

# MADEIRA LAMINADA CRUZADA (CLT) DE *Eucalyptus urograndis*

GLUED LAMINATED TIMBER (CLT) OF *Eucalyptus urograndis*

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 15/04/2026. Aceito para publicação em 15/05/2026

## RESUMO

O avanço dos sistemas construtivos industrializados em madeira motivou a realização deste trabalho, especialmente diante da crescente demanda por soluções estruturais sustentáveis e da recente normalização do sistema *Light Wood Frame* no Brasil. Os painéis de madeira laminada cruzada apresentam elevado potencial para aplicação estrutural, porém ainda há carência de informações técnicas sobre seu comportamento quando submetidos a esforços combinados de compressão e cisalhamento, típicos da ação do vento em paredes estruturais. A utilização do *Eucalyptus urograndis*, espécie de rápido crescimento e amplamente disponível em florestas plantadas, reforça a relevância do estudo no contexto nacional. A pesquisa foi motivada pela necessidade de avaliar a viabilidade técnica desses painéis e a influência da direção de carregamento. Os resultados evidenciam desempenho mecânico compatível com aplicações estruturais, mas indicam reduções significativas de resistência e rigidez quando as solicitações ocorrem fora das direções ortogonais às fibras. Assim, o trabalho contribuiu para o dimensionamento mais seguro de estruturas em CLT, amplia a base de dados para espécies tropicais e apoia a consolidação de sistemas construtivos sustentáveis em madeira no Brasil.

**PALAVRAS-CHAVE:** painéis de CLT; painéis de cisalhamento; paredes estruturais de madeira; paredes de diafragma rígida.

## ABSTRACT

The advance of industrialized wood construction system motivated this study, especially in the face of the growing demand for sustainable structural solutions and the recent standardization of the *Light Wood Frame* system in Brazil. Cross-laminated timber panels have high potential for structural applications, but there is still a lack

of technical information on their behavior when subjected to combined compression and shear stresses, typical of wind action on structural walls. The use of *Eucalyptus urograndis*, a fast-growing species widely available in planted forests, reinforces the relevance of the study in the national context. The research was motivated by the need to assess the technical feasibility of these panels and the influence of the loading direction. The results show mechanical performance compatible with structural applications, but indicate significant reductions in strength and stiffness when stresses occur outside the direction orthogonal to the fibers. Thus the work contributed to the safer dimensioning of CLT structures, expands the database for tropical species, and supports the consolidation of sustainable wood construction system in Brazil.

**KEYWORDS:** CLT panels; shear panels; structural timber walls; rigid diaphragm walls.

## 1. INTRODUÇÃO

Embora a madeira laminada cruzada (*Cross Laminated Timber* - CLT) tenha sido considerada um produto inovador no início da década de 1990, caracterizando-se como um sistema construtivo composto por lâminas de madeira coladas em camadas cruzadas (NC State University, 2025)<sup>1</sup>, há registros de uma patente datada de 1923 referente a um produto similar, denominado *Composite Lumber* desenvolvido por Frank J. Walsh e Robert L. Watts em março de 1920 (Walsh & Watts, 2023)<sup>2</sup>. Trata-se de um produto constituído por múltiplas camadas de madeira dispostas de forma cruzada e coladas sobre pressão, cujos criadores afirmaram ter propriedades superiores à madeira maciça em função de três aspectos principais:

as características naturais da madeira, a estrutura laminada adotada no processo de fabricação e o comportamento das fibras submetidas à compressão (Walsh & Watts, 2023)<sup>2</sup>.

O avanço do processo industrial da madeira engenheirada, como a madeira laminada cruzada (CLT), possibilitou a produção de materiais de madeira com elevada resistência mecânica, viabilizando sua aplicação em usos estruturais anteriormente inviáveis (Giorgi, Quirino & Meirelles, 2020)<sup>3</sup>. Um exemplo precursor desse desenvolvimento é a madeira compensada, cuja utilização em larga escala teve início por volta de 1880, permitindo a produção de materiais empregados há mais de 150 anos (V&A, 2017)<sup>4</sup>. Inicialmente utilizada na fabricação de caixas para embalagens em grandes quantidades por uma empresa russa (AM Luther), essa tecnologia evoluiu para aplicações mais nobres, como a produção de poltronas (Paimio) em 1932, cadeiras Belter em 1960, estrutura de ferrovia elevada em 1867, canoas (Haskell) em 1917, veículos (DKW) em 1938 e até aeronaves, como o avião (Mosquito) em 1941 (V&A, 2017)<sup>4</sup>.

No Brasil, observa-se, nos anos mais recentes, um aumento no interesse pela utilização da madeira engenheirada, especialmente em sistemas estruturais. Esse movimento tem sido impulsionado pela importação de tecnologias já consolidadas na Europa e em outros países, como Estados Unidos e Canadá (Romagnano *et al.*, 2019)<sup>5</sup>. Na **Figura 1** é apresentada a montagem de uma edificação utilizando painéis de CLT.



**Figura 1.** Placas em CLT para vedação residencial. **Fonte:** ArchDaily Brasil: <https://www.archdaily.com.br/br/922665/a-madeira-laminada-cruzada-clt-e-o-concreto-do-futuro>.

De acordo com Giorgi, Quirino & Meirelles (2020)<sup>3</sup>, no contexto brasileiro esse elemento estrutural também é denominado madeira laminada colada cruzada, nomenclatura que remete diretamente ao processo de fabricação, caracterizado pela disposição e colagem das lâminas de madeira perpendicularmente entre si em cada camada.

O compensado, como é comercialmente conhecida a CLT, é amplamente utilizado no Brasil, tanto na indústria moveleira quanto em aplicações como forração de carrocerias de caminhões, baús e, principalmente, na construção civil. Sua fabricação no país ocorre há aproximadamente 80 anos, sendo que estimativas realizadas em 2012 indicavam a existência de mais de

200 fábricas, com capacidade produtiva superior a 4 milhões de metros cúbicos por ano (Vieira, MC; Brito, EO & Gonçalves, 2012)<sup>6</sup>. Nesse mesmo período, a construção civil era responsável por cerca de 44% do consumo nacional, enquanto a indústria moveleira representava 31% (Vieira, MC; Brito, EO & Gonçalves, 2012)<sup>6</sup>.

Os painéis de CLT configuram um sistema construtivo com elevado grau de industrialização, permitindo a execução com grande precisão, rapidez na montagem e baixa geração de resíduos, características que os tornam altamente adequados para construção de edificações (Brandner *et al.*, 2016)<sup>7</sup>. Quando dispostos horizontalmente e submetidos a cargas ortogonais, esses painéis são utilizados como lajes, sendo solicitados predominantemente a esforços de flexão e ao cisalhamento associado, cuja capacidade resistente está diretamente relacionada ao tipo de madeira empregado em sua fabricação (Amorim, Mantilla e Carrasco, 2017)<sup>8</sup>.

O sistema construtivo que utiliza placas e perfis de madeira para a construção de residências e edifícios de até cinco pavimentos é conhecido como *wood frame*. Esse sistema, ao empregar madeiras de reflorestamento, como o pinus, eucalipto e outras espécies, integra o conceito de Construção Energética Sustentável (CES) (Rocha *et al.*, 2022)<sup>9</sup>. Embora seja amplamente utilizado nos EUA desde o século XIX, em decorrência de elevada demanda habitacional associada ao crescimento populacional da costa oeste, no Brasil, sua aplicação teve início apenas em 2009 e ainda enfrenta resistência e limitada aceitação no setor da construção civil (Rocha *et al.*, 2022)<sup>9</sup>.

Atualmente, diversas empresas atuam na construção com o sistema construtivo *wood frame*, o que motivou a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) a publicar, em Julho de 2023, a NBR 16936 - Edificações em *Light Wood Frame* (Finatti & Stamato, 2023)<sup>10</sup>.

As construções executadas com painéis de CLT estão sujeitas a esforços de compressão e cisalhamento, especialmente aqueles decorrentes da ação do vento. Nesses casos, os painéis atuam como elementos de contraventamento da edificação, devendo funcionar como painéis de cisalhamento.

Para que o sistema de *Light Wood Frame* resista adequadamente aos esforços horizontais, como os provocados pelo vento, é necessário que as paredes estruturais sejam compostas por montantes espessados entre 40 e 60 cm, **Figura 2**, e contraventados por meio de cintas de aço galvanizado em forma de 'X' ou por outros dispositivos, como por diagonais de madeira, **Figura 3** (Rezende *et al.*, 2019)<sup>11</sup>. Alternativamente, podem ser utilizados painéis estruturais de madeira, como o compensado, OSB (*Oriented Strand Board*) ou placas cimentícias, que conferem estabilidade à estrutura e permitem que as paredes resistam às forças laterais, caracterizando o chamado painel de diafragma rígido ou painel de cisalhamento (*shear wall*) (Rezende *et al.*, 2019)<sup>11</sup>.

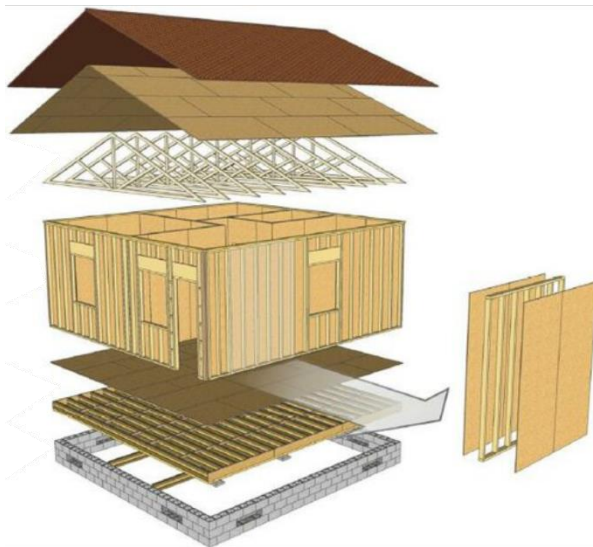


**Figura 2.** Esquerda: Esquema de montagem de uma parede em *ligh wood frame* com painéis em chapa de compensado. Direita: Parede em *ligh wood frame* em fase de montagem. **Fonte:** Esquerda: Criada pelos autores com auxílio da IA (ChatGPT e Gemini). Direita: Casa e Jardim - Globo, <https://share.google/KG6gGTICFcSrdSLF>.



**Figura 3.** Imagem ilustrativa de sistemas de contraventamento de painéis de light wood frame. **Fonte:** Produzidos pelos autores com auxílio da IA (Gemini).

No sistema construtivo em *Light Wood Frame*, destacam-se quatro subsistemas principais: cobertura, paredes, pisos e fundação, **Figura 4**. Dentre esses, as paredes desempenham papel fundamental na resistência aos esforços transversais.



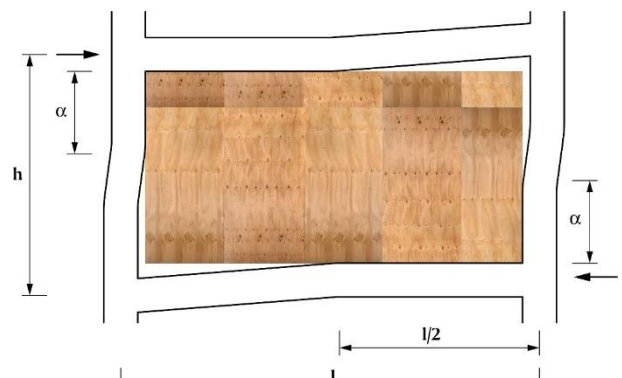
**Figura 4.** Subsistemas da construção em light wood frame. **Fonte:** Espíndola (2010)<sup>13</sup>.

De acordo com Rezende *et al.* (2019)<sup>11</sup>, as paredes estruturais podem exercer a função de diafragma rígido, permitindo, em determinados casos, a dispensa do uso de fitas de aço ou outros sistemas de contraventamento. Para que o painel atue efetivamente como de cisalhamento, é necessário que esteja engastado na base e que o deslocamento do topo atenda aos limites normativos, suportando deformações decorrentes de forças axiais de compressão e tração, bem como forças horizontais provenientes da ação do vento, conforme ilustrado na **Figura 5** (Bredel Jr., 2003)<sup>12</sup>.



**Figura 5.** Diagrama das forças sobre o painel de cisalhamento. **Fonte:** Adaptado de Bredel Jr. (2003)<sup>12</sup>.

Para a avaliação da resistência da parede a esses esforços, pode ser empregado o método proposto por Stafford Smith e Carter (1969)<sup>14</sup>, conhecido como método da barra ou biela diagonal equivalente. Esse método foi aplicado por Bevilaqua (2005)<sup>15</sup> na avaliação do comportamento de placas de OSB submetidas a esforços de cisalhamento. A metodologia baseia-se na premissa de que a ação horizontal provoca a deformação do pórtico que contém o painel de vedação, conforme ilustrado na **Figura 6**, adaptada de Oliveira (1995)<sup>16</sup>. Nesse contexto, a rigidez e a resistência da diagonal do painel diafragma dependem tanto da geometria e das características físicas do painel quanto do comprimento de contato entre o painel e o pórtico, definido como metade da largura e do comprimento de contato, conforme apresentado na Equação 1 (Oliveira, 1995)<sup>16</sup>.



**Figura 6.** Comprimento de contato ( $\alpha$ ) entre o painel e o pórtico. **Fonte:** Adaptado de Oliveira (1995)<sup>16</sup>.

$$\alpha = \frac{\pi \cdot h}{2 \cdot \lambda h} \tag{Eq.1}$$

Onde: " $\alpha$ " é o trecho de contato do pilar com o painel, " $h$ " é a distância entre os eixos das vigas superior e inferior e " $\lambda h$ " é um parâmetro adimensional relativo as rigidezes do pórtico e do painel.

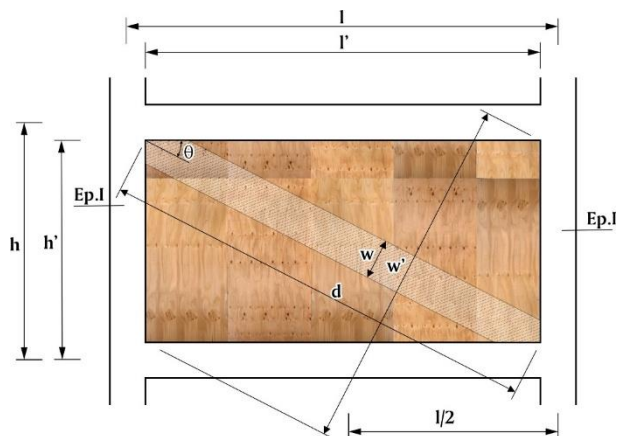
A relação entre as rigidezes do pórtico e do painel é definida por Stafford Smith e Carter (1969)<sup>14</sup> para painéis retangulares, conforme a Equação 2.

$$\lambda h = h \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot E_a \cdot t \cdot \text{sen}(2\theta)}{4 \cdot E_p \cdot I \cdot h'}} \tag{Eq.2}$$

Onde: " $h$ " representa a distância entre os eixos da viga inferior e superior (cm), " $E_a$ " é o módulo de elasticidade do painel (kN/cm<sup>2</sup>), " $t$ " é a espessura do painel

(cm), " $\theta$ " é o ângulo formado entre a diagonal do painel com a horizontal ( $^\circ$ ), " $E_p$ " é o módulo de elasticidade do pilar ( $\text{kN/cm}^2$ ), " $I$ " é o momento de inércia do pilar ( $\text{cm}^4$ ) e " $h$ " a altura do painel (cm).

Na **Figura 7** é apresentada a representação da biela comprimida equivalente, cuja largura ( $w$ ) e comprimento ( $d$ ) são utilizados para a determinação da rigidez do sistema.



**Figura 7.** Representação da biela diagonal equivalente. **Fonte:** Adaptado de Oliveira (1995)<sup>16</sup>.

A largura equivalente ' $w$ ' pode ser determinada em função da distância entre os eixos das vigas e dos estágios de rigidez, fissuração ou de ruptura, conforme as expressões propostas por Mainstone (1974)<sup>17</sup>, apresentadas no **Quadro A**.

**Quadro A** - Largura equivalente da diagonal comprimida em função de  $w$  e  $\lambda h$  para estágios de rigidez, fissuração e ruptura.

Condição	Estágio	Largura equivalente da diagonal comprimida
$\lambda h < 5$	Rigidez	$w = 0,175 \cdot w' \cdot (\lambda h)^{-0,4}$
	Fissuração	$w = 0,170 \cdot w' \cdot (\lambda h)^{-0,4}$
	Ruptura	$w = 0,560 \cdot w' \cdot (\lambda h)^{-0,875}$
$\lambda h > 5$	Rigidez	$w = 0,160 \cdot w' \cdot (\lambda h)^{-0,3}$
	Fissuração	$w = 0,150 \cdot w' \cdot (\lambda h)^{-0,4}$
	Ruptura	$w = 0,520 \cdot w' \cdot (\lambda h)^{-0,8}$

**Nota:**  $w$ : distância entre os vértices inferior esquerdo e superior direito do painel, medida ortogonalmente à diagonal do painel.  $\lambda h$ : parâmetro adimensional que relaciona a rigidez do pórtico e do painel. **Fonte:** Mainstone (1974)<sup>17</sup>.

Embora essas expressões tenham sido originalmente desenvolvidas para paredes de alvenaria, Bevilaqua (2005)<sup>15</sup> as aplicou a pórticos com fechamento em placas de OSB fixadas a estruturas de perfis metálicos, utilizando parafusos ao longo de todo o perímetro, e constatou não haver diferenças significativas nos resultados, concluindo que tais expressões podem ser utilizados para outros materiais.

Para a avaliação do potencial de aplicação da CLT, é fundamental o conhecimento de suas propriedades mecânicas, especialmente no que se refere a rigidez. Visando possibilitar a comparação com resultados obtidos neste estudo, a **Tabela 1** apresenta propriedades físicas (densidade) e mecânicas (Módulo de ruptura - MOR - e de elasticidade - MOE) de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus*

*urophylla*, e *Eucalyptus urograndis*, sendo este último um clone resultante do cruzamento entre as duas primeiras espécies.

**Tabela 1** - Densidade, módulo de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE) de painéis de *Eucalyptus urograndis*, *grandis* e *urophylla*.

Fonte	Madeira	$\rho$ ( $\text{kg/m}^3$ )	$f_m$ (MPa)	$E_0$ (MPa)
(1)	<i>E. urograndis</i>	490	42,89	6275
(2)	<i>E. urograndis</i>	680	47,51	12979
	<i>E. urograndis</i>	640	37,34	13142
(3)	<i>E. grandis</i>	-	84,83	13149
(4)	<i>E. urophylla</i>	600	127,68	19330
(5)	<i>E. grandis</i>	830	37,72	6448

**Fontes:** (1) Kazmierczak, Hillig & Iwakiri (2017)<sup>18</sup>; (2) Almeida, Boroletto Júnior & Jankowsky (2004)<sup>19</sup>; (3) Iwakiri et al. (2006)<sup>20</sup>; (4) Boroletto Junior (2003)<sup>21</sup> e (6) Guimarães Júnior et al., (2009)<sup>22</sup>.

Boroletto Junior (2003)<sup>21</sup> também avaliou as propriedades no sentido do eixo ortotrópico secundário e observou valores de MOE de 4847 MPa e de MOR de 54,82 MPa, correspondendo a reduções de 74,92 e 57,04%, respectivamente. Resultados semelhantes foram observados por Guimarães Junior et al. (2009)<sup>22</sup>, que obtiveram valores de MOE de 5595 MPa e MOR de 35,32 MPa na direção do eixo ortotrópico secundário, com reduções de 13,23% e 6,36%.

Considerando que o comportamento estrutural principal do painel de CLT está associado à resistência aos esforços normais às fibras (perpendicular às fibras da camada superficial), a maioria das publicações concentra-se na avaliação das propriedades mecânicas MOR e MOE. Contudo, quando os painéis são utilizados como elementos de rigidez para resistir a esforços axiais e horizontais, como aqueles decorrentes da ação do vento, torna-se necessário o conhecimento adicional do módulo de elasticidade na compressão, da resistência à compressão e da resistência ao cisalhamento.

Dessa forma, o objetivo deste estudo é caracterizar as propriedades mecânicas de chapas de madeira laminada cruzada produzidas com lâminas de *Eucalyptus urograndis*, visando avaliar sua viabilidade como elementos de fechamento de paredes em edificações de madeira. Para tanto, será avaliada a densidade e analisadas a resistência à compressão axial, o módulo de elasticidade na compressão e a resistência ao cisalhamento.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

O delineamento experimental teve como objetivo avaliar as propriedades físicas e mecânicas da madeira laminada cruzada (CLT) produzida com *Eucalyptus urograndis* (*E. urograndis*).

### Produção da CLT e dos corpos de prova

A CLT foi fabricada a partir de lâminas de *Eucalyptus urograndis* com espessuras de 1,2 mm, obtidas por torneamento de toras de madeira com diâmetros entre 30 e 40 cm. As lâminas foram coladas com o adesivo Multibound X-080 (Franklin & Polimers), um acetado de

polivinida (PVAc) bicomponente com sistema *cross-linking*, utilizando coladeira de bordas da marca Rocafer, que opera por radiofrequência com 6000 Hz, sob pressão de 90 a 100 bar e com tempo de prensagem entre 350 a 400 segundos.

Inicialmente, foram produzidos painéis com espessura de 12 mm. Posteriormente, realizou-se a colagem de cinco painéis para a obtenção de um painel com 60 mm de espessura, a partir do qual foram extraídos os corpos de prova.

Após o processo de cura, os painéis foram seccionados para a retirada dos corpos de prova (CP), conforme os procedimentos estabelecidos na NBR 7190-4 (ABNT, 2022)<sup>23</sup>. Os CP foram devidamente identificadas e acondicionados até a realização dos ensaios.

### Propriedades físicas

As propriedades físicas foram determinadas a partir dos corpos de prova, de acordo com as especificações da NBR 7190-3 (ABNT, 2022)<sup>24</sup> e da NBR 7190-4 (ABNT, 2022)<sup>23</sup>.

#### Teor de umidade:

O teor de umidade foi determinado pelo método da estufa, conforme a Seção 5.1 da NBR 7190-3 (ABNT, 2022)<sup>24</sup>. Foram extraídas duas amostras: uma composta por 4 elementos, destinada à determinação da umidade dos corpos de prova utilizados nos ensaios de resistência à compressão e rigidez, e outra com oito elementos, referente aos corpos de prova dos ensaios de resistência ao cisalhamento.

A massa de cada corpo de prova foi determinada com balança eletrônica Mark 2200, com precisão de 0,01 g e capacidade de 2,2 kg. A secagem foi realizada em estufa a  $103 \pm 2$  °C, com pesagens a cada 6 h até a obtenção de massa constante, definida por variação de massa igual ou inferior a 0,5%. As dimensões dos corpos de prova foram aferidas com paquímetro metálico de resolução de 0,05 mm.

#### Densidade aparente

A densidade aparente foi determinada conforme a Seção 5.2 da NBR 7190-3<sup>24</sup>, a partir da massa e volume dos corpos de prova utilizados no ensaio de compressão e rigidez, sendo os valores corrigidos para a umidade de equilíbrio de 12%.

### Ensaio mecânicos

Foram realizados ensaios para a determinação da resistência à compressão e do módulo de elasticidade na compressão, tanto na direção do eixo ortotrópico principal quanto com as fibras da madeira oblíquas. Esses ensaios foram conduzidos no Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Estadual de Maringá (UEM), campus sede. Os ensaios para determinação da resistência ao cisalhamento foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção da UEM, Campus Regional de Umuarama/CTC.

#### Equipamentos e instrumentação

Os ensaios foram executados de acordo com a NBR

7190 (ABNT, 2022)<sup>24</sup>, utilizando prensas universais de ensaio EMIC 23-600, com capacidade de 300 kN, equipadas com extensômetro de alta precisão e resolução de 0,0001 mm, para os ensaios de resistência à compressão e prensa EMIC 300, com dispositivo específico para os ensaios de resistência ao cisalhamento, **Figura 8**.



**Figura 8** - Prensa universão de ensaio EMIC 300, com dispositivo para ensaio de resistência ao cisalhamento. **Fonte:** Os autores.

Durante a execução dos ensaios de rigidez, foram registradas as curvas de carga x deformação, a carga de ruptura, os deslocamentos correspondentes e os modos de falha.

### Qualidade experimental

Os ensaios foram realizados em equipamentos calibrados e submetidos à verificação metrológica, sendo os corpos de prova previamente inspecionados visualmente.

Para a caracterização das propriedades dos painéis de CLT de *E. urograndis*, foi adotado o procedimento simplificado estabelecido na Seção 4.5 da NBR 7190-3<sup>24</sup>, com amostra mínima de seis corpos de prova

### Análise estatística

Os resultados dos experimentos foram submetidos a tratamento estatístico por meio de análises descritivas, precedidas da verificação da presença de dados atípicos por meio do diagrama de caixa (*boxplot*). Foram determinados a média, desvio-padrão, a amplitude e o coeficiente de variação, sendo os limites intervalares definidos a partir da distribuição "t" de Student (1908)<sup>25</sup>.

A resistência característica ( $f_k$ ) e o módulo de elasticidade característico ( $E_k$ ) foram determinados conforme a Seção 4.6 da NBR 7190-3 (ABNT, 2022)<sup>24</sup>.

## 3. ESTUDO DE CASO

O presente estudo objetivou avaliar a resistência à compressão na direção do eixo ortotrópico principal de painéis de CLT de *Eucalyptus urograndis* de madeira proveniente de árvores juvenis de florestas plantadas na região Noroeste do Paraná, colhidas com idade aproximada de 12 anos, formadas a partir de lâminas torneadas de toras com diâmetros entre 30 e 40 cm, com espessura de 1,2 mm.

Considerando que o objetivo da pesquisa é a determinação das propriedades dos painéis de CLT para atuarem como painel de diafragma rígido ou painel de cisalhamento, foram extraídos corpos de prova com as

fibras da madeira inclinadas em relação aos eixos ortotrópicos, uma vez que a biela de compressão se desenvolve com inclinação que vai da extremidade externa superior para a extremidade interna inferior da parede estrutural, assim, pode-se avaliar se há variação da resistência dos painéis sobre ações inclinadas em relação a ortotropia dos painéis.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Umidade da madeira dos painéis de CLT

Para permitir a correção das propriedades físicas e mecânicas dos painéis de CLT para a umidade de referência de 12%, foram avaliadas duas amostras distintas: uma destinada à determinação da umidade dos corpos de prova submetidos aos ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade na compressão e outra referente aos corpos de prova ensaiados à resistência ao cisalhamento.

#### *Umidade dos corpos de prova ensaiados à compressão e do módulo de elasticidade na compressão*

Após os ensaios de determinação da resistência à compressão e do módulo de elasticidade, foram extraídos aleatoriamente quatro corpos de prova, provenientes de regiões sem deformações aparentes daqueles ensaiados. Esses corpos de prova foram submetidos aos ensaios de determinação do teor de umidade, conforme o procedimento descrito na Seção 5.1 da NBR 7190-3 (ABNT, 2022)<sup>24</sup>.

Os resultados indicaram que os corpos de prova do painel de CLT de *E. urograndis* ensaiados à compressão e módulo de elasticidade na compressão apresentaram teor de umidade médio de 13,63%, com valores variando entre 12,29% a 16,69%, amplitude de 4,40% e coeficiente de variação de 15,2%.

#### *Umidade dos corpos de prova ensaiados à resistência ao cisalhamento*

Após a realização dos ensaios de resistência ao cisalhamento dos painéis de CLT, foi extraído de cada corpo de prova um testemunho, retirado de regiões não deformadas, para a determinação do teor de umidade.

Os resultados indicaram que a madeira ensaiada apresentou teor de umidade médio de 12,65%, com variação entre 12,43% e 12,80%, amplitude de 0,37% e coeficiente de variação de 0,94%.

### Densidade aparente dos painéis de CLT de *E. urograndis*

A densidade aparente dos painéis de CLT foi determinada a partir dos corpos de prova submetidos aos ensaios de resistência à compressão e do módulo de elasticidade na direção do eixo ortotrópico principal dos painéis, conforme a Seção 5.2 da NBR 7190-3<sup>24</sup>. Os resultados são apresentados na **Tabela 2**.

A análise por meio do diagrama de caixa (*boxplot*) não indicou a presença de valores discrepantes na amostra. O tratamento estatístico resultou em densidade aparente média, corrigida para a umidade de 12%, de 782,70 kg/m<sup>3</sup>, com desvio padrão de 13,29 kg/m<sup>3</sup>, valor mínimo

de 762,16 kg/m<sup>3</sup>, valor máximo de 800,58 kg/m<sup>3</sup>, amplitude de 38,42 kg/m<sup>3</sup> e coeficiente de variação de 1,7%.

A densidade aparente característica dos painéis de CLT de *E. urograndis* é de 836,20 kg/m<sup>3</sup>.

**Tabela 2.** Densidade aparente dos painéis de CLT de *Eucalyptus urograndis*.

CP	B (mm)	H (mm)	L (mm)	Massa (gr)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_{12}$ (kg/m <sup>3</sup> )
1	51,5	47,0	152,4	297,75	807,16	800,58
2	50,6	48,0	152,5	290,90	785,38	778,98
3	50,5	48,2	152,4	285,05	768,42	762,16
4	50,3	48,0	151,7	290,02	791,83	785,38
5	51,2	47,7	152,7	297,83	798,62	792,11
6	51,2	47,7	152,0	290,81	783,39	777,01

Fonte: Os autores.

Quando comparada com valores médios de painéis de CLT publicados, observa-se que a densidade obtida é superior àquelas verificadas em publicações, que variam entre 490 e 680 kg/m<sup>3</sup> (Kazmierczak, Hillig & Iwakiri (2017)<sup>18</sup>; Almeida, Boroletto Júnior & Jankowsky (2004)<sup>19</sup>; Iwakiri *et al.* (2006)<sup>20</sup> e Bortoletto Junior (2003)<sup>21</sup>), e compatível com resultados de Guimarães Júnior *et al.* (2009)<sup>22</sup>, de 830 kg/m<sup>3</sup> para o *E. grandis*.

Em relação à da madeira serrada da mesma espécie e origem, a CLT apresentou densidade média 25,5% superior à obtida por Savi *et al.* (2025)<sup>26</sup>, de 623,44 kg/m<sup>3</sup>. Também apresentou densidade 22,6% superior à da madeira lamelada colada (MLC) da mesma espécie e origem, de 638,67 kg/m<sup>3</sup> (Savi *et al.*, 2026<sup>27</sup>).

### Propriedades mecânicas dos painéis de CLT de *E. urograndis*

As propriedades dos painéis de CLT foram avaliadas em função da resistência à compressão, tanto na direção do eixo principal de ortotropia, quanto na direção oblíqua das fibras e também com relação à resistência ao cisalhamento.

#### *Resistência à compressão dos painéis de CLT de *E. urograndis* na direção do eixo principal de ortotropia*

Por se tratar de madeira laminada cruzada, não há uma direção que caracterize o alinhamento das fibras. Assim, a determinação da resistência à compressão foi realizada na direção do eixo principal de ortotropia, considerado aquele que coincide com o alinhamento das fibras em uma das camadas e é ortogonal às fibras na camada cruzada. Os resultados foram obtidos a partir de uma amostra composta por seis corpos de prova, Figura 9, conforme a NBR 7190 (ABNT, 2022)<sup>24</sup>, e estão apresentados na **Tabela 3**.



**Figura 9.** Corpos de prova ensaiados a compressão no sentido do eixo principal e ortotropia do painel de CLT de *E. urograndis*. Fonte: Os autores.

**Tabela 3** - Dimensões dos corpos de prova e resistência a compressão do painel de CLT de *E. urograndis* na direção do eixo principal de ortotropia.

CP	B (mm)	H (mm)	L (mm)	Seção (cm <sup>2</sup> )	Força de ruptura (kN)	Tensão de ruptura (MPa)	$\sigma_{12}$ (MPa)
1	51,5	47,0	152,4	24,2050	92,780	38,33	40,21
2	50,6	48,0	152,5	24,2880	84,550	34,81	36,51
3	50,5	48,2	152,4	24,3410	83,340	34,24	35,91
4	50,3	48,0	151,7	24,1440	74,137	30,71	32,21
5	51,2	47,7	152,7	24,4224	82,012	33,58	35,22
6	51,2	47,7	152,0	24,4224	71,027	29,08	30,50

Fonte: Os autores.

A análise pelo diagrama de caixa (*boxplot*) não indicou a presença de valores discrepantes. O tratamento estatístico da amostra, composta por seis corpos de prova, resultou em resistência média, corrigida para a umidade de 12% de 35,09 MPa, com desvio padrão de 3,41 MPa, valor mínimo de 30,50 MPa, valor máximo de 40,21 MPa, amplitude de 9,71 MPa e coeficiente de variação de 9,7%.

A resistência característica a compressão do painel de CLT de *E. urograndis* é de 30,50 MPa. Em comparação com a madeira serrada da mesma espécie e origem, a resistência média foi 16,4% inferior, enquanto a resistência característica foi 1,5% superior (Savi et al., 2025)<sup>26</sup>. Em relação à MLC, a resistência média foi 32,4% inferior e a resistência característica, 36,1% inferior (Savi et al., 2026)<sup>27</sup>.

#### Análise de falha nos ensaios de compressão dos painéis de CLT de *E. urograndis* na direção do eixo principal de ortotropia

A Figura 10 ilustra o aspecto dos corpos de prova após os ensaios, evidenciando que a falha ocorreu predominantemente na linha de cola, com maior incidência na base dos corpos de prova.



**Figura 10.** Aspecto dos corpos de prova do painel de CLT de *E. urograndis*, após os ensaios à compressão na direção do eixo principal de ortotropia. Fonte: Os autores.

Na imagem ampliada ( $\approx 1000x$ ), apresentada na Figura 11, observa-se que a falha ocorreu por uma combinação de mecanismos: separação entre a madeira e o adesivo e o esgarçamento das fibras da madeira na interface adesivo-madeira.

Esse comportamento pode ser associado à diferença de resistência da madeira nas direções paralelas e normal às fibras. Conforme observado por Savi et al. (2025)<sup>26</sup>, a resistência à compressão normal às fibras da madeira serrada de mesma espécie e origem (16,00 MPa), corresponde a apenas 38,0% da resistência na direção paralela às fibras (41,96 MPa).



**Figura 11.** Imagem ampliada em cerca de 1000x onde se observa a falha no ensaio da CLT de *E. urograndis* à compressão, à esquerda pela separação da madeira com o adesivo e à direita o esgarçamento das fibras, também na interface adesivo madeira. Fonte: Os autores.

Esse fato faz com que a disposição das fibras cruzadas entre as camadas provoque a falha nas lâminas submetidas à ação da carga de forma ortogonal, levando as camadas com fibras orientadas na direção da aplicação da carga a sofrerem flambagem.

#### Modulo de elasticidade (MOE) na direção do eixo principal de ortotropia do painel de CLT de *E. urograndis*

Com base nos resultados dos ensaios realizados à compressão na direção do eixo principal de ortotropia, foi determinado o módulo de elasticidade (MOE), dos painéis de CLT de *E. urograndis*, conforme o procedimento de caracterização simplificada descrito na NBR 7190-3<sup>24</sup>. Os resultados são apresentados na Tabela 4.

**Tabela 4** - Módulo de elasticidade do painel de CLT de *E. urograndis*, na direção do eixo principal de ortotropia.

CP	$\sigma$ (MPa)	$\epsilon_{50\%}$	$\epsilon_{10\%}$	E (MPa)	$E_{12}$ (MPa)
1	38,33	0,00113	0,00000	13.640,72	14.085,41
2	34,81	0,00136	0,00005	10.604,42	10.950,12
3	34,24	0,00113	0,00019	14.535,88	15.009,75
4	30,71	0,00109	0,00014	12.880,90	13.300,82
5	33,58	0,00134	0,00005	10.393,58	10.732,41
6	29,08	0,00110	0,00012	11.875,79	12.262,94

Fonte: Os autores.

A análise pelo diagrama de caixa (*boxplot*) não indicou a presença de dados discrepantes na amostra.

O tratamento estatístico indicou um MOE médio, corrigido para a umidade de 12%, de 12724 MPa, com desvio padrão de 1717 MPa, valores mínimo e máximo de 10732 MPa e 15010 MPa, respectivamente, amplitude de 4278 MPa e coeficiente de variação de 13,5%.

O valor característico do MOE foi de 10732 MPa.

Quando comparado o valor médio com resultados de outras pesquisas envolvendo a mesma espécie, observa-se que este é 102,8% superior ao obtido por Kazmierczak, Hillig & Iwakiri (2017)<sup>18</sup>, de 6275 MPa, e entre 2,0% e 3,2% inferior aos valores reportados por Almeida, Boroletto Júnior & Jankowsky (2004)<sup>19</sup>, de 12979 MPa e 13142 MPa. Observa-se, ainda, uma redução em relação à madeira serrada da mesma espécie e origem, da ordem de 12,8% (14593 MPa, Savi et al., 2025)<sup>26</sup>, bem como um valor 48,6% inferior ao da madeira lamelada colada (MLC) da mesma espécie e origem (24758 MPa, Savi et al., 2026)<sup>27</sup>.

Quando analisado o valor característico, em comparação à madeira serrada da mesma espécie e origem, este se mostra 5,1% superior (10215 MPa, Savi et al.,

2025)<sup>26</sup>), entretanto, é 38,1% inferior ao valor correspondente à MLC da mesma espécie e origem (17331 MPa, Savi et al., 2026<sup>27</sup>).

### Resistência à compressão dos painéis de CLT de *E. urograndis* com as fibras da madeira oblíquas

Considerando que o objetivo do estudo é avaliar o potencial dos painéis de CLT de *E. urograndis* para aplicação como paredes estruturais, atuando como painéis de cisalhamento, foram realizados ensaios de compressão em corpos de prova com as fibras da madeira inclinadas em relação ao eixo principal de ortotropia. Essa abordagem permitiu verificar se a resistência do material mantém relação com aquela observada quando as solicitações são aplicadas nas direções paralela e perpendicular às fibras, uma vez que, em painéis de CLT aplicados em paredes estruturais, as ações horizontais, como as de vento, são resistidas por mecanismos combinados de compressão e cisalhamento.

Foram ensaiados seis corpos de prova, todos extraídos do mesmo painel de onde se obteve os corpos de prova ensaiados na direção do eixo principal de ortotropia, possibilitando uma comparação direta entre os resultados, uma vez que as amostras possuem a mesma origem e histórico de fabricação.

A Figura 12 apresenta os corpos de prova ensaiados, bem como a demarcação das linhas utilizadas para a determinação da inclinação das fibras. Essa inclinação foi obtida por meio de cálculos geométricos, a partir de medições realizadas com paquímetro com resolução de 0,1 mm. O ângulo de inclinação das fibras em relação ao eixo ortotrópico secundário variou de 22,4° a 26,7°, que resultou numa inclinação média de 24,87°, correspondente a 46,3%.



**Figura 12.** Corpos de prova de CLT *E. urograndis* com as fibras inclinadas em relação ao eixo ortotrópico secundário. **Fonte:** Os autores

Os resultados dos ensaios de resistência a compressão dos painéis de CLT de *E. urograndis* com fibras inclinadas são apresentados na **Tabela 5**.

**Tabela 5** - Resistência a compressão dos painéis de CLT de *E. urograndis* com as fibras inclinadas em relação aos eixos ortotrópicos.

CP	B (mm)	H (mm)	L (mm)	Seção (cm <sup>2</sup> )	Força de ruptura (kN)	$\sigma$ (MPa)	$\sigma_{12}$ (MPa)
1	51,3	49,1	150,9	25,1883	37,840	15,02	15,76
2	52,3	49,4	151,3	25,8362	43,472	16,83	17,65
3	52,3	50,1	151,1	26,2023	42,715	16,30	17,10
4	51,6	49,2	150,7	25,3872	42,281	16,65	17,47
5	52,2	49,2	151,0	25,6824	44,938	17,50	18,35
6	52,4	49,0	151,6	25,6760	43,246	16,84	17,67

**Fonte:** Os autores.

A análise pelo diagrama de caixa (*boxplot*) indicou o corpo de prova 'CP1' como elemento discrepante, sendo este desconsiderado no tratamento estatístico. Após a exclusão, obteve-se resistência à compressão, corrigida para a umidade de equilíbrio de 12%, de 17,65 MPa, com desvio padrão de 0,45 MPa, valores mínimo e máximo de 17,10 MPa e 18,35 MPa, respectivamente, amplitude de 1,25 MPa e coeficiente de variação de 2,6%.

A resistência à compressão característica a compressão do painel de CLT de *E. urograndis* com as fibras inclinadas de 24,87° em relação ao eixo ortotrópico secundário foi de 18,40 MPa.

Quando comparados aos resultados obtidos na direção do eixo ortotrópico principal (35,09 MPa), observa-se uma redução significativa da resistência (49,7%), indicando a atuação combinada de esforços de compressão e cisalhamento, sendo a redução vinculada à resistência de cisalhamento é inferior à normal, que resulta em maior deformabilidade do material. Quando comparados os resultados da resistência característica, observa-se também uma redução de 47,5%. Considerando que os corpos de prova foram extraídos do mesmo painel, infere-se, para aplicações estruturais envolvendo solicitações fora das direções ortogonais das fibras, que se deve adotar um coeficiente de minoração da ordem de 2, ou seja, considerar aproximadamente 50% da sua resistência obtida nos ensaios realizados na direção principal de ortotropia.

### Análise de falha nos ensaios de compressão dos painéis de CLT de *E. urograndis* com fibras inclinadas

A **Figura 13** apresentada o aspecto dos corpos de prova de CLT de *E. urograndis* após a realização dos ensaios de compressão com fibras inclinadas.



**Figura 13.** Aspecto dos corpos de prova com fibras inclinadas após os ensaios de compressão. **Fonte:** Os autores.

Diferentemente do observado nos ensaios de compressão realizados na direção do eixo principal de ortotropia, nos quais a falha ocorreu predominantemente na interface madeira-adesivo, apenas um dos corpos de prova com fibras inclinadas apresentou comportamento semelhante. Ainda assim, essa falha ocorreu de forma combinada com um plano de cisalhamento localizado na região inferior do corpo de prova, sugerindo a ocorrência de flambagem localizada das lâminas, possivelmente associada a falhas pontuais de adesão.

Esse comportamento também é observado no segundo corpo de prova à esquerda da **Figura 13**, no qual uma das lâminas apresentou encurvamento localizado. Tais evidências indicam que o mecanismo de ruptura está fortemente associado à anisotropia da madeira.

Resultados obtidos por Savi *et al.* (2025)<sup>26</sup>, indicam que a resistência média à compressão normal da madeira serrada da mesma espécie e origem (16,00 MPa), corresponde a apenas 38,0% da resistência paralela às fibras (41,96 MPa), o que explica a ocorrência preferencial de falha nas lâminas com fibras orientadas ortogonalmente à direção de aplicação da carga.

#### Módulo de elasticidade dos painéis de CLT de *E. urograndis* com fibras inclinadas

O módulo de elasticidade dos painéis de CLT de *E. urograndis* com fibras inclinadas em relação ao eixo ortotrópico secundário em média de 24,87°, foi determinado a partir dos ensaios de compressão, conforme o procedimento descrito na NBR 7190-3 (ABNT, 2022)<sup>24</sup>, cujos resultados estão apresentados na Tabela 6.

**Tabela 6** - Módulo de elasticidade do painel de CLT de *E. urograndis* com fibras inclinadas de 24,87° em relação ao eixo ortotrópico secundário.

CP	$\sigma$ (MPa)	$\epsilon_{50\%}$	$\epsilon_{10\%}$	E (GPa)	E12 (GPa)
1	15,02	0,00268	0,00047	2.723,39	2.812,17
2	16,83	0,00317	0,00074	2.761,10	2.851,11
3	16,30	0,00309	0,00060	2.613,90	2.699,11
4	16,65	0,00296	0,00064	2.860,92	2.954,19
5	17,50	0,00165	0,00046	5.849,84	6.040,54
6	16,84	0,00290	0,00055	2.869,66	2.963,21

Fonte: Os autores.

A análise pelo diagrama de caixa (*boxplot*) indicou que o corpo de prova CP5 apresentou comportamento discrepante, sendo desconsiderado no tratamento estatístico.

Após a exclusão, obteve-se módulo de elasticidade médio, corrigido para a umidade de equilíbrio de 12%, de 2856 MPa, com desvio padrão de 109 MPa, valores mínimo e máximo de 2699 MPa e 2963 MPa, respectivamente, amplitude de 264 MPa e coeficiente de variação de 3,8%.

O valor característico do módulo de elasticidade foi de 2845 MPa.

Em comparação com o módulo obtido na direção do eixo ortotrópico principal (10732 MPa), observa-se uma redução de aproximadamente 73,5%, indicando que o módulo associado às fibras inclinadas representa apenas 26,5% do valor obtido na direção do eixo ortotrópico principal. Esse comportamento reforça a necessidade de adoção de fator de minoração do módulo de elasticidade da ordem de 4 para aplicações estruturais do painel de CLT de *E. urograndis*, em que as cargas não atuem segundo as direções ortogonais das fibras da madeira.

#### Resistência ao cisalhamento do painel de CLT de *E. urograndis*

O painel de CLT também foi ensaiado para a determinação da resistência ao cisalhamento, utilizando-se a

prensa EMIC 300, equipada com célula de carga de 300 kN e adaptada com dispositivo específico para esse tipo de ensaio. Os procedimentos foram realizados de acordo com a NBR 7190-3 (ABNT, 2022), a partir de uma amostra composta por oito corpos de prova, conforme ilustrado na **Figura 14**.



**Figura 14.** Corpos de prova ensaiados para a determinação da resistência ao cisalhamento do painel de CLT de *E. urograndis*. Fonte: Os autores.

A Tabela 7 apresenta os resultados das aferições dimensionais e da resistência ao cisalhamento do painel de CLT de *E. urograndis*.

**Tabela 7.** Dimensões dos corpos de prova e resistência ao cisalhamento do painel de CLT de *E. urograndis*.

CP	B (mm)	H (mm)	Seção transversal (mm <sup>2</sup> )	Força de ruptura (N)	f <sub>v</sub> (MPa)	f <sub>v,12</sub> (MPa)
1	48,3	48,8	2.357,04	23.224,00	9,85	10,04
2	47,8	49,3	2.356,54	22.580,76	9,58	9,77
3	48,2	50,3	2.424,46	24.097,68	9,94	10,13
4	48,1	49,5	2.380,95	23.915,31	10,04	10,24
5	48,3	49,9	2.410,17	21.783,89	9,04	9,22
6	48,6	50,0	2.430,00	22.427,13	9,23	9,41
7	48,3	49,1	2.371,53	22.647,95	9,55	9,74
8	48,4	49,6	2.400,64	24.337,73	10,14	10,34

Fonte: Os autores.

A análise por meio de *boxplot* não identificou a presença de valores discrepante na amostra. O tratamento estatístico indicou uma resistência média ao cisalhamento do painel de CLT de *E. urograndis*, na umidade de equilíbrio de 12%, de 9,86 MPa, com desvio padrão de 0,40 MPa, valor mínimo de 9,22 MPa, valor máximo de 10,34 MPa, amplitude de 1,12 MPa e coeficiente de variação de 4,1%.

A resistência característica ao cisalhamento do painel de CLT de *E. urograndis* foi de 10,06 MPa.

Ao se comparar a resistência média obtida (9,86 MPa) com os valores observados para a madeira serrada e para a madeira lamelada colada (MLC) da mesma espécie e origem, verifica-se que os resultados são compatíveis, correspondendo, respectivamente, a 9,99 MPa e 10,01 MPa (Savi *et al.*, 2025<sup>26</sup>) e Savi *et al.*, 2026<sup>27</sup>). Já a resistência característica (10,06 MPa) apresentou desempenho superior aos valores observados para a madeira serrada (9,20 MPa) e para a MLC (7,03 MPa), sendo essa diferença mais expressiva em relação à MLC.

Os resultados obtidos neste estudo evidenciam a necessidade de um melhor entendimento do comportamento dos painéis de CLT quando submetidos a esforços

normais ou tangenciais, especialmente em aplicações estruturais nas quais atuam como painéis de diafragma rígido ou de cisalhamento. Nesse contexto, os autores consideram que os objetivos de avaliar o potencial dos painéis de CLT de *E. urograndis* foram atingidos, demonstrando sua viabilidade estrutural e indicando a necessidade de adoção de fatores de minoração quando da aplicação de cargas fora das direções ortogonais das fibras no painel.

## 5. CONCLUSÃO

O presente estudo teve como objetivo principal avaliar o potencial de utilização de painéis de madeira laminada cruzada (CLT) produzidos com *Eucalyptus urograndis* como paredes estruturais, capazes de absorver esforços horizontais, especialmente aqueles decorrentes da ação do vento, atuando como painéis de diafragma rígido ou painéis de cisalhamento. A partir dos resultados obtidos, verificou-se que os painéis avaliados apresentam desempenho mecânico compatível com essa função estrutural, desde que sejam respeitadas as particularidades associadas à anisotropia do material e ao modo de solicitação.

Os resultados experimentais demonstram a viabilidade técnica do *E. urograndis* na fabricação de CLT, evidenciada pelos valores de densidade, resistência à compressão, módulo de elasticidade e resistência ao cisalhamento, que se mostraram compatíveis ou superiores aos observados em painéis de CLT de outras espécies amplamente estudadas. A elevada densidade do material, aliada ao desempenho mecânico obtido, indica que essa espécie, proveniente de florestas plantadas e de ciclo relativamente curto, apresenta elevado potencial para aplicação em sistemas construtivos industrializados em madeira no contexto brasileiro.

A análise dos modos de ruptura revelou que as falhas ocorreram predominantemente na linha de cola, associadas à separação adesivo-madeira e ao esgarçamento das fibras, bem como à flambagem localizada das lâminas, sobretudo naquelas com fibras orientadas ortogonalmente à direção de aplicação da carga. Um dos achados mais relevantes da pesquisa refere-se à disparidade de desempenho entre os ensaios realizados na direção do eixo ortotrópico principal e aqueles com fibras inclinadas, que simulam a biela de compressão em painéis de contraventamento. Esses mecanismos de falha estão diretamente relacionados à diferença de resistência da madeira nas direções paralela e normal às fibras, sendo que estudos realizados com a madeira de *E. urograndis* da mesma espécie indicam que a resistência normal às fibras corresponde a 38% da resistência paralela às fibras. Constatou-se, assim, uma redução da ordem de 50% na resistência à compressão e de cerca de 75% no módulo de elasticidade nos ensaios oblíquos. Dessa forma, a disposição cruzada das lâminas no painel favorece o rompimento prematuro das lâminas com fibras ortogonais à aplicação da carga, ocasionando o fenômeno da flambagem, o que destaca a importância do controle da qualidade da colagem e da compatibilidade entre o adesivo, o processo de prensagem e espécie utilizada.

Os ensaios realizados com solicitações fora das direções principais de ortotropia evidenciaram reduções significativas tanto na resistência à compressão quanto do módulo de elasticidade, quando comparados aos valores obtidos na direção do eixo ortotrópico principal. Esses resultados reforçam a necessidade de adoção de fatores de minoração no dimensionamento estrutural de painéis de CLT empregados como paredes estruturais ou painéis de cisalhamento, sendo sugeridos valores da ordem de 2 para a resistência e de 4 para o módulo de elasticidade, quando os esforços atuam de forma inclinada em relação aos eixos ortotrópicos do material e as propriedades são obtidas a partir de ensaios ortogonais às fibras da madeira. A aplicação direta de propriedades obtidas em ensaios unidimensionais pode conduzir à superestimação da capacidade resistente e da rigidez dos painéis.

O estudo contribuiu de forma relevante para o avanço do conhecimento científico e tecnológico na área de estruturas de madeira ao fornecer dados inéditos sobre o comportamento de painéis de CLT produzidos com *Eucalyptus urograndis*, sob diferentes ângulos de carregamento, ampliando a base de dados disponível para espécies tropicais de rápido crescimento. A pesquisa preenche uma lacuna importante quanto ao comportamento real de painéis de CLT atuando como diafragmas rígidos, alertando projetistas e normativas técnicas para a necessidade de considerar a interação complexa entre as camadas cruzadas e a direção dos esforços. Os resultados obtidos fornecem subsídios técnicos para um dimensionamento estrutural mais seguro de paredes em CLT, incentivam o uso de espécies alternativas ao *Pinus* em sistemas construtivos em madeira e reforçam o papel da pesquisa experimental no desenvolvimento e consolidação de soluções construtivas sustentáveis no contexto da engenharia e da arquitetura.

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à direção e os colaboradores da empresa Integração Florestal, da cidade de Altônia-PR, em especial *in memoriam* a Rafael Furio Peres, grande incentivador do trabalho, responsável pela produção dos painéis de CLT utilizados nesta pesquisa, sem os quais sua realização não teria sido possível.

## 7. REFERÊNCIAS

- [1] NC State University. CLT Panels USA: History of CLT. 2025. [Acesso em: 02 Jan. 2026]. Disponível em: <https://sites.cnr.ncsu.edu/clt-panels/history-of-cross-laminated-timber/#:~:text=In%20the%20early%201990's%20an,is%20a%20heavy%20construction%20system%E2%80%9D>. Acesso em: 12 Jan. 2026.
- [2] Walsh, FJ & Watts, RL. Composite Lumber. United States Patent Office. Tacoma, Washington, 1923. [Acesso em: 12 Jan 2026]. Disponível em: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfndmkaj/https://www.smartlam.com/wp-content/uploads/2020/08/US1465383.pdf>. Acesso em: 02 Jan 2026.
- [3] Giorgi, RSN; Quirino, VA & Meirelles, CRM. Contexto para a utilização da madeira como sistema estrutural em

- edifícios habitacionais. Brazilian Journal of Development, Curitiba. 2020; 6(3):9760-9775.  
<https://doi.org/10.34117/BJDV6N3-014>
- [4] Victoria and Albert Museum - V&A. Material of the Modern World: A short history of plywood in ten-ish objects. [Acesso em: 12 Jan 2026]. Disponível em: <https://www.vam.ac.uk/articles/a-history-of-plywood-in-ten-objects#:~:text=Plywood%20is%20made%20by%20gluing,Elevated%20plywood%20railway%2C%201867>
- [5] Romagnano, LFT; Brazolin, S; Silva, GA & Lopez, GAC. Controle integrado da biodeterioração de sistemas construtivos em madeira. In: 2º workshop de tecnologia de processos e sistemas construtivos, 2019, São Paulo. Anais do 2º Workshop de Tecnologia de Processos e Sistemas Construtivos - TECSIC2019. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), 2019. [acesso em: 12 Jan 2026]. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/tecsic/article/view/333>
- [6] Vieira, MC; Brito, EO & Gonçalves, FG. Evolução Econômica do Painel Compensado no Brasil e no Mundo. Floram: Floresta e Ambiente. 2012; 19(3):277-285. <http://dx.doi.org/10.4322/floram.2012.033>
- [7] Brabdnner, R., Flatscher, A; Ringhofer, A; Schickhofer, G & Thiel, A. Cross laminated timber (CLT): overview and development. Eur. J. Wood Prod. 2016; 74(3):331-351. DOI 10.1007/s00107-015-0999-5
- [8] Amorim, STA; Mantilla, JNR & Carrasco, EVM. A madeira laminada cruzada: aspectos tecnológicos, construtivos e de dimensionamento. Rio de Janeiro: Revista Matéria - Suplemento, artigo e-11937, 2017. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620170005.0273>
- [9] Rocha, MGF; Jannuzzi, GDSA; Oliveira, CB & Rodrigues Junior, AS. Sistema construtivo *wood frame* no Brasil. Curitiba: Brazilian Journal of Animal and Environmental Research. 2022; 5(4):3564-3574. DOI: 10.34188/bjaerv5n4-009
- [10] Finatti, EM & Stamato, GC (colaboradores). Construção de Casas em *Wood Frame* tem nova Norma Técnica. Revista eletrônica AECweb: Redação AECweb/e-Construmarket, publicado em 22 de Ago de 2023. [Asseso em: 12 Jan 2026]. Disponível em: <https://www.aecweb.com.br/revista/materias/esta-em-vigor-a-norma-tecnica-do-sistema-construtivo-wood-frame/24854>
- [11] Rezende, JC; Rodrigues, FC; Caldas, RB & Cardoso, ACS. Estudo experimental da ligação de placas de compensado estrutural com perfis do sistema construtivo *light steel framing* visando a redução de aço no sistema. Florianópolis: VII Ensus - Encontro de Sustentabilidade em projeto. Universidade Federal de Santa Catarina, de 8 a 10 de Maio de 2019. [Acesso em: 12 Jan 2026]. Disponível em: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpajpcglefindmkaj/https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/244356/VOLUME-1-60-72.pdf?sequence=1>
- [12] Bredel Jr, DH. *Performance capabilities of light-frame shear walls sheathed with long OSB panels* [dissertação]. Tese submetida ao *Virginia Polytechnic Institute and State University*, para obtenção do título de mestre em Ciência na Engenharia Civil. Blacksburg: Virginia Tech, 2003. [Acesso em: 12 Jan 2026] Disponível em: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpajpcglefindmkaj/https://vtechworks.lib.vt.edu/server/api/core/bitstreams/9e5415c6-5a52-4dfa-8bb6-d6ed163381e4/content>.
- [13] Espíndola, LR. Habitação de interesse social em madeira conforme os princípios de coordenação modular e conectividade. [dissertação] Florianópolis: Dissertação de mestrado em Engenharia Civil - PPGEC, da Universidade Federal de Santa Catarina, 2010. [Acesso em 12 de Jan 2026] disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/93836>
- [14] Stafford Smith, B & Carter, C. A method of analysis for infilled frames. Southampton: University of Southampton, Southampton College of Tecnology, 1969. [Acesso em: 25 Abr 2025] Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/480296193/A-method-of-analysis-for-infilled-frames-Smith-1969>.
- [15] Bevilaqua, R. Estudo comparativo do desempenho estrutural de prédios estruturados em perfis formados a frio segundo os sistemas aporticado e "*Light Steel Framing*". Dissertação de mestrado em Engenharia de Estruturas do programa de pós-graduação da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. p. 225. Belo Horizonte, 2005. [Acesso em: 25 Abr 2025] Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/PASA-89AHN6/1/180.pdf>.
- [16] Oliveira, DVC. Comportamento de pórticos de betão armado preenchidos com paredes de alvenaria. Dissertação de mestrado em Estruturas de Engenharia Civil da Universidade do Porto. Faculdade de Engenharia. Departamento de Engenharia Civil. Porto: Publicação subsidiada pela Junta Nacional de Investigação Científica e Tecnológica. P. 185, 1995. [Acesso em: 25 Abr 2025] Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/13333>.
- [17] Mainstone, RJ. On the stiffnesses and strengths of infilled frames. Hertfordshire (UK): Buinding Reserach Station. 1971; V. 2-42,. [Acesso em: 25 Abr 2025] Disponível em: <https://www.google.com/search?client=firefox-b-d&q=On+the+stiffnesses+and+strengths+of+infilled+frames>.
- [18] Kazmierczak, S; Hillig, E & Iwakiiri, S. Painéis Compensados Fabricados com Lâminas de Três Espécies de Eucaliptos. Revista Floresta e Ambiente - Floram, 2017; v. 24, e00111614,. <http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.111614>
- [19] Almeida, RR; Rotoletto Junior, G & Jankowsky, IP. Produção de compensados a partir da madeira de clones do híbrido *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophilla*. Revista Floresta e Ambiente. 2004; 11(1):14-24. [Acesso em: 14 Jan 2025] Disponível em: <https://www.floram.org/article/588e2207e710ab87018b4608/pdf/floram-11-1-14.pdf>
- [20] Iwakiri, S; Stinghen, ABM; Nunes, ELS; Zamarian, EHC & Adriaizola, MKO. Utilização de Lâminas de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus maculata* como alternativas para produção de piso laminado com montagem direta. Curitiba: Floresta. 2006; 36(3). <https://doi.org/10.5380/rf.v36i3.7521>
- [21] Bortoletto J. Produção de compensados com 11 espécies do gênero *Eucalyptus*, avaliação das suas propriedades físico-mecânicas e indicações para utilização. Scientia Forestalis. 2003; 63:65-78. [Acesso em: 12 Jan 2025] Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr63/cap06.pdf>
- [22] Guimarães Júnior, JB; Mendes, LM; Mendes, RF & Mori,

- FA. Painéis compensado de eucalipto: estudo de caso de espécies e procedências. Lavras: Cerne, n. 1, v. 15, p. 10-18, 2009. [Acesso em: 12 Jan 2026] Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=74413015002>
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] *Student*. The Probable Error of a Mean. Oxford University Press: Biometrika, v 6, n. 1, 1908, p 1-25. Disponível em: <https://doi.org/10.2307/2331554>
- [26] Savi, O; Freitas, JH; Espessato, AR; Fabiche, MNF, Coutinho, S & Zito, AN. Avaliação da madeira de *Eucalyptus urograndis* para uso na construção civil. Master Editora: Journal of Exact Sciences – JES. 2025; 47(1):5-13.
- [27] 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. 2026; 48(1):27-40.