, e uma das alternativas para o aproveitamento econômico desse material consiste na sua colagem, Figura 3.

Enquanto a MLC é constituída pela colagem de lamelas (Figura 4, à esquerda), a madeira formada por fragmentos passa por um processo de preparação que envolve a confecção de emendas dentadas (*finger joints*) e a colagem das peças dispostas longitudinal e justapostas, originando lamelas de fragmentos colados. Essas lamelas são então novamente coladas entre si, resultando no elemento final, denominado neste estudo de Madeira Fragmentada Colada (MFC), Figura 4 (direita).



**Figura 4.** Representação dos processos de produção da MLC, composta por lamelas (à esquerda) e da MFC, formada por lamelas de fragmentos colados e posteriormente unidas por nova colagem (à direita). **Fonte:** os Autores (com auxílio da IA - Gemini e ChatGPT).

### Propriedades físicas da MFC de *E. urograndis*

Para a correção dos valores de densidade, resistência e módulo de elasticidade para a umidade de equilíbrio de 12%, foram realizados ensaios destinados à determinação do teor de umidade da madeira.

Adicionalmente, determinou-se a densidade aparente da MFC.

#### Umidade da MFC de *E. urograndis*:

Os ensaios indicaram um teor de umidade médio de 11,55%, com desvio padrão de 0,41%. Os valores variaram de 10,81% (mínimo) a 12,30% (máximo), resultando em uma amplitude de 1,49% e coeficiente de variação de 3,55%.

#### Densidade aparente ( $\rho_{ap}$ ) da MFC de *E. urograndis*:

A densidade da madeira foi determinada a partir das amostras utilizadas nos ensaios de compressão paralela às fibras e de módulo de elasticidade na compressão, totalizando 12 corpos de prova. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 2.

A análise dos resultados por meio do diagrama de caixa (*boxplot*) não indicou a presença de valores discrepantes na amostra.

A densidade aparente média ( $\rho_{med}$ ) da MFC de *E. urograndis* é de 681,15 kg/m<sup>3</sup>, com desvio padrão de 52,46 kg/m<sup>3</sup>. Os valores variaram de um mínimo ( $\rho_{min}$ ) de 577,19 kg/m<sup>3</sup> a um máximo ( $\rho_{max}$ ) de 755,03 kg/m<sup>3</sup>, resultando em uma amplitude de 177,84 kg/m<sup>3</sup> e coeficiente de variação de 7,7%.

**Tabela 2.** Resultado dos ensaios de densidade aparente da MFC de *E. urograndis*.

| CP   | Dimensões (mm) |      |       | Massa (g) | $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) |
|------|----------------|------|-------|-----------|-----------------------------|
|      | B              | H    | L     |           |                             |
| MPF1 | 49,3           | 49,1 | 151,9 | 277,62    | 755,03                      |
| MPF2 | 49,6           | 49,3 | 152,9 | 261,92    | 700,54                      |
| MPF3 | 49,3           | 49,6 | 152,7 | 240,83    | 644,98                      |
| MPF4 | 49,0           | 49,1 | 152,4 | 270,80    | 738,56                      |
| MPF5 | 48,8           | 50,1 | 152,6 | 252,69    | 677,29                      |
| MPF6 | 49,2           | 49,2 | 152,9 | 243,58    | 658,12                      |
| CSF1 | 49,7           | 49,2 | 154,0 | 231,00    | 613,44                      |
| CSF2 | 50,1           | 49,7 | 151,6 | 251,68    | 666,74                      |
| CSF3 | 49,2           | 49,1 | 152,2 | 257,40    | 700,08                      |
| CSF4 | 50,0           | 50,2 | 152,0 | 271,58    | 711,84                      |
| CSF5 | 50,3           | 48,9 | 152,3 | 273,47    | 730,02                      |
| CSF6 | 49,8           | 49,4 | 152,4 | 216,40    | 577,19                      |

Fonte: os Autores.

Considerando a umidade de equilíbrio de 12% a densidade aparente média ajustada ( $\rho_{12,med}$ ) é de 682,70 kg/m<sup>3</sup>, com valores variando de um mínimo ( $\rho_{12,min}$ ) de 578,50 kg/m<sup>3</sup> a um máximo ( $\rho_{12,max}$ ) de 756,74 kg/m<sup>3</sup>, correspondendo a uma amplitude de 178,24 kg/m<sup>3</sup> e coeficiente de variação de 7,7%.

A densidade característica ( $\rho_k$ ) da MFC de *E. urograndis* é de 647,04 kg/m<sup>3</sup>, enquadrando-a por esta propriedade, portanto, na Classe de resistência D50<sup>27</sup>.

### Propriedades mecânicas da MFC de *E. urograndis*

As propriedades mecânicas foram avaliadas para a determinação da resistência à compressão paralela às fibras da madeira, do módulo de elasticidade (MOE) na compressão e para a resistência à flexão estática (Módulo de ruptura - MOR).

#### Resistência à compressão paralela às fibras ( $f_{c0}$ ) da MFC de *E. Urograndis*:

Os ensaios de resistência à compressão paralela às fibras foram realizados com base no procedimento de caracterização simplificada descritos na NBR 7190-3<sup>26</sup>, utilizando seis corpos de prova que apresentaram teor de umidade no ensaio de 11,55%, Tabela 3.

**Tabela 3.** Resultado dos ensaios de resistência à compressão paralela às fibras da MFC de *E. urograndis*.

| CP | B (mm) | H(mm) | F (kN) | $f_{c0}$ (MPa) | $f_{12}$ (MPa) |
|----|--------|-------|--------|----------------|----------------|
| 1  | 49,7   | 49,2  | 107,93 | 44,14          | 43,54          |
| 2  | 50,1   | 49,7  | 104,47 | 41,96          | 41,39          |
| 3  | 49,2   | 49,1  | 110,16 | 45,60          | 44,98          |
| 4  | 50,0   | 50,2  | 112,79 | 44,94          | 44,33          |
| 5  | 50,3   | 48,9  | 117,78 | 47,88          | 47,23          |
| 6  | 49,8   | 49,4  | 100,93 | 41,03          | 40,47          |

Nota: B e H representam a seção transversal e F a força de ruptura.

Fonte: os Autores.

A análise dos resultados pelo diagrama de caixa (boxplot) não indicou a presença de valores discrepantes.

A resistência média à compressão paralela às fibras ( $f_{c0,med}$ ) é de 44,26 MPa, com desvio padrão de 2,49 MPa. Os valores variaram entre 41,64 MPa e 45,68 MPa, resultando em uma amplitude de 6,85 MPa e coeficiente de variação de 5,6%.

Considerando a correção para o teor de umidade de

equilíbrio de 12%, a resistência média ajustada ( $f_{c0,12,med}$ ) é de 43,66 MPa, com variação de 40,47 MPa a 47,23 MPa e coeficiente de variação de 5,6%.

Considerando um nível de significância de 95%, estima-se que a resistência à compressão paralela às fibras da madeira esteja compreendida entre 41,07 MPa e 46,25 MPa.

A resistência característica à compressão paralela às fibras ( $f_{c0,k}$ ) da MFC de *E. urograndis* é de 42,15 MPa, enquadrando-se, por esta propriedade, como Classe de Resistência D70<sup>27</sup>.

#### Módulo de elasticidade (MOE) na compressão paralela às fibras ( $E_{c0}$ ) da MFC de *E. urograndis*:

O módulo de elasticidade (MOE) na compressão paralela às fibras da MFC de *E. urograndis* foi determinado a partir de ensaios realizados conforme o procedimento de caracterização simplificada descrito na NBR 7190-3<sup>26</sup>. Foram utilizados seis corpos de prova, que apresentaram teor de umidade médio de 11,55% durante os ensaios, Tabelas 4 e 5.

**Tabela 4.** Resultado dos ensaios do módulo de elasticidade (MOE) na compressão da MFC de *E. urograndis*.

| CP | B (mm) | H(mm) | F (kN) | $f_{c0}$ (MPa) |
|----|--------|-------|--------|----------------|
| 1  | 49,3   | 49,1  | 113,95 | 47,07          |
| 2  | 49,6   | 49,3  | 93,23  | 38,13          |
| 3  | 49,3   | 49,6  | 100,35 | 41,04          |
| 4  | 49,0   | 49,1  | 135,57 | 56,35          |
| 5  | 48,8   | 50,1  | 97,63  | 39,93          |
| 6  | 49,2   | 49,2  | 109,71 | 45,32          |

Fonte: os Autores.

**Tabela 5.** Módulo de elasticidade na compressão da MFC de *E. urograndis*.

| CP | $f_{c50\%}$ (MPa) | $f_{c10\%}$ (MPa) | $\epsilon_{50\%}$ | $\epsilon_{10\%}$ | $E_{c0}$ (MPa) | $E_{c12}$ (MPa) |
|----|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------|-----------------|
| 1  | 23,535            | 4,707             | 0,0006886         | 0,0002620         | 44.135         | 43.735          |
| 2  | 19,065            | 3,813             | 0,0017761         | 0,0007375         | 14.685         | 14.552          |
| 3  | 20,520            | 4,104             | 0,0014951         | 0,0005300         | 17.010         | 16.856          |
| 4  | 28,175            | 5,635             | 0,0011492         | 0,0005218         | 35.926         | 35.600          |
| 5  | 19,965            | 3,993             | 0,0011597         | 0,0004600         | 22.827         | 22.620          |
| 6  | 22,660            | 4,532             | 0,0014603         | 0,0002773         | 15.324         | 15.185          |

Fonte: os Autores.

A análise dos resultados, por meio de diagrama de caixa (boxplot), indicou não haver valores discrepantes na amostra.

O tratamento estatístico revelou um módulo de elasticidade médio na compressão ( $E_{0,med}$ ) de 24985 MPa, com desvio padrão de 12281 MPa. Os valores variaram entre 14685 MPa e 44135 MPa, resultando em amplitude de 29450 MPa e coeficiente de variação de 49,2%.

Após a correção para a umidade de equilíbrio de 12%, obteve-se um valor médio ( $E_{0,12,med}$ ) de 24758 MPa, com um desvio padrão de 12170 MPa. Os valores corrigidos variaram de 14552 MPa a 43735 MPa, apresentando amplitude de 29183 MPa e o mesmo coeficiente de variação de 49,2%.

O módulo de elasticidade médio de 24985 MPa caracteriza a MFC de *E. urograndis* como de Classe de Resistência D70.

O intervalo de confiança para 95% de significância apresentou ampla variação, entre 14747 MPa e 34769

MPa.

O módulo de elasticidade característico (MOE) da MFC de *E. urograndis* foi determinado em 17331 MPa. Por esta propriedade, a Classe de Resistência da madeira é D70<sup>27</sup>.

#### Resistência à Flexão Estática MFC de *E. urograndis* (MOR):

A amostra composta por oito corpos de prova, foi ensaiada conforme o procedimento de caracterização simplificada descrito na NBR 7190-3<sup>26</sup>. Os corpos de prova apresentaram teor de umidade médio de 11,55%.

Os ensaios foram realizados em uma prensa universal Emic 300, equipada com célula de carga de 300 kN e dispositivo acoplado para o ensaio flexão estática a três pontos, com vão livre de 1,05 m, conforme especificado na NBR 7190-2<sup>29</sup>.

A Tabela 6 apresenta as dimensões das seções transversais dos corpos de prova, as forças de ruptura e as resistências à flexão (módulo de ruptura - MOR), obtidas tanto na umidade de ensaio quanto corrigidas para a umidade de equilíbrio de 12%.

**Tabela 6.** Dimensões da seção transversal, forças de ruptura e resistências à flexão da MFC de *E. urograndis*.

| CP | Seção transversal |        | Força de ruptura (kN) | $f_m$ (MPa) | $f_{m,12}$ (MPa) |
|----|-------------------|--------|-----------------------|-------------|------------------|
|    | B (mm)            | H (mm) |                       |             |                  |
| 1  | 52,2              | 62,2   | 3,973                 | 30,98       | 30,56            |
| 2  | 51,1              | 57,4   | 5,461                 | 51,09       | 50,39            |
| 3  | 52,8              | 62,7   | 4,664                 | 35,39       | 34,91            |
| 4  | 52,3              | 62,1   | 5,259                 | 41,07       | 40,51            |
| 5  | 52,2              | 61,9   | 2,428                 | 19,12       | 18,86            |
| 6  | 50,9              | 57,8   | 6,843                 | 63,38       | 62,52            |
| 7  | 51,6              | 59,3   | 3,340                 | 28,99       | 28,60            |
| 8  | 50,9              | 57,3   | 4,386                 | 41,34       | 40,78            |

Fonte: os Autores.

A análise dos resultados, realizada por meio de diagrama de caixa (*boxplot*), indicou não haver valores discrepantes na amostra.

O tratamento estatístico revelou resistência média à flexão estática ( $f_{m,méd}$ ) de 38,92 MPa, com desvio padrão de 13,75 MPa. O módulo de ruptura (MOR) variou entre 19,12 MPa e 63,38 MPa, resultando em amplitude de 44,26 MPa e coeficiente de variação de 35,3%.

Após a correção para a umidade de equilíbrio de 12%, a resistência média à flexão estática foi de 38,39 MPa, com desvio padrão de 13,56 MPa. Os valores variaram entre 18,86 MPa e 62,52 MPa, apresentando amplitude de 43,66 MPa e mantendo o coeficiente de variação em 35,3%.

Para um nível de significância de 95%, a resistência média à flexão estática (MOR) da MFC de *E. urograndis* encontra-se entre 27,90 MPa e 48,88 MPa.

A resistência característica à flexão estática (MOR) da MFC de *E. urograndis* foi de 26,87 MPa, enquadrando o material, por esta propriedade, na Classe de Resistência D24<sup>27</sup>.

## 4. DISCUSSÃO

Os resultados do teor de umidade indicaram boa uniformidade entre os corpos de prova, situando-se próximos ao valor de equilíbrio de 12% adotado para a

correção das propriedades físico-mecânicas.

A densidade média da MFC de *E. urograndis*, ajustada para a umidade de 12%, foi de 682,70 kg/m<sup>3</sup>, valor 6,89% superior à da MLC de mesma espécie e procedência (638,67 kg/m<sup>3</sup>)<sup>16</sup>. A variação observada entre os corpos de prova, de -13,58% a 48,09%, reflete a heterogeneidade intrínseca da madeira, sendo atribuída principalmente à utilização de material proveniente de árvores jovens (diâmetros entre 30 e 40 cm), nas quais coexistem regiões de cerne (maior densidade) e de alburno (madeira juvenil, menos densa). Em comparação com outras espécies do gênero *Eucalyptus*, as diferenças variaram de +26,66% a +34,13%<sup>17;19;20;21;23;24</sup>.

A comparação estatística entre a MFC e a MLC de mesma espécie e procedência<sup>16</sup>, por meio do teste t de Student ( $t = 2,651$ ;  $p = 0,016$  e  $gl = 24$ ), indicou diferença estatisticamente significativa entre as médias de densidade, ao nível de 5% ( $\alpha = 0,05$ ). Assim, com 95% de confiança, conclui-se que as densidades médias não são estatisticamente iguais.

A resistência média à compressão paralela às fibras, ajustada para a umidade de 12%, foi de 43,66 MPa, valor 15,93% inferior ao da MLC de mesma espécie e procedência (51,93 MPa)<sup>16</sup>. As variações observadas situaram-se entre -37,09% e +1,84% em relação à mesma espécie, -19,88% e -8,60% frente a outras espécies de *Eucalyptus sp.*, e -22,09% e -4,86% em comparação com *E. grandis*<sup>17;18;19;20;22;23;24</sup>.

Os menores valores de resistência observados estão associados, predominantemente, a falhas por ruptura na linha de cola e esmagamento nas juntas dentadas (*finger joints*), Figura 5, que aumentaram a suscetibilidade à flambagem das peças formadas por fragmentos de madeira de pequenas seções transversais.



**Figura 5.** Aspecto dos corpos de prova após o ensaio de compressão. Fonte: os Autores (remoção de fundo via PicWich, versão gratuita).

Recomenda-se que o fabricante do material revise o processo de colagem das peças na composição das lamelas, assegurando melhor adesão e controle dimensional das juntas dentadas, que pode estar relacionado a calibração do equipamento de execução das juntas dentadas, que podem estar apresentando folgas nos contatos. Apesar da redução da resistência, a MFC ainda se enquadra na Classe de Resistência D70<sup>27</sup>, o que indica um bom desempenho em compressão.

O módulo de elasticidade (MOE) apresentou alta variabilidade, com coeficiente de variação de 49,2%. Em comparação à MLC de mesma espécie e procedência<sup>16</sup>, o MOE médio da MFC foi 30% superior, variando de

+21,17% e +50,32%, e entre +96,29% e +111,14% em relação a MLC de *E. grandis*<sup>18;21;22;23</sup>. O MOE característico, entretanto, foi de 17331 MPa, valor 7,1% inferior ao da MLC da mesma espécie e procedência (18649 MPa)<sup>16</sup>.

A elevada dispersão dos resultados pode estar associada à fadiga nas linhas de cola decorrentes da aplicação de carga cíclica e à heterogeneidade anatômica dos fragmentos colados. Os corpos de prova CP2 e o CP6, Figura 6, de menores valores de MOE, apresentaram rupturas por delaminação e esmagamento das juntas, enquanto CP1 e CP4 exibiram apenas pequenas aberturas localizadas, mantendo a integridade no restante do corpo de prova, estão correlacionadas aos maiores valores de MOE. Os corpos de prova CP3 e CP5 tiveram o modo de falha na abertura em uma das linhas de cola, em um dos lados, em mais de 50% de seu comprimento.



**Figura 6.** Aspecto dos corpos de prova após ensaio de compressão para MOE. **Fonte:** os Autores (remoção de fundo via PicWich, versão gratuita).

Observa-se que a variação na cor da madeira (de tons claros e escuros) reflete diferenças de densidade e rigidez, o que influencia o comportamento mecânico global do compósito. Estudos similares com madeira de faia-europeia<sup>28</sup> apontam estatisticamente que, em sistemas laminados, a resistência tende a ser determinada pelo elemento de menor resistência.

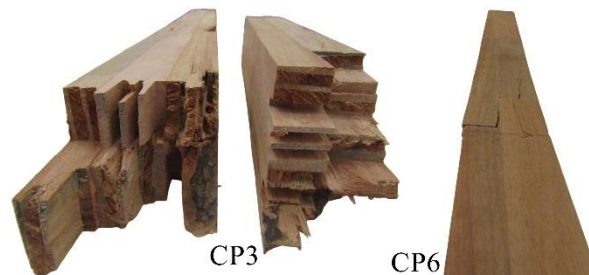
Além disso, a MFC apresenta colagens em dois planos ortogonais, resultantes da união de lamelas e de fragmentos para formar a lamela, o que potencializa tensões de cisalhamento simultâneas em direções distintas durante a flexão, favorecendo falhas adesivas.

A resistência à flexão estática foi a propriedade de pior desempenho, o valor médio foi 50,8% inferior ao da MLC da mesma espécie e procedência<sup>16</sup>, 29,6% a 59,5% inferior em relação a outras MLC de *E. urograndis* e 53,6% inferior à da MLC de *E. grandis*<sup>18;23;24</sup>.

As falhas ocorreram predominantemente nas emendas dentadas, como mostram as Figuras 7 e 8. Contudo, o CP6, cuja emenda situava-se no centro do vão, apresentou o maior valor de resistência, enquanto CP7, com posição semelhante da emenda, apresentou um dos menores resultados, sugerindo influência combinada de qualidade da colagem e posicionamento das juntas.

O corpo de prova CP3, apresentado na Figura 7, que também continha a emenda posicionada próxima ao centro do vão, apresentou ruptura frágil e valor de MOR inferior à média. Nesse caso, observou-se a coincidência de posição de todas as emendas, indicando que a falha foi provocada pelo esforço de tração atuante nas juntas. Estudos comparativos de resistência à tração em emendas dentadas mostram que a força de ruptura nesses sis-

temas é 26,2% inferior à da madeira sem emenda, correspondendo a 17,06 MPa e 23,12 MPa, respectivamente<sup>30</sup>.



**Figura 7.** Aspectos dos corpos de prova CP3 e CP6, após os ensaios. **Fonte:** os Autores (remoção de fundo via PicWich, versão gratuita).



**Figura 8.** Aspecto do corpo de prova CP7, após o ensaio. **Fonte:** os Autores (remoção de fundo via PicWich, versão gratuita).

De modo geral, o processo de fabricação da MFC demanda aprimoramentos, principalmente quanto à adesão nas juntas dentadas e nas linhas de cola, a fim de reduzir a dispersão dos resultados e aumentar a confiabilidade estrutural do material.

Apesar da variabilidade observada, A MFC apresentou Classe de Resistência D50 para as propriedades de compressão e módulo de elasticidade e D24, para a resistência à flexão. Assim, a MFC mostra-se adequada para uso em peças comprimidas (como pilares), embora sua aplicação em elementos submetidos à flexão deva ser avaliada com amostras maiores e com processo de colagem otimizado.

## 5. CONCLUSÃO

O objetivo deste estudo de produção de madeira fragmentada e colada, denominada MFC neste trabalho, que é produzida a partir de fragmentos curtos e de pequenas seções transversais de madeira serrada de *E. urograndis*, avaliar propriedades físicas e mecânicas e comparar os resultados com a madeira lamelada colada (MLC) foram atendidos.

O estudo demonstrou a viabilidade técnica da produção da madeira fragmentada colada, comprovando que o fracionamento e a recomposição da matéria-prima não comprometem a integridade estrutural do compósito em comparação com a madeira lamelada e colada, embora apresente redução nas resistências avaliadas.

Em termos das propriedades físico-mecânicas avaliadas, a MFC apresentou densidade média de 682, 70 kg/m<sup>3</sup>, equivalente à MLC de referência. A

resistência média à compressão paralela às fibras, de 43,66 MPa, resultou inferior a MLC em -15,9%, e o módulo de elasticidade médio, de 24758 MPa, resultou superior a MLC em 30,7%, classificando o material de acordo com a NBR 7190-1<sup>27</sup>, por estas propriedades, na Classe de Resistência D70. O desempenho da resistência à flexão, cujo valor médio é de 38,39 MPa, é o que apresentou maior redução em relação à MLC de referência, -50,8%. Os resultados, no entanto, evidenciam que o processo de colagem longitudinal e transversal, com juntas coladas (*finger joints*) utilizando adesivo PVAc bicomponente é eficaz para geral elementos estruturais com um bom desempenho quando comparado com as lamelas de madeira serrada inteira.

Embora o módulo de elasticidade na compressão e a resistência à flexão estática tenham apresentado maior dispersão, é uma característica inerente à madeira juvenil de *E. urograndis*, e os valores médios foram compatíveis aos registrados para MLCs de mesma espécie.

A MFC se apresenta como uma alternativa tecnológica de alto valor agregado, apresentando significativas vantagens ambientais: permite o aproveitamento de quase 100% da matéria-prima, incluindo fragmentos de menor valor comercial; aumenta a eficiência do processo de desdobro e o potencial de uso da madeira jovem; e contribui para a cadeia produtiva de materiais de construção sustentáveis e de baixo carbono incorporado.

De maneira geral, a MFC de *E. urograndis* constitui uma alternativa tecnicamente robusta e sustentável, reforça o uso racional da madeira de reflorestamento e traz avanços na construção de madeira no Brasil, permitindo ao fabricante melhorias embasadas no conhecimento das falhas e potencialidades do processo.

Para que seja utilizada em larga escala, recomenda-se a continuidade dos estudos com foco na ampliação amostral, avaliação de outras solicitações mecânicas (cisalhamento e tração) e análise do comportamento de longo prazo (fluência e fadiga) sob diferentes condições ambientais.

O trabalho contribuiu diretamente para o aprimoramento do produto pelo fabricante da MFC, ao fornecer subsídios para melhorias no processo de produção com base na identificação e compreensão das falhas observadas. Do ponto de vista acadêmico e científico, o estudo ampliou o entendimento sobre a fabricação da madeira composta a partir de fragmentos de pequenas dimensões, oferecendo fundamentos para otimizar o desempenho estrutural desse material. Além disso, a pesquisa reforça a relevância da MFC como alternativa para uso estrutural, especialmente considerando que a espécie em questão é tradicionalmente direcionada para a produção de celulose e ainda é pouco explorada em aplicações estruturais.

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a empresa Integração Madei-

ras, ao seu proprietário, Rafael Furio Peres (*in memoriam*) e a seus colaboradores por ter produzido e disponibilizado os corpos de prova ensaiados, sem os quais o trabalho não poderia ter sido realizado.

## 7. REFERÊNCIAS

- [1] United Nations - UN. Our Common Future. Federal Office for Spatial Development - ARE: Report of the World Commission on Environment and Development. 1987. Disponível em: [https://www-are-admin-ch.translate.google/en?\\_x\\_tr\\_sl=en&\\_x\\_tr\\_tl=pt&\\_x\\_tr\\_hl=pt&\\_x\\_tr\\_pto=tc](https://www-are-admin-ch.translate.google/en?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=pt&_x_tr_hl=pt&_x_tr_pto=tc). Acesso em: 4 nov 2025.
- [2] Sousa, E.; Oliveira, F. Pegada de carbono de elementos estruturais em madeira engenheirada para HIS: um estudo de caso. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2024, Maceió. Anais... Maceió: ANTAC, 2024. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/entac/article/view/6221>. Acesso em: 4 nov 2025.
- [3] Shigue, EK. Difusão da construção em madeira no Brasil: agentes, ações e produtos. [dissertação] São Carlos: Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo do Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. <https://doi.org/10.11606/D.102.2018.tde-03092018-094051>
- [4] Coutinho, VM; Corte, APD; Sanquetta, CR; Hentz, AMK; Eisfeld, RL & Nascimento, FAF. Mapeamento das áreas plantadas com *Eucalyptus spp.* no Estado do Paraná. *Biofix Scientific Journal* v. 2 n.1 p. 32-43, 2017. DOI: [dx.doi.org/10.5380/biofix.v2i1.51222](https://doi.org/10.5380/biofix.v2i1.51222)
- [5] Gandini, JMD. Aplicação de conceitos de sustentabilidade no desenvolvimento de projeto de componentes estruturais pré-fabricados com emprego de madeiras de florestas plantadas. [dissertação] São Carlos: Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Carlos, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/241545>. Acesso em: 5 nov 2025.
- [6] Latorraca JVF, Albuquerque CEC. Efeito do rápido crescimento sobre as propriedades da madeira. *Floresta e Ambiente* 7(1) 279-91; 2000 [acesso 1 ago 2025] Disponível em: <https://www.scielo.br/j/floram/a/BcyCjTY-vtfR73Np8qNq5zQN/?lang=pt>
- [7] SEBRAE. Madeira Engenheirada: conheça a nova tendência da Construção Civil [Internet]. Brasília: SEBRAE; 2023 [citado 2025 ago 01]. Disponível em: <https://sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/madeira-engenheirada-conheca-a-nova-tendencia-da-construcao-civil,933c42d487184810Vgn-VCM100000d701210aRCRD>
- [8] Pauli BA, Azambuja MA, Oliveira Neto L. Madeira lamelada colada: potencial em edificação, da graduação a industrialização. *Período Técnico e Científico Cidade Verde* 9(24); 2021 [acesso 6 jun 2025] Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/355783795\\_Madeira\\_lamelada\\_colada\\_Potencial\\_em\\_edificacao\\_da\\_graduacao\\_a\\_industrializacao](https://www.researchgate.net/publication/355783795_Madeira_lamelada_colada_Potencial_em_edificacao_da_graduacao_a_industrializacao)
- [9] Gandini, JMD. Aplicação de conceitos de sustentabilidade no desenvolvimento de projeto de componentes estruturais pré-fabricados com emprego de madeira de florestas plantadas.
- [10] Oliveira GL. Estruturas de madeira engenheirada: a concepção arquitetônica orientada à racionalização do processo construtivo [tese]. São Paulo: Universidade de São Paulo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo; 2023.

- [acesso 19 jul 2025] Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/16/16132/tde-12122023-120853/pt-br.php>.
- [11] Shigue, EK. Panorama do uso da madeira na construção civil no Brasil: empresas e produtos. In: : XVI Ebramem+III Clem - XVI Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira e III Congresso Latino-americano de Estruturas de Madeira. 2018; 26 jul; São Carlos: São Paulo: XVI EBRAMEM + III CLEM 2018. [acesso 1 ago 2025] Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/353982705\\_Panorama\\_do\\_uso\\_da\\_madeira\\_na\\_construcao\\_civil\\_no\\_Brasil\\_empresas\\_e\\_produtos](https://www.researchgate.net/publication/353982705_Panorama_do_uso_da_madeira_na_construcao_civil_no_Brasil_empresas_e_produtos).
- [12] Associação Brasileira de Construção Industrializada de Madeira Engenheirada - Abracime. Associados, 2025. Disponível em: <https://www.abracime.com.br/associados>. Acesso em: 5 nov 2025.
- [13] Fagundes, HAV. Produção de madeira serrada e geração de resíduos do processamento de madeira de florestas plantadas no Rio Grande do Sul. [dissertação] Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/4567/000412901.pdf>. Acesso em: 4 nov 2025.
- [14] Córdova, FO. Desempenho tecnológico de vigas de madeira laminada colada de paricá. [dissertação] Lajes: Universidade do Estado de Santa Catarina, 2015. Disponível em: [https://www.udesc.br/arquivos/cav/id\\_cpmenu/1482/Disserta\\_o\\_Franciele\\_Oliveira\\_de\\_Cordova\\_15683966874896\\_1482.pdf](https://www.udesc.br/arquivos/cav/id_cpmenu/1482/Disserta_o_Franciele_Oliveira_de_Cordova_15683966874896_1482.pdf). Acesso em: 4 nov 2025.
- [15] Calil Neto, C; Christoforo, AL; Ribeiro Filho, SLM; Lahr, FAR & Calil Junior, C. Avaliação da resistência ao cisalhamento e à delaminação em madeira laminada colada. Santa Maria: Ciência Florestal v. 24 n.4 p. 989-996, 2014. <https://doi.org/10.1590/1980-509820142404018>
- [16] Savi, O; Freitas, JH; Espessato, AR; Coutinho, SR; Fabiche MNF & Zito, AN. Avaliação da Madeira Lamelada e Colada (MLC) de *Eucalyptus urograndis* para uso na Construção Civil. Journal of Exact Sciences - JES, v. 48, n. 1, p. 27-40, 2026.
- [17] Souza, CGF. Avaliação física e mecânica da madeira lamelada colada (MLC) de eucalipto utilizando adesivo poliuretano submetida ao intemperismo acelerado e aos organismos xilófagos. [dissertação] Jerônimo Monteiro: Universidade Federal do Espírito Santo, 2021. Disponível em: [https://florestaemadeira.ufes.br/sites/florestaemadeira.ufes.br/files/field/anexo/tcc\\_clara\\_gaspar\\_f\\_souza.pdf](https://florestaemadeira.ufes.br/sites/florestaemadeira.ufes.br/files/field/anexo/tcc_clara_gaspar_f_souza.pdf). Acesso em: 4 nov 2025.
- [18] Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT. Madeira: uso sustentável na construção civil. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas: SVMA: Sinduscon-SP, 2003. Disponível em: <chrome-extension://efaidnbmninnibpcjpcgclefindmkaj/http://www.casoi.com.br/hjr/pdfs/manualdamadeira.Pdf>. Acesso em: 5 nov 2025.
- [19] Segundinho, PGA, Silva, AC, Gonçalves, FG & Regazzi, AJ. Caracterização da madeira laminada colada de *Eucalyptus sp.* produzida com adesivos resorcinol-fenol-formaldeído e poliuretano. Pelotas: Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science), v. 9, n. 2, p. 123-133, 2018. Disponível em: <https://periodicos.ufpel.edu.br/index.php/cienciadamadeira/article/view/11053>. Acesso em: 5 nov 2025.
- [20] Cavalheiro, FN. Caracterização de madeira de *Eucalyptus urograndis* e adesivo a base de óleos vegetais visando o emprego em peças de madeira laminada colada. [dissertação] Toledo: Universidade Estadual do Oeste - UNIOESTE, 2021. Disponível em: [chrome-extension://efaidnbmninnibpcjpcgclefindmkaj/https://tede.unioeste.br/bitstream/tede/5612/2/Fernando\\_Cavalheiro\\_2021.pdf](chrome-extension://efaidnbmninnibpcjpcgclefindmkaj/https://tede.unioeste.br/bitstream/tede/5612/2/Fernando_Cavalheiro_2021.pdf). Acesso em: 5 nov 2025.
- [21] Mastela, LC; Segundinho, PGA; Souza, CGF; Gonçalves, FG & Lahr, FAR. Caracterização da madeira do clone de eucalipto para aplicação em elementos colados. São José dos Pinhais: Las Ciencias Sociales v.16 n.10 p. 20712-20730, 2023. DOI: 10.55905/revconv.16n.10-122
- [22] Oliveira, SL & Mendes, LM. Interação da espécie de madeira e do tipo de adesivo na qualidade da madeira laminada colada. [tese] Lavras: Universidade Federal de Lavras, 123 p., 2016.
- [23] Miotto, JL & Dias, AA. Produção e avaliação de vigas de madeira laminada colada confeccionadas com lâminas de eucalipto. Maringá: Revista Tecnológica, Edição Especial ENTECA 2009, p. 35-45, 2009. Disponível em: <https://periodicos.uem.br/ojs/index.php/RevTecnol/article/view/8714/5169>. Acesso em: 8 fev 2024.
- [24] Nogueira RS, Icimoto FH, Calil Junior C, et. al. Experimental Study on full-scale GLULAM beams manufactured with *Eucalyptus urograndis*. Maderas: Ciencia y Tecnologia 25(5):1-12; 2023. DOI: 10.4067/s0718-221x2023000100405.
- [25] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7190-4 - Projeto de estruturas de madeira - Parte 4: Métodos de ensaio para caracterização peças estruturais. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.
- [26] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7190-3 - Estruturas de madeira - Parte 3: Métodos de ensaio para corpos de prova isentos de defeitos para madeiras de florestas nativas. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.
- [27] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7190-1: Projeto de estruturas de madeira, Parte 1: Critérios de dimensionamento. Rio de Janeiro: ABNT; 2022.
- [28] Aicher S, Ohnesorge D. Shear strength of glued laminated timber made from European beech timber. Eur J Wood Prod 69:143–154. 2011 [acesso ago 2025] Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/227318360\\_Shear\\_strength\\_of\\_glued\\_laminated\\_timber\\_made\\_from\\_European\\_Beech\\_timber](https://www.researchgate.net/publication/227318360_Shear_strength_of_glued_laminated_timber_made_from_European_Beech_timber).
- [29] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7190-2 - Estruturas de madeira – Parte 2: Métodos de ensaio para classificação visual e mecânica de peças estruturais de madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.
- [30] MOLINA, JC; CALIL NETO, C & CHRISTOFORO, AL. Resistência à tração de emendas dentadas de madeira de *Manilkara huberi* para o emprego em madeira laminada colada. Porto Alegre: Ambiente Construído, v. 16, n. 1, p. 221-227, 2016. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212016000100070>