

# DENSIDADE, MOR E MOE DA MADEIRA COMPOSTA PINADA DE *Eucalyptus urograndis*

DENSITY, MOR AND MOE OF EUCALYPTUS UROGRANDIS PINE COMPOSITE WOOD

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

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, mestra 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 13/05/2026

## RESUMO

A crescente demanda por materiais sustentáveis na construção civil tem impulsionado o uso da madeira engenheirada, especialmente aquela oriunda de florestas plantadas. Nesse contexto, a madeira de *Eucalyptus urograndis*, amplamente cultivada na região Noroeste do Paraná, destaca-se por sua elevada produtividade, rápido crescimento e boa adaptação às condições edafoclimáticas. Contudo, o manejo intensivo dessas florestas resulta, predominantemente, em toras de pequeno diâmetro, que originam peças serradas de reduzidas seções transversais, muitas vezes com defeitos inerentes ao processo de secagem. Este estudo avaliou a densidade e o desempenho mecânico de elementos de madeira composta pinada produzidos a partir de três peças serradas de *E. urograndis*, visando ao aproveitamento racional desses materiais. Foram realizados ensaios experimentais de flexão estática, determinação da densidade, módulo de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE). Os resultados obtidos foram comparados com valores teóricos de conjuntos de peças justapostas (sem vinculação), e com a análise feita com aplicação da estatística descritiva e inferencial. Os resultados indicaram que a madeira composta pinada apresenta desempenho mecânico equivalente ao da madeira natural da mesma espécie e origem, sem ganhos significativos de resistência. Entretanto, a vinculação entre as peças proporciona vantagens estruturais relevantes, como o aumento da rigidez global e a redução da suscetibilidade à flambagem lateral, evidenciando seu potencial para aplicação em sistemas estruturais leves, como caibros e terças de cobertura.

**PALAVRAS-CHAVE:** Madeira composta pinada, madeira composta pregada, madeira engenheirada.

## ABSTRACT

The growing demand for sustainable materials in civil construction has propelled the use of engineered wood, especially

that from planted forests. In this context, *Eucalyptus urograndis* wood, widely cultivated in northwestern of Paraná region, detaches out for its high productivity, fast growth, and good adaptation to soil and climate conditions. However, intensive management of these forests predominantly results in small diameter logs, which produce sawn pieces with small cross-sections, often with defects inherent to the drying process. This study evaluated the density and mechanical performance of pinned composite wood elements produced from three sawn pieces of *E. urograndis*, aiming at the rational use of this material. Experimental tests were performed to determine static flexion, density, rupture modulus (MOR), and elasticity modulus (MOE). The results obtained were compared with theoretical values for sets of juxtaposed pieces (without pinned) and with the analysis performed using descriptive and inferential statistics. The results indicated that the pinned composite wood has mechanical performance equivalent to that natural wood of the same species and origin, without significant gains in strength. However, the pinned between the pieces provides relevant structural advantages, such as increased overall stiffness and reduced susceptibility to lateral buckling, highlighting its potential for application in the light structural systems, such as rafters and roof trusses.

**KEYWORDS:** Pinned composite wood, nailed composite wood, engineered wood.

## 1. INTRODUÇÃO

A madeira engenheirada tem se destacado nas últimas décadas, com um dos principais materiais da construção civil contemporânea, impulsionada pela crescente demanda por soluções sustentáveis, de baixo impacto ambiental e oriundas de fontes renováveis. Esse protagonismo está diretamente associado à valorização de cadeias produtivas baseadas em florestas plantadas, contribuindo para a preservação ambiental, a sustentabilidade e a redução da pressão sobre florestas

nativas.

A transição do uso predominante de madeiras extraídas de florestas nativas para espécies de rápido crescimento possibilitou a ampliação da utilização de madeiras como o *Eucalyptus urograndis*, híbrido amplamente cultivado no Brasil, resultante do cruzamento entre *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*. Trata-se de uma espécie recomendada para o plantio no Estado do Paraná, com elevada produtividade, boa adaptação às condições edafoclimáticas e capacidade de fornecer matéria prima para múltiplos usos industriais<sup>2</sup>. Além disso, apresenta crescimento rápido e formação de fuste reto, características que favorecem sua utilização para uso industrial e estrutural.

Com o manejo intensivo dessas plantações, tornou-se mais frequente a disponibilidade de toras jovens, que, para árvores com aproximadamente 12 anos, apresentam diâmetros da ordem de 30 a 40 cm. Essa condição resulta, no processo de desdobramento (serragem), na produção de peças de menores dimensões transversais. Diante da produção em larga escala, o aproveitamento racional dessas peças torna-se economicamente necessário, destacando-se a importância do desenvolvimento de sistemas de madeira composta.

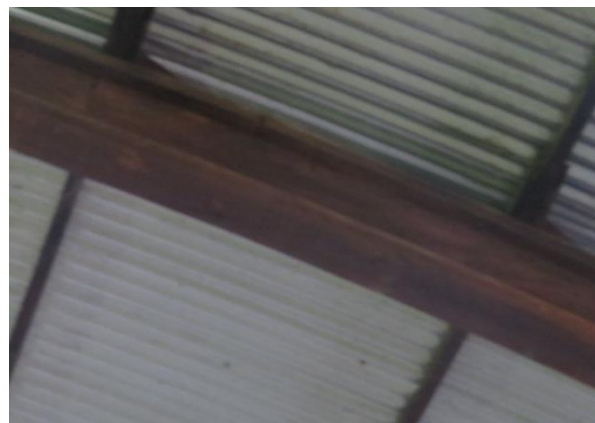
Cabe ressaltar que soluções em madeira engenheirada já eram empregadas mesmo em períodos de abundância de toras oriundas de florestas nativas. Sistemas estruturais compostos por madeira pregada e grampeada eram utilizados com o objetivo de maximizar o desempenho mecânico do material, como ilustrado na **Figura 1**, referente a uma edificação construída em 1976, com aproximadamente 49 anos de uso<sup>3</sup>.



**Figura 1.** Arco de madeira pregada e grampeada, de um galpão com 20 m de vão, construído em 1976. **Fonte:** Obtido pelos autores.

Essas soluções estruturais, frequentemente empregadas na forma de arcos, também podem ser observadas na edificação apresentada na **Figura 2**, localizada na Avenida Colombo, 3184, na cidade de Maringá-PR, cuja idade aparente supera quatro décadas. Tais estruturas eram, em geral, constituídas por seções do tipo 'I', formadas por mesas e alma compostas por duas ou três tábuas pregadas entre si, de acordo com as espessuras disponíveis. As peças da alma eram recortadas em formato curvo, conforme gabaritos específicos e reforçadas com grampos metálicos em formato 'U', conforme ilustrado

na **Figura 3**.



**Figura 2.** Arco de madeira composta de um galpão localizado na Avenida Colombo, 3184 em Maringá-PR. **Fonte:** Banco de imagem dos autores, obtida em 2017.



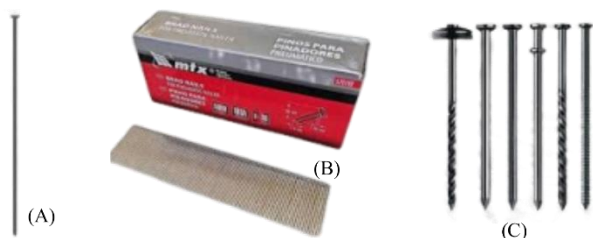
**Figura 3.** Detalhe ilustrativo de uma seção transversal de arco de madeira engenheirada pregada e grampeada. **Fonte:** Elaborada pelos autores.

Essas estruturas configuram sistemas de madeira composta pregada, geralmente dispostos em forma de arco. Por serem compostos por elementos predominantemente solicitados à compressão axial, apresentam comportamento estrutural favorável, uma vez que os esforços de compressão e tração são mais eficientes para a concepção de estruturas leves. Tal configuração reduz significativamente os esforços de flexão, os quais demandam maiores seções transversais e, conseqüentemente, estruturas mais onerosas<sup>4</sup>. Os arcos, juntamente com os cabos, constituem os sistemas estruturais capazes de vencer os maiores vãos, sendo que arcos de madeira podem ser empregados em vãos da ordem de 15 e 72 m, desde que os empuxos horizontais sejam adequadamente absorvidos pelos apoios ou por tirantes<sup>4</sup>.

As tecnologias contemporâneas tem priorizado o uso da madeira engenheirada colada, como a Madeira Laminada Colada (MLC), conhecida internacionalmente como *Glued Laminated Timber* (Gulam)<sup>1</sup>, que proporciona melhoria das propriedades mecânicas, correção de defeitos naturais (trincas e rachaduras) e alinhamento das fibras, aspectos particularmente relevantes para madeiras de reflorestamento, como o *E. urograndis*, que tem apresentado boa resistência<sup>5</sup>. Paralelamente, permanecem em uso sistemas de madeira composta unidos por conectores mecânicos, como pregos, pinos metálicos e cavilhas<sup>1</sup>.

Na indústria madeireira e na marcenaria, destaca-se

o emprego de pinos metálicos em substituição aos pregos convencionais, **Figura 4**, resultando na denominada na indústria madeireira como madeira composta pinada.



**Figura 4.** Imagem ilustrativa de pinos e pregos de aço. **Nota:** (A) pino de aço longo; (B) pinos de aço para uso em pinador; e (C) pregos nas mais diversas formas. **Fonte:** (A) Fati Ferramentas: [fati@fatiferramentas.com.br](mailto:fati@fatiferramentas.com.br); (B) Casa do Arame <https://www.casadoarame.com.br/pino-ppinador-pneumatico-comprimento-30mm-mtx-576109>; (C) Instituto da construção <https://instituto-da-construcao.com.br/blog/tipos-de-pregos-conheca-os-principais/>.

Embora ambos desempenham função semelhante, os pinos apresentam menor diâmetro, maior esbelte e, em geral, ausência de cabeça, o que favorece a penetração na madeira sem interferir na justaposição perfeita entre as peças. Em contrapartida, os pregos em sua maioria possuem cabeça e seção transversal maior, sendo tradicionalmente utilizados em ligações estruturais mais robustas, podendo, entretanto, dificultar a perfeita união entre elementos justapostos em sistemas compostos.

Estudos anteriores demonstraram que sistemas de madeira lamelada pregada, em placas de laje, apresentam execução simples e possibilidade de montagem no próprio canteiro de obras<sup>6</sup>. Pesquisas com bigas compostas do tipo 'I' indicam baixo custo de produção e recomendam o uso da norma Eurocode 5/93 para o dimensionamento, por apresentar resultados mais precisos e demandar menor quantidade de conectores<sup>7</sup>. Ensaios realizados com madeira de *Pinus taeda* pela Rewood<sup>8</sup>, utilizando pinos e pregos de madeira e de aço em pares, espaçados longitudinalmente em 270 mm e transversalmente de 30 mm, evidenciaram valores de módulos de elasticidade de 8721 e 9061 MPa e módulos de ruptura de 34 e 33 MPa, compatíveis com a Classe 2 da madeira estrutural de *pinus spp*<sup>9</sup>.

A composição por meio de pregos ou pinos metálicos possibilita a obtenção de elementos estruturais mais robustos a partir de lâminas ou sarrafos de pequena espessura, favorecendo o aproveitamento de toras jovens e de pequeno diâmetro, característica típica do *E. urograndis*. Além disso, a redistribuição de tensões proporcionada pela vinculação mecânica entre as peças melhora o desempenho global do conjunto, permitindo que defeitos individuais sejam compensados pelo aumento da rigidez estrutural, resultando em resistências superiores às de elementos maciços equivalentes sem vinculação.

### Objetivos do estudo

O objetivo deste estudo foi avaliar os ganhos de resistência e o desempenho estrutural de elementos de madeira composta pinada produzidos com *E. urograndis*, a partir da composição de peças serradas de pequena largura (sarrafos). Busca-se verificar a viabilidade de obtenção de elementos estruturais mais

robustos, passíveis de substituírem caibros e terças em coberturas de cobertura em madeira, bem como em outras aplicações que demandem peças de maiores dimensões, alinhando-se aos princípios da madeira engenheirada moderna, com ganhos econômicos, sustentabilidade, eficiência produtiva e competitividade estrutural.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia adotada neste estudo caracteriza-se como uma pesquisa de natureza experimental e quantitativa, com o objetivo de avaliar o desempenho estrutural de elementos de madeira composta pinada submetidos a ensaios de flexão estática.

### Procedimento

O procedimento experimental foi estruturado em três etapas principais:

- produção e caracterização dos corpos de prova compostos por três peças de madeira serrada de *E. urograndis*, unidas por pinos metálicos;
- execução de ensaios de flexão estática a três pontos, conforme a NBR 7190-2<sup>9</sup>, utilizando uma prensa universal EMIC 300, com célula de carga de 300 kN e dispositivo metálico de elevada rigidez, com vão de ensaio de 1,05 m; e
- análise comparativa entre o momento máximo de ruptura experimental da madeira composta pinada e o momento máximo de ruptura teórico de um sistema formado por peças justapostas sem vinculação, com posterior tratamento estatístico dos resultados para validação das diferenças observadas.

Para a comparação serão utilizados os valores de projeto, que correspondem aos momentos fletores característicos de ruptura.

### Amostragem

Para a caracterização da madeira foi adotado o procedimento simplificado estabelecido na Seção 4.5 da NBR 7190-3<sup>9</sup>, com amostra mínima de seis corpos de prova. No caso da madeira composta pinada, foram produzidos oito corpos de prova compostos por três peças serradas com seção nominal de 25 x 60 mm, **Figura 6**, buscando representar a variabilidade dimensional presente no conjunto.



**Figura 5.** Esquerda: três peças de madeira simplesmente justapostas. Direita: Madeira composta, constituída por três peças de madeira unidas por pino. **Fonte:** Produzidas pelos autores com auxílio da IA (Gemini e ChatGpt)

As peças foram fixadas por meio de pinos metálicos com diâmetro de 2,3 mm e comprimento de 37,0 mm, dispostos em pares e espaçados longitudinalmente a cada 20,3 cm, conforme ilustrado na **Figura 5** (direita),

aplicados em faces opostas do conjunto. Após a montagem, os corpos de prova foram acondicionados em ambiente protegido contra intempéries até a realização dos ensaios experimentais.

A **Figura 6** apresenta o aspecto da madeira composta pinada antes de serem ensaiadas, com destaque à direita da forma de pinagem.



**Figura 6.** Madeira composta pinada: Vista superior (esquerda) e corte ampliado da vista lateral (direita). **Fonte:** Composição de fotos do acervo dos autores com remoção de fundo.

### Ensaio realizados

Os corpos de prova foram submetidos à caracterização física por meio da determinação da densidade e à caracterização mecânica por ensaios de flexão estática, visando à obtenção do módulo de ruptura (MOR) e do módulo de elasticidade (MOE).

#### Caracterização física da madeira

As dimensões das seções transversais dos corpos de prova foram aferidas com paquímetro metálico de 300 mm, com resolução de 0,05 mm. As medições foram realizadas na região central do vão de ensaio, previamente demarcada para aplicação da carga, uma vez que, no ensaio de flexão a três pontos, é nesse local que ocorre a máxima tensão solicitante e, conseqüentemente, a ruptura.

Para correção dos valores de densidade para a umidade de equilíbrio de 12%, foi determinada a umidade conforme a Seção 8 da NBR 7190-3<sup>10</sup>. Para isso, corpos de prova para a determinação da umidade foram extraídos imediatamente após os ensaios de flexão, a partir de regiões próximas a uma das extremidades dos elementos ensaiados.

A densidade foi determinada de acordo com a Seção 8 da NBR 7190-4<sup>11</sup>, sendo a massa aferida em balança eletrônica Balmak LP-25, com capacidade para 25 kg e com resolução de 1 g. As dimensões foram medidas com paquímetro metálico e a secagem da madeira foi realizada em estufa regulada à temperatura de 103 °C. A correção da densidade para a umidade de equilíbrio de 12% foi realizada conforme a Equação 1<sup>9</sup>.

$$\rho_{12} = \rho_{\text{test}} [1 - 0,5(U - 0,12)] \quad \text{Eq. 1}$$

Onde: ' $\rho_{12}$ ' é a densidade para 12% de umidade, ' $\rho_{\text{test}}$ ' é a densidade obtida no ensaio e ' $U$ ' é a umidade da madeira na condição do ensaio (expressa em forma decimal).

#### Ensaio de flexão estática - Módulo de Ruptura (MOR)

Os ensaios de flexão estática foram realizados conforme a Seção 7 da NBR 7190-2<sup>9</sup>, em prensa universal EMIC 300, com célula de carga para 300 kN e utilizando dispositivo metálico de grande rigidez de três cutelos e vão de ensaio de 1,05 m, **Figura 7**. A carga foi aplicada

de forma monotônica e crescente até a ruptura dos corpos de prova, sendo registrados a carga máxima de ruptura e a curva força  $\times$  deslocamento.



**Figura 7.** Prensa EMIC 300 utilizada nos ensaios a flexão estática, com dispositivo de três cutelos acoplado. **Fonte:** Acervo dos autores.

A partir da carga de ruptura, determinou-se o momento máximo resistente da madeira composta pinada ( $M_{RP}$ ) com base na mecânica clássica da flexão a três pontos, Equação 2.

$$M_{RP} = \frac{P_{RUP} \cdot L}{4} \quad \text{Eq. 2}$$

Onde: ' $M_{RUP}$ ' é o momento de ruptura (kN·m), ' $P_{RUP}$ ' é a carga de ruptura obtida no ensaio (kN) e ' $L$ ' o vão de ensaio (m).

Os valores obtidos foram corrigidos para a umidade de equilíbrio de 12%, conforme a Seção 5.6.1 da NBR 7190-1<sup>12</sup>, Equação 3 (ajustada).

$$M_{RP,12} = M_{RP} \left[ 1 + \frac{3(U-12)}{100} \right] \quad \text{Eq. 3}$$

Onde: ' $M_{RP,12}$ ' é o momento de ruptura corrigido para 12% de umidade, ' $M_{RP}$ ' é o momento de ruptura na umidade de ensaio e ' $U$ ' a umidade da madeira na condição de ensaio (%).

#### Módulo de elasticidade na flexão (MOE)

O módulo de elasticidade na flexão ( $E_0$ ) foi determinado a partir do trecho elástico-linear da curva força  $\times$  deslocamento, considerando os níveis de carregamento correspondentes a 10% e 50% da força máxima aplicada, conforme a Seção 5.10.2 da NBR 7190-3<sup>10</sup>, Equação 4.

$$E_{M0} = \frac{(F_{M,50\%} - F_{M,10\%}) \cdot L^3}{(V_{50\%} - V_{10\%}) \cdot 4 \cdot b \cdot h^3} \quad \text{Eq. 4}$$

Onde: ' $E_{M0}$ ' é o módulo de elasticidade na flexão (MPa), ' $F_{M0,10\%}$ ' e ' $F_{M0,50\%}$ ' são as forças correspondentes a 10% e 50% da força máxima aplicada (N), ' $L$ ' é o vão do ensaio (mm), ' $V_{10\%}$ ' e ' $V_{50\%}$ ' são os deslocamentos no meio do vão correspondentes a 10% e 50% da força máxima (mm), ' $b$ ' é a largura da seção transversal do corpo de prova (mm), e ' $h$ ' a altura da seção transversal do corpo de prova (mm).

Para a determinação do MOE da seção composta, a largura considerada ( $b$ ) foi a soma das espessuras das 3 peças constituintes do conjunto. A altura equivalente ( $h_{eq}$ ) foi obtida a partir da seção transformada, calculada

com base no momento de inércia equivalente do conjunto, Equação 5<sup>13</sup>, considerando o princípio da soma dos momentos de inércia individuais e o teorema dos eixos paralelos.

$$I_{eq} = \sum [I_i + S_i(d_i)^2] \quad \text{Eq. 5}$$

Onde: ' $I_{eq}$ ' é o momento de inércia equivalente da seção transformada, ' $I_i$ ' é o momento de inércia de cada peça constituinte da madeira composta, ' $S_i$ ' é a seção transversal de cada peça e ' $d_i$ ' é a distância vertical entre o centro geométrico do conjunto e centroide da peça.

Com os valores do momento de inércia equivalente ( $I_{eq}$ ) e largura ( $b$ ), foi determinada a altura equivalente da seção ( $h_{eq}$ ), possibilitando o cálculo do módulo de elasticidade.

Os valores obtidos foram posteriormente corrigidos para a umidade de equilíbrio de 12%, conforme estabelecido na Seção 5.6.1 da NBR 7190-1<sup>12</sup>, Equação 5.

$$E_{12} = E_U \left[ 1 + \frac{2(U - 12)}{100} \right] \quad \text{Eq. 5}$$

Onde: ' $E_{12}$ ' é o módulo de elasticidade corrigido para 12% de umidade, ' $E_U$ ' é o módulo de elasticidade na umidade de ensaio e ' $U$ ' a umidade da madeira na condição de ensaio (%).

#### Momento de ruptura das madeiras justapostas

O momento máximo de ruptura das peças justapostas foi determinado individualmente para cada conjunto ensaiado, sendo utilizado como referência comparativa entre os sistemas com e sem vinculação mecânica. Para o cálculo, adotou-se a resistência empregada no dimensionamento estrutural, correspondente à resistência característica à flexão da madeira natural de *E. urograndis* de mesma origem. Esse valor, conforme pesquisa anterior, é de  $f_{m,k} = 36,66 \text{ MPa}$ <sup>14</sup>.

O momento de ruptura teórico foi determinado com base nas equações clássicas de mecânica de materiais, considerando o módulo de resistência da seção transversal de cada peça, Equação 6.

$$M_{RH,k} = f_{m,k} \cdot W \quad \text{Eq. 6}$$

Onde: ' $M_{RH,k}$ ' é o momento máximo de ruptura hipotético (N·m), ' $f_{m,k}$ ' a resistência característica à flexão da madeira (MPa) e ' $W$ ' o módulo de resistência da seção transversal de cada peça que compõe o conjunto de madeira composta pinada ( $\text{mm}^3$ ).

O valor representativo do conjunto (MRH) foi definido como três vezes o menor momento de ruptura entre as peças componentes (MRH,k), em conformidade com o princípio 'do elo mais fraco' de Weibull<sup>15</sup>, segundo o qual a resistência do sistema é governada pela peça de menor resistência.

Weibull<sup>15</sup> demonstrou que, em um conjunto de peças independentes, a probabilidade de falha do sistema corresponde à probabilidade de falha da peça de menor resistência. Assim, a resistência global do conjunto é governada pelo elemento mais fraco. O modelo formulado por Weibull<sup>15</sup> é representado no gráfico da Figura 8, no qual se relaciona a probabilidade de falha de um sistema

composto por três 3 peças com a probabilidade de falha de uma peça individual. Observa-se que quando a probabilidade de falha de uma peça ' $P$ ' atinge o valor 1,0, a probabilidade de falha do sistema ' $P_{sistema}$ ' também assume o valor 1,0.

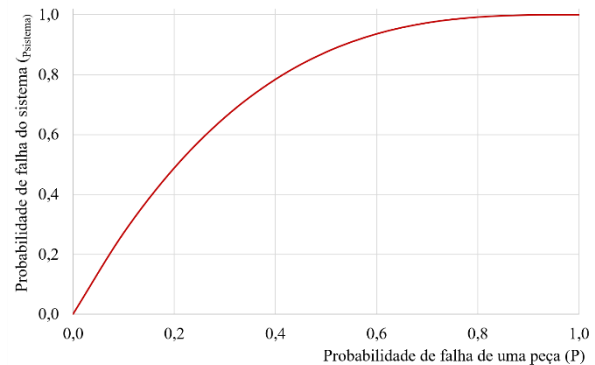


Figura 8. Curva de probabilidade de falha de um sistema com 3 peças x probabilidade de falha de uma peça. Fonte: Produzida pelos autores.

#### Análise comparativa da resistência da madeira composta pinada e da madeira sem vinculação entre as peças

A resistência característica constitui a base científica, estatística e normativa para uma comparação objetiva entre materiais, pois representa um valor intrínseco de resistência, independentemente dos coeficientes de segurança incorporados na resistência de projeto. Dessa forma, permite avaliar de maneira direta o desempenho mecânico da madeira composta pinada em relação à madeira justaposta sem vinculação mecânica.

A comparação dos resultados foi realizada com base em estatística descritiva e inferencial, por meio da análise das médias, quando aplicável, e da determinação de intervalos de confiança utilizando a distribuição 't' de Student.

#### Estatística descritiva

Os resultados foram obtidos a partir da amostra previamente saneada. Para cada conjunto de dados, determinaram-se a média aritmética, o desvio padrão, a amplitude, bem como os valores mínimo e máximo, conforme os procedimentos da estatística descritiva<sup>16</sup>.

#### Garantia estatística e confiabilidade

Para assegurar a confiabilidade dos resultados e definir os valores característicos das propriedades da madeira, correspondentes a apenas 5% de probabilidade de ocorrência de valores inferiores, adotou-se os procedimentos estatístico estabelecido na NBR 7190-3<sup>10</sup>. Esse procedimento assegura um nível de confiabilidade de 95%, ou seja, a probabilidade de que o valor característico seja atingido ou superado é de 95%, com base na análise estatística da amostra ensaiada, conforme a Equação 7.

$$X_{wk} = \left( 2 \cdot \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_{n-1}}{n-1} - x_n \right) \cdot 1,1 \quad \text{Eq. 7}$$

Onde: ' $X_{wk}$ ' representa o valor característico da propriedade ' $w$ ', ' $x_i$ ' corresponde aos valores individuais da

amostra e 'n' o tamanho amostral.

Essa caracterização é particularmente relevante para a madeira, material naturalmente heterogêneo e anisotrópico, que apresenta elevada variabilidade de propriedades, sendo fundamental para o dimensionamento estrutural seguro.

### Limites intervalares

Considerando a elevada variabilidade dos resultados experimentais da madeira, por decorrente de sua natureza heterogênea e anisotrópica, os dados foram tratados estatisticamente para a definição de intervalos de confiança da média populacional, com nível de significância de 5% (95% de confiança). Para esse fim, foi empregada a distribuição "t" de Student<sup>17</sup>, conforme apresentado na Equação 8.

$$t = \frac{\mu - \bar{x}}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}} \quad \text{Eq. 8}$$

Onde: 't' é o escore da distribuição de Student, 'μ' é a média da população, 'x̄' é a média da amostra, 'σ' é o desvio padrão amostral e 'n' corresponde ao número de observações.

A partir do valor de 't', os limites intervalares foram determinados por meio da Equação 9<sup>18</sup>.

$$I = \bar{x} \pm t_{1-\frac{\alpha}{2};n-1} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad \text{Eq. 9}$$

Onde: 'I' corresponde aos limites inferior e superior do intervalo de confiança da média populacional, 'x̄' é a média amostral, 't<sub>1-α/2;n-1</sub>' é o escore 't', para um nível de confiança 'α' para 'n-1' graus de liberdade, 'σ' é o desvio padrão amostral e 'n' o tamanho da amostra.

### Saneamento amostral

Em função da variabilidade esperada nos resultados dos ensaios da madeira, realizou-se o saneamento amostral com o objetivo de identificar e eliminar valores atípicos (*outliers*), caracterizados por discrepâncias em relação ao conjunto de dados. Para essa finalidade, utilizou-se o diagrama de caixa (*boxplot*)<sup>19</sup>, aplicado previamente ao tratamento estatístico para a determinação dos valores representativos das propriedades.

### Comparação entre médias de duas amostras

Para a comparação entre as médias dos conjuntos de madeira composta pinada e de madeira justaposta sem vinculação mecânica, adotou-se o teste t de Welch, apropriado para amostras com variâncias não homogêneas e tamanhos distintos<sup>20</sup>, conforme a Equação 10.

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{S_p \cdot \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad \text{Eq. 10}$$

Onde: 'x̄<sub>1</sub>' e 'x̄<sub>2</sub>' representam as médias das amostras, 'n<sub>1</sub>' e 'n<sub>2</sub>' seus respectivos tamanhos amostrais; e 'S<sub>p</sub>' o desvio padrão agrupado.

O grau de liberdade efetivo foi determinado pela expressão apresentada na Equação 11.

$$gl = \frac{\left(\frac{s_A^2}{n_A} + \frac{s_B^2}{n_B}\right)^2}{\frac{\left(\frac{s_A^2}{n_A}\right)^2}{n_A-1} + \frac{\left(\frac{s_B^2}{n_B}\right)^2}{n_B-1}} \quad \text{Eq. 11}$$

Onde: 'gl' corresponde ao grau de liberdade, 's<sub>A</sub><sup>2</sup>' e 's<sub>B</sub><sup>2</sup>' às variâncias das amostras, e 'n<sub>A</sub>' e 'n<sub>B</sub>' os respectivos tamanhos.

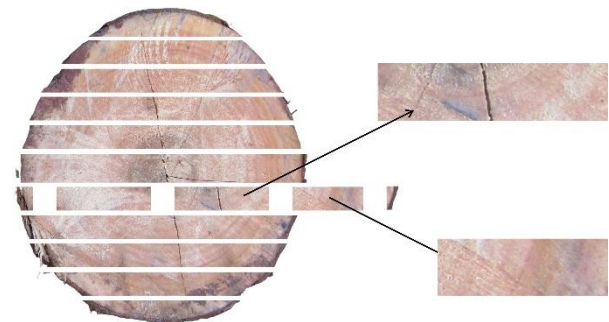
Para duas amostras de mesmo tamanho, o grau de liberdade (gl) corresponde a soma dos tamanhos amostrais menos dois, isto é, gl = 2n - 2.

Com o valor de 't' calculado (t<sub>calc</sub>), determinou-se o valor crítico (t<sub>crit</sub>) para o grau de liberdade e o nível de significância (α) por meio da função do Excel INV.T.BC. A decisão quanto à aceitação ou rejeição da hipótese nula [H<sub>0</sub>], foi baseada na comparação entre o valor 'p' e o nível de significância adotado. Assim, quando p > α, considera-se que não há diferença estatisticamente significativa entre as médias. O nível de significância adotado foi de 5% (α = 0,05).

## 3. ESTUDO DE CASO

O presente estudo teve como objetivo avaliar a viabilidade de obtenção de ganhos de desempenho estrutural ao transformar peças serradas de *E. urograndis* com pequenas seções transversais em elementos de madeira composta pinada. A madeira utilizada é proveniente de árvores juvenis oriundas de plantios de reflorestamento, colhidas com idade aproximada de 12 anos de idade, as quais produzem toras com diâmetros predominantemente entre 30 e 40 cm.

Devido ao reduzido diâmetro das toras e às características intrínsecas da espécie, especialmente a suscetibilidade à formação de trincas e rachaduras decorrentes das tensões de secagem, o processo de desdobramento (serragem) tende a gerar peças de pequena largura. Essas peças podem originar-se tanto do aproveitamento de regiões com defeitos quanto das extremidades das pranchas serradas, conforme ilustrado na **Figura 9**.



**Figura 9.** Imagem ilustrativa do desdobramento da tora e do corte em peças de dimensões pré-determinadas, com destaque para as peças que apresentam trincas e rachaduras, bem como para peças de extremidade. **Fonte:** Elaborada pelos autores a partir de imagem do acervo destes.

As peças resultantes desse processo apresentam potencial para utilização como elementos estruturais secundários, tais como caibros e terças (vigas), os quais

são submetidos predominantemente a esforços de flexão. Quando solicitadas no plano de menor rigidez, essas peças, devido a reduzida espessura em relação à largura, tornam-se suscetíveis à flambagem lateral, especialmente na região comprimida da seção transversal.

Nesse contexto, a composição dessas peças por meio da pinagem metálica surge como alternativa para o aumento da espessura efetiva do elemento estrutural, promovendo maior estabilidade global e reduzindo a propensão à flambagem lateral. Para permitir uma avaliação comparativa consistente, foram utilizados dados de propriedades mecânicas da madeira serrada natural de mesma espécie e origem<sup>14</sup>, obtidos em estudo publicado.

Cabe destacar que, diferente de estudos existentes na literatura, os quais se concentram majoritariamente em vigas compostas dos tipos 'I' e 'T', nas quais mesas e alma desempenham funções estruturais distintas, como vigas 'I', normalmente empregadas em arcos com mesas predominantemente comprimidas, e vigas 'T', com mesa em compressão e alma com predominância de tração, o presente estudo avalia um sistema no qual as peças vinculadas são todas solicitadas predominantemente à flexão.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Propriedades físicas da madeira

Os oito corpos de prova de madeira composta pinada de *E. urograndis* tiveram duas dimensões geométricas e massas aferidas, conforme apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1.** Dimensões e massa dos corpos de prova da madeira composta pinada de *E. urograndis*, ensaiados à flexão estática.

CP	b <sub>1</sub> (mm)	h <sub>1</sub> (mm)	b <sub>2</sub> (mm)	h <sub>2</sub> (mm)	b <sub>3</sub> (mm)	h <sub>3</sub> (mm)	L (cm)	Massa (kg)
1	26	59	27	61	25	58	116,1	3,610
2	21	60	26	59	27	59	116,1	3,280
3	22	60	27	58	27	60	115,9	3,704
4	23	58	24	59	28	60	116,0	3,540
5	20	60	26	61	23	59	116,0	3,368
6	27	61	29	58	27	59	115,9	3,964
7	25	60	25	60	26	60	115,9	3,688
8	25	60	26	58	26	61	115,9	3,678

**Nota:** 'b<sub>i</sub>' e 'h<sub>i</sub>' são as dimensões de cada uma das 3 peças que compõem o conjunto. **Fonte:** Elaborada pelos autores.

As fixações das peças foram realizadas com pinos metálicos de 2,3 x 37,0 mm, aplicados em pares, com espaçamento longitudinal médio de 20,3 cm.

### Umidade da madeira

**Tabela 2.** Teores de umidade da madeira composta pinada de *E. urograndis*.

CP	Massa (g)				Umidade
	17/02/25			18/02/25	
	6h4	12h4	18h4	0h4	
1	19,59	17,48	17,32	17,32	13,11%
2	20,01	17,85	17,72	17,72	12,92%
3	19,74	17,58	17,41	17,41	13,38%
4	19,74	17,59	17,51	17,51	12,74%
5	21,24	19,02	18,79	18,79	13,04%
6	19,74	17,58	17,45	17,45	13,12%
7	20,52	18,32	18,23	18,23	12,56%
8	20,82	18,60	18,51	18,51	12,48%

**Fonte:** Elaborada pelos autores.

Para a correção dos valores das propriedades físicas e mecânicas da madeira para a umidade de referência de

12%, foi extraído, imediatamente após o ensaio de cada peça, um testemunho para a determinação do teor de umidade. Os resultados indicaram os teores de umidade que resultaram num valor médio de 12,92%, conforme apresentado na Tabela 2.

### Densidade da madeira

A densidade da madeira foi determinada a partir das dimensões aferidas, Tabela 1 e da umidade medida, Tabela 2, cujos dados foram sistematizados na Tabela 3.

**Tabela 3.** Densidade da madeira na umidade de ensaio e na umidade de equilíbrio de 12%.

CP	Seção (cm <sup>2</sup> )	L (cm)	Massa (kg)	ρ (kg/m <sup>3</sup> )	ρ <sub>12</sub> (kg/m <sup>3</sup> )
1	46,31	116,1	3,610	671,43	667,70
2	43,87	116,1	3,280	643,98	641,02
3	45,06	115,9	3,704	709,25	704,36
4	44,30	116,0	3,540	688,88	686,33
5	41,43	116,0	3,368	700,81	697,17
6	49,22	115,9	3,964	694,88	690,99
7	45,60	115,9	3,688	697,82	695,87
8	45,94	115,9	3,678	690,78	689,12

**Fonte:** Elaborada pelos autores.

O tratamento estatístico por meio do diagrama de caixa (*boxplot*) indicou que o corpo de prova 2 apresenta comportamento atípico, sendo classificado como possível *outlier*. Dessa forma, esse valor não foi considerado nos cálculos estatísticos para obtenção dos resultados.

A densidade da madeira composta pinada de *E. urograndis*, na umidade de equilíbrio de 12% apresentou valor médio ( $\rho_{12,méd}$ ) de 690,22 kg/m<sup>3</sup>, com desvio padrão de 11,58 kg/m<sup>3</sup>. Os valores variam entre um mínimo de 667,70 kg/m<sup>3</sup>, a um máximo de 704,36 kg/m<sup>3</sup>, resultando em uma amplitude de 36,66 kg/m<sup>3</sup> e um coeficiente de variação de 1,7%.

A densidade característica da madeira composta pinada de *E. urograndis* foi determinada como 731,40 kg/m<sup>3</sup>.

A densidade média obtida, de 690,22 kg/m<sup>3</sup> é 10,7% superior à da madeira natural de mesma espécie e origem, reportada em estudo anterior, de 623,44 kg/m<sup>3</sup><sup>14</sup>. De modo análogo, a densidade característica, de 731,40 kg/m<sup>3</sup> é 15,1% superior àquela reportada para a madeira natural da mesma espécie e origem, de 635,54 kg/m<sup>3</sup><sup>14</sup>.

Considerando que o peso estimado do pino de aço utilizado é de 1,22 g por unidade, que os pinos foram empregados em pares com espaçamento 20,3 cm, e que a seção transversal média é de 45,22 cm<sup>2</sup> (Tabela 3), estima-se que o peso total dos pinos corresponda a aproximadamente 1,33 kg/m<sup>3</sup>. Esse valor representa cerca de 0,19% da densidade média e 0,14% da densidade característica da madeira, indicando que a contribuição dos pinos metálicos na variabilidade observada da densidade é desprezível.

### Propriedades mecânicas da madeira

As propriedades mecânicas da madeira foram avaliadas por meio do Módulo de Ruptura (MOR), associado à resistência à flexão estática, e do Módulo de Elasticidade (MOE) na flexão.

### Módulo de Ruptura (MOR)

O módulo de ruptura (MOR) da madeira composta pinada foi determinado a partir da seção transformada do conjunto de três peças, considerando-se a soma das espessuras das peças e altura transformada ( $h_T$ ), definida com base no alinhamento das peças no plano superior. Os resultados obtidos nos ensaios são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Módulo de ruptura na umidade de ensaio e na umidade de equilíbrio de 12% da madeira composta pinada de *E. urograndis*.

CP	Dimensões (mm)		Força de ruptura (N)	$f_{m,12}$ (MPa)	$f_{m,k}$ (MPa)
	b	$h_T$			
1	78	59,425	10.509,00	62,09	33,50
2	74	59,291	5.384,10	33,50	40,55
3	76	59,320	9.328,60	57,21	44,88
4	75	59,090	7.850,60	48,27	48,27
5	69	60,067	8.963,90	58,48	57,21
6	83	59,354	8.061,80	44,88	58,48
7	76	60,000	10.183,00	59,60	59,60
8	77	59,715	6.967,70	40,55	62,09

Fonte: Elaborada pelos autores.

A análise estatística realizada por meio do diagrama de caixa (*boxplot*) não indicou a presença de valores discrepante na amostra.

O módulo de ruptura (MOR) da madeira composta pinada de *E. urograndis*, na umidade de equilíbrio de 12%, apresentou valor médio ( $f_{m12,méd}$ ) de 50,57 MPa, com desvio padrão de 10,35 MPa. Os valores mínimo e máximo observados forma de 33,50 e 62,09 MPa, respectivamente, resultando numa amplitude de 28,59 MPa e coeficiente de variação de 20,5%.

A resistência característica à flexão da madeira composta pinada de *E. urograndis* ( $f_{m,k}$ ) foi determinada como 35,40 MPa, valor compatível com a Classe de Resistência 3<sup>9</sup>.

Quando comparados aos valores da madeira natural de mesma origem e espécie, observa-se que a resistência à flexão da madeira composta pinada é 3,4% inferior, tanto em relação à resistência média (50,57 MPa e 52,37 MPa<sup>14</sup>) quanto à resistência característica (35,40 MPa e 36,66 MPa<sup>14</sup>).

A comparação estatística entre a amostra deste estudo e a amostra do estudo de referência<sup>14</sup>, realizada por meio do teste 't' de Welch, Equação 10, resultou em um valor calculado de 't' ( $t_{calc}$ ) de 0,324. Considerando-se um grau de liberdade combinado igual a 15 (truncado de 15,5), obteve-se um valor crítico ( $t_{crit}$ ) de 2,131. Como ' $t_{calc}$ ' < ' $t_{crit}$ ' conclui-se que as médias são estatisticamente iguais.

A pesquisa da Rewood<sup>8</sup>, também observou para a madeira composta valores compatíveis com os da madeira natural.

Ressalta-se que, nos ensaios, as rupturas ocorreram predominantemente ao longo das linhas verticais dos pinos, conforme se observa na **Figura 10**. Esse comportamento evidencia a necessidade de novos estudos, com variação do espaçamento das pinagens, bem como da disposição transversal dos pinos, como por exemplo, em configurações em zigue-zague.

Ainda que não tenham sido observados ganhos de re-

sistência, o sistema de pinagem contribui para o aumento da resistência à flambagem lateral das peças, favorecendo sua aplicação como caibros e terças em estruturas de cobertura em madeira.



**Figura 10.** Imagem ampliada da região de falha de um corpo de prova de madeira composta pinada de *E. urograndis*. Fonte: Acervo dos autores.

A avaliação da resistência característica deve considerar a natureza heterogênea da madeira. No caso em estudo, trata-se de madeira proveniente de árvores juvenis, cujas peças podem ser originadas tanto na região do cerne (mais densa e resistente) quanto do albarno (menos denso e resistente). Essa variabilidade intrínseca resulta, de forma recorrente, em coeficientes de variação elevados. assim, ao se aplicarem os critérios estatísticos da NBR 7190-3<sup>10</sup>, que adotam o percentil de 5%, obtém-se valores característicos significativamente inferiores aos valores médios.

Adicionalmente, o processo de pinagem (pregação) pode provocar danos localizados às fibras da madeira, gerando microfissuras ao redor dos pinos, que atuam como pontos de concentração de tensões e favorecem o surgimento de trincas durante os ensaios de flexão.

As falhas observadas nas proximidades das pinagens configuram-se como o 'elo mais fraco' da viga composta<sup>15</sup>, uma vez que as tensões concentradas nessa região atingem o limite de resistência da madeira, levando à ruptura do conjunto.

### Módulo de elasticidade (MOE)

O módulo de elasticidade (MOE) da madeira composta pinada foi determinado a partir das forças de ruptura e dos deslocamentos medidos nos ensaios de flexão, cujos resultados estão apresentados na **Tabela 5**.

Tabela 5. Forças de ruptura, deslocamentos e módulos de elasticidade na flexão da madeira composta pinada de *E. urograndis*.

CP	Força de ruptura (N)	Deslocamentos (mm)		$E_{M0}$ (MPa)	$E_{M0,12}$ (MPa)
		$V_{50\%}$	$V_{10\%}$		
1	10.509,00	9,428250	1,997450	10002,11	10.224,16
2	5.384,10	5,213947	1,029150	9656,25	9.833,93
3	9.328,60	7,603600	1,423260	11014,25	11.318,24
4	7.850,60	6,936800	1,356709	10525,1	10.680,87
5	8.963,90	6,039875	1,389560	14921,95	15.232,33
6	8.061,80	6,284700	1,340300	10875,73	11.119,35
7	10.183,00	9,664802	3,062818	10876,82	10.998,64
8	6.967,70	12,828857	1,232980	4242,41	4.283,14

Fonte: Elaborada pelos autores.

A análise estatística por meio do diagrama de caixa (*boxplot*) indicou que os corpos de prova 5 e 8 apresentaram comportamento atípico, sendo classificados como possíveis *outliers*. Esses valores foram desconsiderados no tratamento estatístico.

O módulo de elasticidade da madeira composta pinada de *E. urograndis*, na umidade de equilíbrio de 12%,

apresentou valor médio de 10696 MPa, com desvio padrão de 570 MPa. Os valores mínimo e máximo observados foram de 9834 e 11318 MPa, respectivamente, resultando numa amplitude de 1484 MPa e coeficiente de variação de 5,3%.

O módulo de elasticidade característico foi determinado como 10315 MPa.

O valor obtido na flexão da madeira composta filetada é 19,5% inferior ao valor reportado para a madeira serrada natural da mesma espécie e origem, avaliada em compressão (12813 MPa)<sup>14</sup>. Além disso, o módulo de elasticidade médio de 10696 MPa é ligeiramente inferior ao valor de referência da Classe 3 da madeira natural da espécie (11000 MPa)<sup>9</sup>.

### Comparação de resultados entre a madeira composta pinada e justaposta

A comparação entre a madeira composta pinada e a madeira justaposta, sem vínculo entre as peças, foi realizada por meio da análise do momento máximo de ruptura.

Para a madeira composta pinada, adotou-se o momento de ruptura característico, obtido experimentalmente nos ensaios de flexão. Para a madeira justaposta, o momento de ruptura foi determinado com base na geometria da seção transversal das peças e na resistência característica à flexão da madeira de mesma espécie e origem<sup>14</sup>.

### Momento de ruptura da madeira composta pinada

O momento de ruptura da madeira composta pinada foi determinado a partir dos resultados dos ensaios de flexão estática realizados em oito corpos de prova, com vão de 1,05 m, conforme apresentado na Tabela 6.

**Tabela 6.** Forças de ruptura e momentos de ruptura da madeira composta pinada de *E. urograndis*.

CP	Força de ruptura (N)	Momento de ruptura (N·m)	M <sub>RP,12</sub> (N·m)
1	10.509,00	2.758,613	2.850,47
2	5.384,10	1.413,326	1.452,33
3	9.328,60	2.448,758	2.550,14
4	7.850,60	2.060,783	2.106,53
5	8.963,90	2.353,024	2.426,44
6	8.061,80	2.116,223	2.187,33
7	10.183,00	2.673,038	2.717,95
8	6.967,70	1.829,021	1.855,36

**Nota:** M<sub>RP,12</sub> corresponde ao momento de ruptura na umidade de 12%.

**Fonte:** Elaborada pelos autores.

A análise estatística por meio do diagrama de caixa (*boxplot*) não identificou valores discrepantes na amostra.

Na umidade de equilíbrio de 12%, o momento de ruptura médio da madeira composta pinada de *E. urograndis* foi de 2.268,32 N·m, com desvio padrão de 465,16 N·m. Os valores mínimo e máximo observados foram de 1.452,33 e 2.850,47 N·m, respectivamente, resultando em uma amplitude de 1.368,14 N·m e coeficiente de variação de 20,5%, compatível com a variabilidade típica da madeira natural.

O momento de ruptura característico da madeira composta pinada de *E. urograndis* foi determinado como 1.587,82 N·m.

### Momento de ruptura da madeira justaposta

O momento de ruptura da madeira justaposta de *E. urograndis* foi definido pela peça de menor módulo de resistência, uma vez que as três peças são solicitadas simultaneamente e, portanto, apresentam deformações equivalentes. Nesse contexto, ao se aplicar a Lei de Hooke, a peça de menor resistência é a primeira a atingir o estado limite último. De acordo com o princípio do 'elo mais fraco' de Weibull<sup>15</sup>, essa peça determina a ruptura de todo o sistema.

Assim, o momento máximo de ruptura foi calculado com base na resistência característica à flexão, considerada como resistência de projeto, a qual foi determinada em estudo anterior para madeira de mesma espécie e origem, como 36,66 MPa<sup>14</sup>. Uma vez atingida a ruptura da peça mais frágil, as demais peças falham em sequência.

A Tabela 7 apresenta os resultados dos momentos de ruptura calculados para a madeira justaposta, considerando resistência característica à flexão de 36,66 MPa.

**Tabela 7.** Dimensões, módulo de resistência, e momentos de ruptura da madeira justaposta de *E. urograndis*.

CP	b (mm)	h (mm)	W (mm <sup>3</sup> )	M (N·m)	M <sub>RHk</sub> (N·m)
1	26	59	15.084,333	552,99	1.541,55
	27	61	16.744,500	613,85	
	25	58	14.016,667	513,85	
2	21	60	12.600,000	461,92	1.385,75
	26	59	15.084,333	552,99	
	27	59	15.664,500	574,26	
3	22	60	13.200,000	483,91	1.451,74
	27	58	15.138,000	554,96	
	27	60	16.200,000	593,89	
4	23	58	12.895,333	472,74	1.418,23
	24	59	13.924,000	510,45	
	28	60	16.800,000	615,89	
5	20	60	12.000,000	439,92	1.319,76
	26	61	16.124,333	591,12	
	23	59	13.343,833	489,18	
6	27	61	16.744,500	613,85	1.722,78
	29	58	16.259,333	596,07	
	27	59	15.664,500	574,26	
7	25	60	15.000,000	549,90	1.649,70
	25	60	15.000,000	549,90	
	26	60	15.600,000	571,90	
8	25	60	15.000,000	549,90	1.603,22
	26	58	14.577,333	534,41	
	26	61	16.124,333	591,12	

**Fonte:** Elaborada pelos autores.

O momento de ruptura característico médio da madeira justaposta foi de 1.511,59 N·m, com valores variando entre 1.319,76 N·m e 1.722,78 N·m.

### Análise comparativa dos resultados obtidos

A comparação dos resultados em função da resistência característica possibilitou uma análise fundamentada em critérios científicos, estatísticos e normativos, permitindo uma avaliação objetiva entre os sistemas, uma vez que essa grandeza representa uma propriedade intrínseca do material, empregada na determinação da resistência de projeto.

O momento de ruptura característico obtido experimentalmente para a madeira composta pinada de *E. urograndis*, igual a 1.587,82 N·m, é 5,0% superior ao valor determinado para a madeira justaposta com resistência característica à flexão de 36,66 MPa<sup>14</sup>, que foi de

1.511,59 N·m.

Entretanto, ao se comparar a resistência à flexão da madeira pinada (35,40 MPa) com a da madeira natural (36,66 MPa), observa-se uma redução de 2,6%. Esse resultado sugere que não há diferença estatisticamente significativa entre os sistemas de madeira pinada e justaposta de mesma espécie, origem e dimensões, especialmente considerando-se a elevada variabilidade observada nos ensaios (coeficiente de variação de 20,5%).

Embora os resultados não indiquem ganhos de resistência, a pinagem da madeira apresenta vantagens econômicas e estruturais, pois possibilita a utilização de peças de menor valor comercial como caibros e terças em estruturas de cobertura. Ao serem vinculadas entre si, as peças passam a apresentar maior comprimento efetivo de flambagem lateral quando comparadas às peças soltas (justapostas), que, para serem utilizadas, conforme a NBR 7190-1<sup>12</sup>, devem atender a limites máximos de esbeltez.

A flambagem lateral com torção ocorre quando a viga sofre deslocamento lateral e rotação sob a ação do momento fletor. Em peças não vinculadas, a instabilidade global pode ocorrer antes que a seção tracionada atinja sua resistência última, exigindo a colocação de elementos de contraventamento para reduzir o comprimento de flambagem.

Com o aumento do comprimento de flambagem associado à peça de menor rigidez, ocorre uma redistribuição desfavorável das tensões, promovendo o deslocamento lateral da região comprimida superior e torção da seção. Dessa forma, a viga pode falhar prematuramente por instabilidade global, atingindo sua tensão limite antes da carga crítica prevista.

Estudo realizado com vigas de madeira laminada colada, que comparou resultados experimentais de ensaios de flambagem lateral em escala real com 14 vigas de até 8 m de comprimento, observou que, para deformações transversais da ordem de L/500, ocorre uma redução de aproximadamente 10% da carga crítica<sup>21</sup>. Considerando que a NBR 7190-1<sup>12</sup> estabelece para a madeira serrada um limite de L/300, cerca de 66% superior ao observado no referido estudo, infere-se que a redução da carga crítica pode ser ainda mais significativa. Esse resultado reforça a justificativa para utilização da madeira composta pinada, que promove o aumento da rigidez global das peças por meio da vinculação entre os elementos constituintes.

## 5. CONCLUSÃO

O presente estudo avaliou o desempenho estrutural de elementos de madeira composta pinada, produzidos a partir de peças serradas de pequena seção transversal de *Eucalyptus urograndis*, com ênfase na resistência e na rigidez à flexão estática. O estudo cumpriu com seu principal objetivo de verificação de ganhos de resistência e desempenho estrutural, com o aproveitamento de madeira oriunda de plantios de reflorestamento, caracterizada por toras de reduzido diâmetro e elevada variabilidade geométrica.

Os resultados indicaram que a madeira composta pinada apresentou comportamento resistente à flexão estatisticamente equivalente ao de sistemas formados por peças justapostas sem vinculação mecânica. Os valores médios e característicos do módulo de ruptura (MOR) não apresentaram diferenças estatisticamente significativas, conforme verificado pelo teste 't' de Welch, evidenciando que o processo de pinagem não proporcionou incremento expressivo na resistência última do conjunto.

Em relação à rigidez, observou-se redução do módulo de elasticidade (MOE) da madeira composta pinada quando comparada à madeira serrada natural de mesma espécie e origem. Essa redução pode ser atribuída à introdução de descontinuidades decorrentes do processo de pinagem, como microfissuras e perturbações locais nas fibras, além da influência da madeira juvenil, cuja menor rigidez é amplamente reportada na literatura técnica.

Apesar da ausência de ganhos significativos de resistência e da redução moderada da rigidez, a técnica de pinagem promoveu aumento da espessura efetiva dos elementos estruturais, contribuindo para maior estabilidade global e menor suscetibilidade à flambagem lateral. Esse aspecto mostra-se particularmente relevante para aplicações em elementos esbeltos, como caibros e terças, indicando que a principal contribuição da madeira composta pinada está associada ao aspecto de melhoria na geometria e da estabilidade do sistema, e não ao aumento direto da capacidade resistente.

Do ponto de vista tecnológico e ambiental, os resultados evidenciam o potencial da madeira composta pinada como alternativa viável para o aproveitamento de peças serradas de pequenas dimensões, frequentemente subutilizadas ou destinadas a aplicações de baixo valor agregado. A técnica apresenta baixo custo, simplicidade construtiva e compatibilidade com processos produtivos de pequena e média escala, favorecendo sua adoção em sistemas construtivos sustentáveis.

O estudo possibilitou a professores e pesquisadores a ampliação de conhecimentos sobre o uso da madeira, além de viabilizar a aplicação acadêmica das informações obtidas, especialmente em disciplinas relacionadas a produtos compostos e ao conceito de seções transformadas.

Recomenda-se que pesquisas futuras investiguem a influência de diferentes arranjos geométricos de pinos, espaçamentos longitudinais e transversais, bem como o uso de conectores alternativos, para otimizar a transferência de esforços entre as peças e à mitigação de concentração locais de tensões, além de avaliações sob carregamentos de longa duração, efeitos de fluência e desempenho em condições ambientais diversas.

## 6. AGRADECIMENTOS

Agradecemos a empresa Integração Florestal e a seus colaboradores pelo fornecimento dos materiais, sem os quais este estudo não teria sido possível. Registramos, em especial, nossa gratidão póstuma a Rafael Furio Peres, incentivador e apoiador desta

pesquisa.

## 7. REFERÊNCIAS

- [1] SEBRAE. Madeira Engenheirada: conheça a nova tendência da Construção Civil [Internet]. Brasília: SEBRAE; 2023. Disponível em: <https://sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/madeira-engenheirada-conheca-a-nova-tendencia-da-construcao-ci-vil,933c42d487184810Vgn-VCM100000d701210aRCRD>. Acesso em: 1 Ago. 2025.
- [2] Paludzysyn Filho, E.; Santos, PET; Ferreira, CA. Eucaliptos indicados para o plantio no Estado do Paraná. Colombo: Embrapa Florestas, 2006.
- [3] Maia, M. Projeto lote 13 quadra 10jd tamoyo [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por e-mail em 04 de dezembro de 2025 [para Savi, O].
- [4] Rebello, YCP. A concepção estrutural e a arquitetura. São Paulo: Zigurate Editora, 2000.
- [5] 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, 48(1):27-40.
- [6] Ino, A & Shimbo, I (Org). Projetar e construir com madeira. São Paulo: Blucher, 2024.
- [7] Góes, JLN & Dias, AA. Vigas pregadas de madeira com seção composta I. Londrina: Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas. 2003; 24:35-48.
- [8] Rewood: Soluções Estruturais em Madeira. Desenvolvimento da Madeira Lamelada Pregada (MLP) para uso de Sistema Placa, 2024. Disponível em: <https://rewood.com.br/artigo/desenvolvimento-da-madeira-lamelada-pregada-mlp-para-uso-de-sistema-placa>. Acesso em: 8 Dez. 2025.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7190-1: Projeto de estruturas de madeira, Parte 1: Critérios de dimensionamento. Rio de Janeiro: ABNT; 2022.
- [13] Beer, FP; Johnston, ER; DeWolf, JT & Mazurek, DF. Mecânica dos materiais [recurso eletrônico]. Porto Alegre: AMGH, 2011.
- [14] Savi, O; Freitas, JE; Espessato, AR; Fabiche, MNF; Coutinho, SR & Zito, A; Avaliação da Madeira de *Eucalyptus urograndis* para uso na Construção Civil. Journal of Exact Sciences – JES; 47(1):5-13.
- [15] Weibull, W. *A Statistical Distribution Function of Wide Applicability*. Journal of Applied Mechanics, 1951.
- [16] Ferreira PM. Estatística e Probabilidade. Fortaleza: UAB/IFCE. 2012; 208 p.
- [17] Student. The Probable Error of a Mean. Oxford University Press: Biometrika, 1908; 6(1):1-25. Disponível em: <https://doi.org/10.2307/2331554>
- [18] Dantas, R. A. Engenharia de avaliações: uma introdução à metodologia científica. 2ª ed rev. de acordo com a NBR 14653-2:2004. São Paulo: Pini, 2005.
- [19] Devore, J. L. Probabilidade e estatística para engenharia e ciências. São Paulo: Cengage Learning, 2014.
- [20] Lu, ZL & Yuan, KH. Welch's t Test. NJ Slking, 2010. DOI: 10.13140/RG.2.1.3057.9607.
- [21] Capellán, G; Sánchez-Haro, J; Celis, P & Ramos-Gavilán, AB. Theoretical, experimental and numerical study of lateral buckling in glued laminated timber beams. Elsevier: Engineering Structures, v 338, 2025. [www.elsevier.com/locate/engstruct](http://www.elsevier.com/locate/engstruct).