

Resistência e rigidez ao rolling shear de elementos de MLCC produzidos com madeira de Marupá “*Simarouba amara*”

Rolling shear strength and stiffness of CLT elements made with Marupá wood “*Simarouba amara*”

Tayla Castilho Criado¹ , João Vítor Felipe Silva² , Maria Fernanda Felipe Silva³ ,
Antonio José Santos Junior¹ , André Luis Christoforo¹ , Julio Cesar Molina⁴ 

¹Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, SP, Brasil.

²Universidade Laval, Rue de l'Université. 2325, Québec, Canadá.

³Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá, SP, Brasil.

⁴Universidade de São Paulo. São Carlos, SP, Brasil.

e-mail: tayla.criado@hotmail.com, joao-vitor.felipe-silva@sbf.ulaval.ca, mff.silva@unesp.br, antoniojsj@estudante.ufscar.br, alchristoforo@ufscar.br, julio.molina@usp.br

RESUMO

Este estudo investigou a resistência (f_{vt}) e a rigidez (G_{vt}) ao cisalhamento transversal (*rolling shear*) de elementos de madeira lamelada colada cruzada (MLCC) produzidos com madeira nativa brasileira de Marupá (*Simarouba amara*). Para isso, foram adotadas abordagens numérica e experimental, além do desenvolvimento de uma equação analítica para avaliar a rigidez (G_{vt}) das camadas transversais de painéis com três camadas de mesma espessura por meio de ensaios de flexão. Durante a etapa experimental, foram feitos ensaios de cisalhamento em dois modelos de corpos de prova (vertical e inclinado), além de ensaios de flexão em vigas e em painéis. A modelagem numérica baseou-se no método dos elementos finitos, utilizando-se o *software* ABAQUS para a avaliação das amostras. Os valores do G_{vt} foram de duas a seis vezes superiores aos valores de referência, enquanto a resistência (f_{vt}) foi de duas a três vezes superior. A equação analítica desenvolvida mostrou-se adequada para a determinação da rigidez ao *rolling shear* (G_{vt}) por meio de ensaios de flexão. A modelagem numérica indicou que as falhas ocorreram predominantemente na camada central das amostras de MLCC, em razão da concentração de tensões de cisalhamento, com contribuição de tensões normais de compressão (nos ensaios de cisalhamento) e de tração (nos ensaios de flexão). O método de ensaio com corpo de prova inclinado demonstrou ser o mais apropriado para determinar as propriedades relacionadas ao cisalhamento transversal (*rolling shear*).

Palavras-chave: Madeira Maciça; Estruturas De Madeira; Madeira Industrializada.

ABSTRACT

This study investigated the rolling shear strength (f_{rs}) and stiffness (G_{rs}) of cross-laminated timber (CLT) elements produced with Brazilian native Marupá wood (*Simarouba amara*). Therefore, numerical and experimental approaches were used, and an analytical equation was developed for three-layer panels of equal thickness for the determination of the shear stiffness (G_{rs}) of the transverse layers of three-layer panels with equal thickness through bending tests. During the experimental phase, shear tests were conducted on two specimen models (vertical and inclined), and bending tests were performed on beams and panels. The numerical modelling was based on the finite element method, and the ABAQUS software was used to evaluate the tested samples. The rolling shear stiffness (G_{rs}) was two to six times higher, while the strength (f_{rs}) was two to three times. The developed analytical equation was suitable for determining the rolling shear stiffness (G_{rs}) through bending tests. The numerical modeling revealed that the failure primarily occurred in the central layer of the CLT samples.

due to the shear stresses concentration, with contributions from normal compression (for shear) and tensile stresses (for bending). The inclined shear test method was the most appropriate for determining the rolling shear properties.

Keywords: Mass Timber; Timber Structures; Engineered Wood.

1. INTRODUÇÃO

A madeira lamelada colada cruzada (MLCC) é um produto de madeira industrializada na forma de painéis pré-fabricados, compostos por camadas de lamelas dispostas em ângulos cruzados, tipicamente a 90 graus, coladas com adesivos estruturais [1]. Os painéis são formados por um número ímpar de camadas, com larguras que variam de 60 centímetros a três metros, comprimentos de até 18 metros e espessuras de até 508 mm. Em configurações especiais, podem apresentar ângulos de cruzamento distintos, como 45 graus, ou camadas adjacentes coladas na mesma direção, de modo a atender propriedades estruturais específicas [2].

O uso crescente da MLCC, especialmente no Brasil, decorre de suas vantagens ambientais, elevada relação resistência/peso, rapidez construtiva e apelo estético. As estruturas de MLCC consomem significativamente menos carbono em sua produção do que estruturas em concreto armado, e seu método industrializado reduz o tempo de construção em até 30% quando comparado aos métodos tradicionais. Em termos de desempenho, oferece flexibilidade de projeto, isolamento térmico e acústico, bom comportamento em sismos, podendo ainda ser aplicada em diversas soluções estruturais, como paredes e lajes [3].

Apesar do aumento na produção e utilização deste produto, ainda não existem métodos de projeto e ensaios padronizados aceitos internacionalmente para a determinação de suas propriedades de cisalhamento, especialmente o cisalhamento transversal (*rolling shear*). A determinação dessas propriedades é fundamental, pois representa um fator crítico para o desempenho dos painéis de MLCC em sistemas de piso e parede [4].

Recentemente, diversos estudos concentraram-se na análise dessas propriedades, com os ensaios experimentais divididos principalmente em ensaios de cisalhamento em lamelas ou corpos de prova de MLCC e de flexão aplicados a painéis ou vigas. Os ensaios de cisalhamento foram desenvolvidos com base em métodos de ensaio indicados para determinar a resistência ao cisalhamento paralelo, da resistência ao cisalhamento de painéis de madeira e da resistência ao cisalhamento transversal (*rolling shear*) de painéis estruturais laminados. Esses procedimentos seguem as normas EN 408, EN 789 e ASTM D 2718 [5]. Já os ensaios de flexão são usados para determinar a resistência ao cisalhamento transversal *rolling shear* (f_{vt}) e a rigidez ao cisalhamento (GA)_{MLCC} dos painéis de MLCC. Tais métodos de ensaios foram baseados em métodos tradicionalmente utilizados para a caracterização de madeira estrutural (ASTM D 143), painéis de madeira (ASTM D 198) e materiais compósitos (ASTM D 2344) [5].

Os ensaios de cisalhamento utilizam amostras compostas por uma única lamela central unida a peças de madeira [6–8] ou a placas de aço laterais [9], e por elementos de MLCC tanto na posição vertical [10, 11] quanto inclinada [12–17]. Os ensaios de flexão mais empregados são os de três pontos [18–20] e os de quatro pontos [21–24].

O objetivo deste trabalho consistiu em se investigar, por meio de abordagens numérica e experimental, a resistência (f_{vt}) e a rigidez (G_{vt}) ao cisalhamento transversal (*rolling shear*) em elementos de MLCC produzidos com madeira nativa brasileira da espécie Marupá (Simarouba amara). Adicionalmente, buscou-se desenvolver uma equação analítica para o cálculo da rigidez ao cisalhamento de painéis com três camadas de mesma espessura, em função do módulo de elasticidade transversal (G) e da rigidez ao *rolling shear* (G_{vt}), uma vez que este caso não é contemplado pelas normas estrangeiras nem pelas normas brasileiras vigentes, com posterior análise dos resultados. Por fim, foi desenvolvido um modelo linear para o acompanhamento dos modos de ruptura obtidos nos ensaios experimentais.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a caracterização das propriedades relacionadas ao cisalhamento transversal (*rolling shear*) dos elementos de MLCC, foram realizados dois tipos principais de ensaios experimentais: ensaios de cisalhamento (em corpos de prova verticais e inclinados) e ensaios de flexão (em painéis e em vigas de MLCC). Nos ensaios de cisalhamento, o objetivo foi obter a resistência (f_{vt}) e a rigidez (G_{vt}) ao *rolling shear* de camadas transversais isoladas, enquanto nos ensaios de flexão buscou-se avaliar essas propriedades no comportamento global dos elementos estruturais. Além disso, as amostras de cisalhamento foram testadas nos dois modelos (vertical e inclinado), com variações de espessura de camada. Nos ensaios de flexão, foram utilizados dois painéis de MLCC (P-1 e P-2), sendo que o painel P-2 foi posteriormente seccionado longitudinalmente, originando três vigas de MLCC (B-1, B-2 e B-3), que também foram ensaiadas em flexão, para avaliar o comportamento dos diferentes formatos

de amostras em relação à rigidez ao cisalhamento. Inicialmente, foram realizados ensaios de flexão utilizando os painéis. Um dos painéis foi levado à ruptura (P-1), enquanto o outro foi ensaiado no regime elástico linear (P-2) com a força máxima aplicada igual a 40% da força última obtida no ensaio do primeiro painel, para evitar deformações plásticas nos elementos.

2.1. Materiais

Para o desenvolvimento deste estudo, foram utilizados os seguintes materiais: madeira nativa brasileira da espécie Marupá (*Simarouba amara*), pertencente ao grupo das folhosas, com densidade média de 410 kg/m³. A madeira foi previamente caracterizada de acordo com a norma NBR 7190-3 [25], para determinar suas propriedades mecânicas. Também foi empregado o adesivo estrutural Cascophen RS 216-M, com catalisador em pó preparado na proporção de 5:1, com uma gramatura de 300 g/m². As madeiras nativas são geralmente de média a alta densidade e apresentam menos defeitos em comparação às madeiras de florestas plantadas (Pinus e Eucaliptos), que necessitam de classificação mecânica e visual. O uso do Marupá, madeira nativa e de média densidade, é considerado vantajoso devido à sua menor quantidade de defeitos naturais. No entanto, ao se utilizar uma combinação diferente de espécie e adesivo dos habituais, empregada em produtos industrializados, deve-se realizar uma análise cuidadosa das juntas coladas. Esta análise pode ser feita por meio de ensaios de delaminação e resistência ao cisalhamento das linhas de cola conforme ABNT NBR 7190-7 [26].

2.2. Fabricação das amostras

Os corpos de prova foram fabricados por meio da colagem das lamelas de madeira com adesivo estrutural. Na aplicação do adesivo, buscou-se utilizar a gramatura recomendada pelo fabricante, realizando a pesagem da quantidade a ser aplicada. O espalhamento do adesivo foi feito em ambas as faces de contato das lamelas com o uso de pincéis, sem colagem lateral das bordas, estando a madeira com umidade de 12% (+/- 1%). A pressão de colagem adotada foi de 1,20 MPa, conforme especificado na NBR 7190-1 [25].

Para garantir a homogeneidade na aplicação da pressão de colagem, no processo de fabricação das amostras para os ensaios de cisalhamento e de flexão, utilizou-se uma prensa mecânica, específica para essa finalidade, com controle de pressão. A prensa aplica uma pressão em toda a superfície de colagem. Os corpos de prova para os ensaios de cisalhamento foram retirados de parte das amostras preparadas para os ensaios de flexão.

Após o tempo de cura do adesivo (sete dias), os corpos de prova foram cortados nas dimensões nominais finais para ensaio. Foram produzidas doze amostras para cada tipo de ensaio de cisalhamento, sendo seis para cada uma das espessuras de camada consideradas (25 mm e 38 mm), totalizando 24 amostras. A nomenclatura dos corpos de prova seguiu a espessura e o tipo de ensaio: VS25 e VS38 (corpos de prova verticais) e IS25 e IS38 (corpos de prova inclinados), sendo que o número indicado na nomenclatura se refere à espessura das camadas das amostras em milímetros. A vista frontal e as dimensões nominais são ilustradas na Figura 1a até a Figura 1d, sendo que a largura foi fixada em 100 mm para todas as amostras.

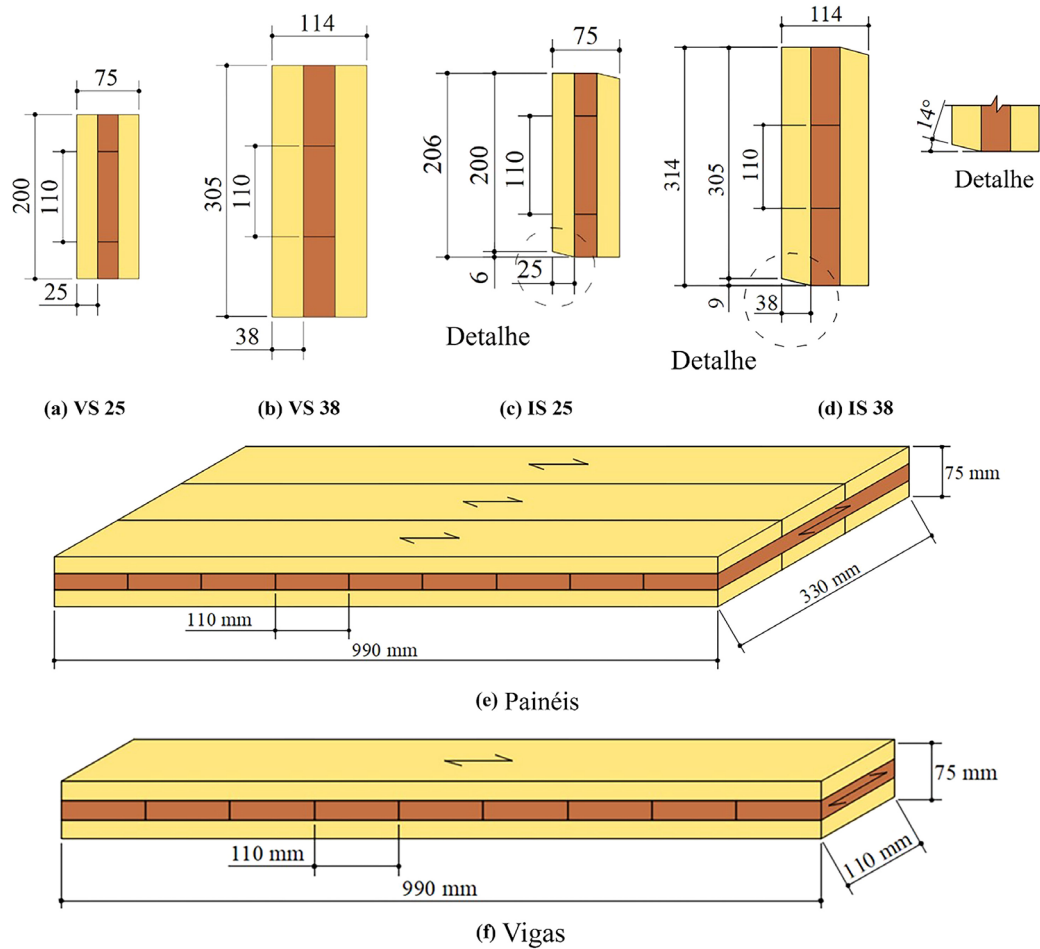
Para os ensaios de flexão, foram produzidos dois painéis de MLCC (P-1 e P-2) compostos por três camadas de lamelas com 25 mm de espessura e dimensões finais de 75 mm × 330 mm × 990 mm (espessura × largura × comprimento), conforme mostrado na Figura 1e. As lamelas foram agrupadas com base em seus módulos de elasticidade longitudinal (E_0), contendo três lamelas por camada longitudinal e onze por camada transversal, com área de seção transversal de 25 × 110 mm². As dimensões finais desses elementos encontram-se na Figura 1f.

A homogeneidade das amostras foi buscada pela seleção de uma madeira nativa e com poucos defeitos. Essa abordagem visa reduzir o coeficiente de variação das propriedades físicas e mecânicas da madeira, embora qualquer espécie de madeira apresente variações em suas propriedades, mesmo dentro de uma mesma árvore.

2.3. Ensaios experimentais

Os ensaios de cisalhamento vertical foram realizados conforme o item 6.3 da norma brasileira ABNT NBR 7190-7 [26], que especifica o método para determinar a resistência e da rigidez ao cisalhamento transversal (*rolling shear*) em corpos de prova com camadas transversais em MLCC. Na configuração original do ensaio (Figura 2), os dispositivos de medição de deslocamento (transdutores LVDT ou relógios comparadores) são fixados em bases magnéticas de apenas um lado do corpo de prova. Neste estudo, com o objetivo de medir o deslocamento relativo entre as camadas externas, os transdutores foram posicionados em ambos os lados da amostra (Figura 3).

Os ensaios de cisalhamento inclinado seguiram a metodologia de estudos anteriores. Em ambos os casos, foram executados utilizando uma máquina universal de ensaio da marca AMSLER, com capacidade de 250 kN,



Legenda

→ Direção das fibras Camadas longitudinais Camada transversal
Dimensões em milímetros (mm))

Figura 1: Corpos de prova dos ensaios de cisalhamento e flexão.

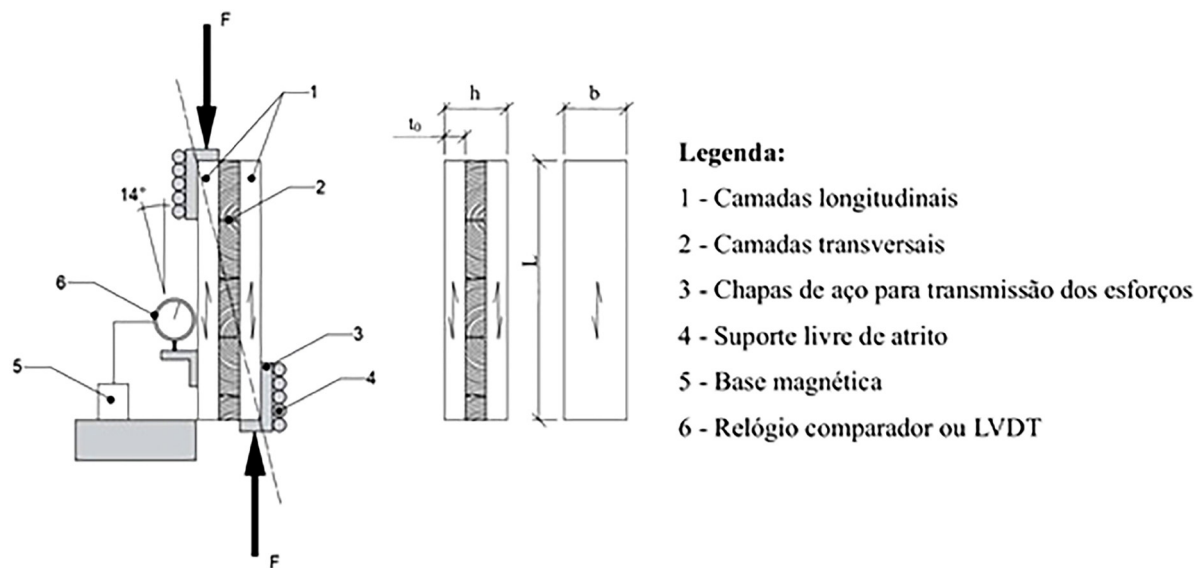
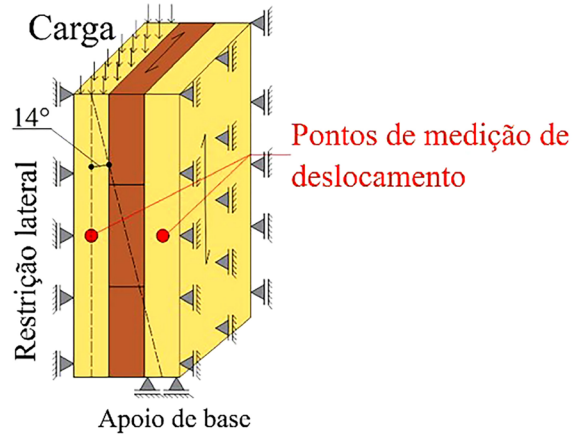
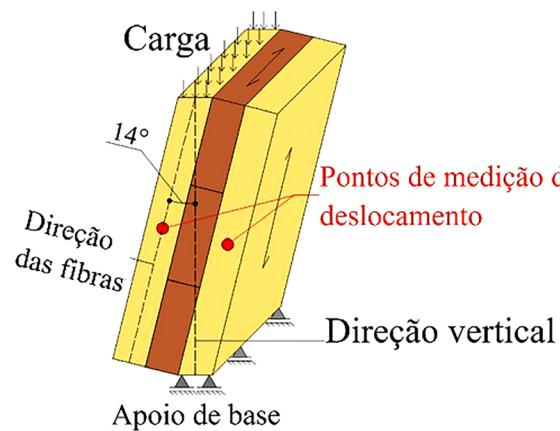


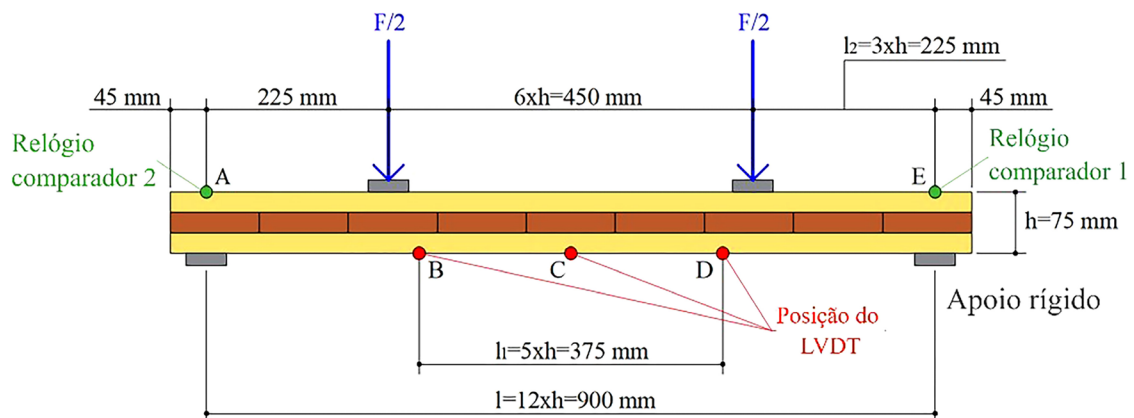
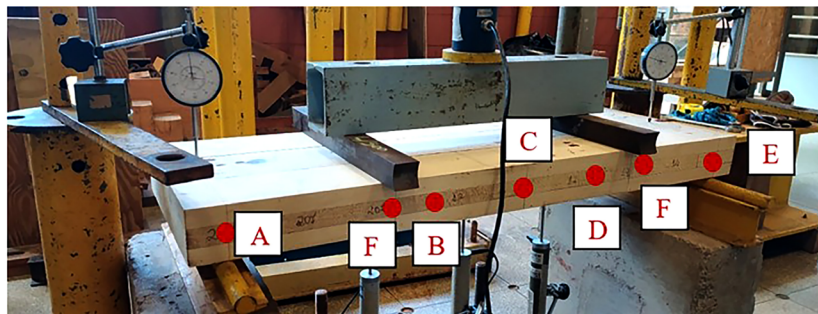
Figura 2: Ensaio alternativo de cisalhamento transversal (*rolling shear*) para madeira lamelada colada cruzada, adaptado da NBR 7190-7.



Ensaio de cisalhamento vertical



Ensaio de cisalhamento inclinado



Ensaio de flexão

Figura 3: Montagem dos corpos de prova para os ensaios de cisalhamento vertical e cisalhamento inclinado.

acoplada a um sistema externo de aquisição de dados da marca DiDaq, modelo B2, responsável pelo monitoramento da força aplicada e dos deslocamentos registrados durante os ensaios.

A resistência ao *rolling shear* (f_{vr}) dos ensaios de cisalhamento foi calculada em função do tipo de ensaio realizado, pela Equação 1 para os corpos de prova verticais e pela Equação 2 para os corpos de prova inclinados, em que F_u representa a força máxima, e L e b correspondem ao comprimento e à largura do corpo de prova, respectivamente. A rigidez (G_{vr}), por sua vez, foi determinada pela Equação 3, para os corpos de prova verticais e pela Equação 4 para os corpos de prova inclinados, a partir da inclinação da curva força-deslocamento (P/Δ) no intervalo entre 10% e 40% da força máxima (P), da espessura da camada transversal (t_{90}) e da inclinação do corpo de prova (θ), fixada em 14° .

$$f_{vr} = \frac{F_u}{L.b} \quad (1)$$

$$f_{vr} = \frac{F_u \cos \theta}{L.b} \quad (2)$$

$$G_{vr} = \frac{t_{90} P}{L.b \Delta} \quad (3)$$

$$G_{vr} = \frac{t_{90} P}{L.b \Delta} \cos \theta \quad (4)$$

Os ensaios de flexão foram conduzidos de acordo com os procedimentos estabelecidos pela NBR 7190-7 [26]. Os deslocamentos foram obtidos por meio de transdutores LVDT, posicionados no ponto C (meio do vão), nos pontos B e D, localizados no ponto médio da placa. Os relógios comparadores foram instalados nos apoios, nos pontos A e E, também no ponto médio da placa. A utilização de relógios comparadores ou transdutores LDVT é uma prática comum na determinação experimental dos deslocamentos ou na estimativa da deformação, especialmente no caso da avaliação das propriedades mecânicas da madeira ou de produtos industrializados. Estes dispositivos de instrumentação são recomendados pelas normativas que foram aplicadas na pesquisa para os ensaios realizados. Esse método de medição previamente empregado por RUAN *et al.* [27], foi adotado neste estudo como alternativa ao uso das galgas indicadas pela norma. O arranjo do ensaio de flexão é ilustrado na Figura 4, em que l representa o vão de flexão e l_1 a distância entre os pontos de medição dos deslocamentos locais.

A aplicação da força foi realizada por meio de um suporte de reação acoplado a um cilindro hidráulico com capacidade de 250 kN. As forças foram aplicadas até aproximadamente 50% da carga última, momento em que os dispositivos de medição de deslocamento foram removidos. Em seguida, o ensaio foi reiniciado e conduzido até a ruptura do elemento.

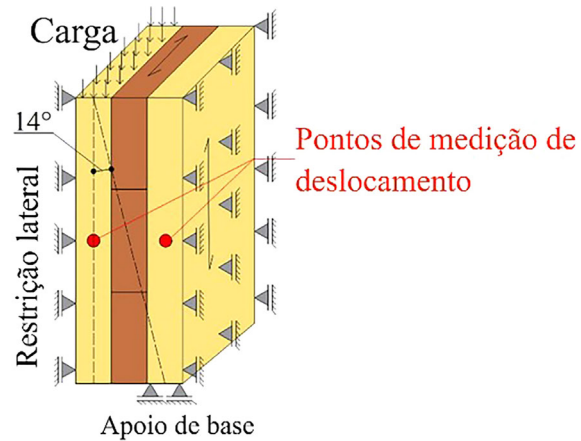
Um sistema externo de aquisição de dados registrou as forças aplicadas e os deslocamentos medidos pelos LVDTs. Os deslocamentos obtidos pelos relógios comparadores foram anotados em intervalos de força de 20 kN. Os ensaios de flexão das vigas B-1, B-2 e B-3 seguiram o mesmo procedimento adotado no ensaio do painel P-1.

O deslocamento global (δ_{global}) foi calculado conforme a Equação 5, enquanto o deslocamento local (δ_{local}) foi determinado pela Equação 6, em que δ_A , δ_B , δ_C , δ_D e δ_E correspondem aos deslocamentos medidos nos pontos A, B, C, D e E, respectivamente.

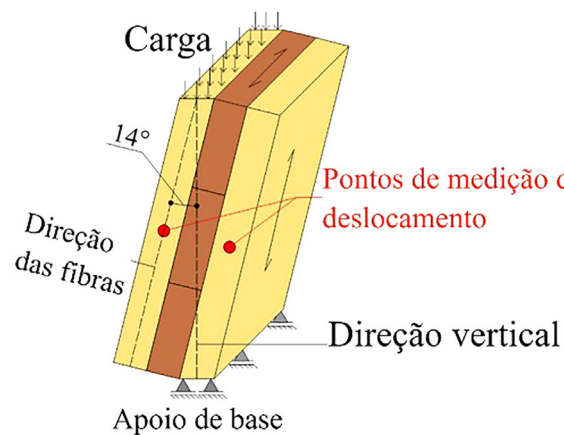
$$\delta_{global} = \delta_c - \frac{(\delta_A + \delta_E)}{2} \quad (5)$$

$$\delta_{local} = \delta_c - \frac{(\delta_B + \delta_D)}{2} \quad (6)$$

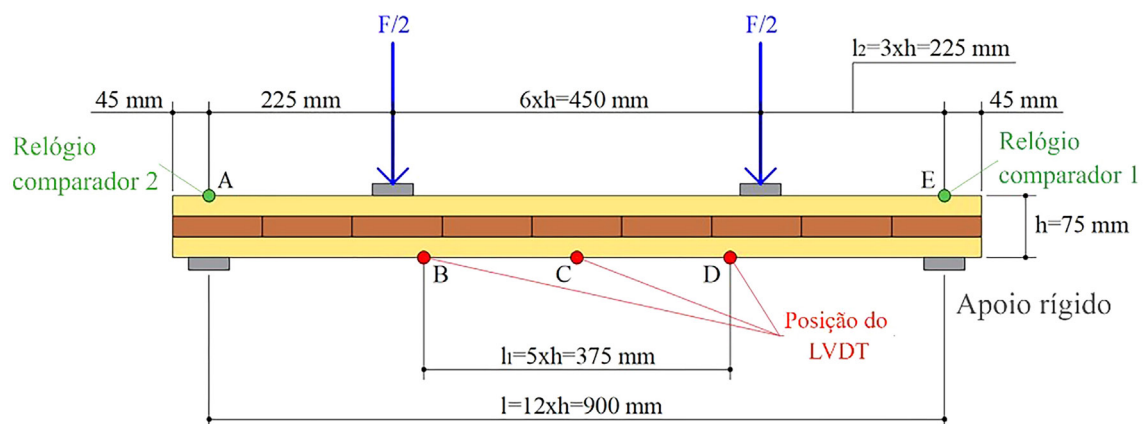
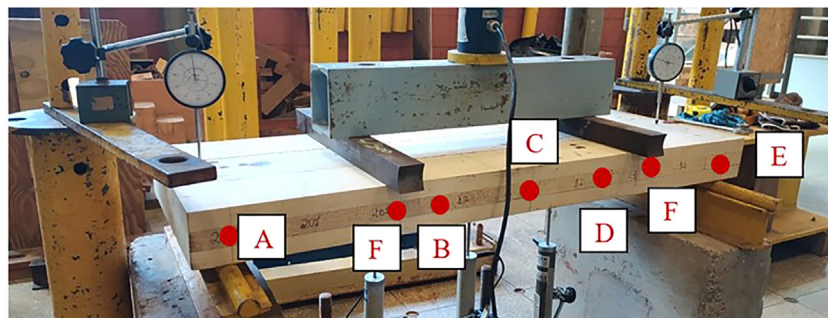
A rigidez local à flexão $(EI)_{MLCC,local,liq}$ e a rigidez aparente à flexão $(EI)_{MLCC,ap,liq}$ foram determinadas pelas Equações 7 e 8, respectivamente, enquanto a rigidez ao cisalhamento do painel $(GA)_{MLCC}$ foi obtida por meio da Equação 9.



Ensaio de cisalhamento vertical



Ensaio de cisalhamento inclinado



Ensaio de flexão

Figura 4: Montagem dos corpos de prova para os ensaios de flexão.

$$(EI)_{MLCC,local,liq} = \frac{I_2 \cdot I_1^2 \cdot (F_2 - F_1)}{16 \cdot (\delta_{local,2} - \delta_{local,1})} \quad (7)$$

$$(EI)_{MLCC,ap,liq} = \frac{3 \cdot I_2 \cdot L^2 - 4 \cdot I_2^3}{48} \cdot \frac{(F_2 - F_1)}{(\delta_{global,2} - \delta_{global,1})} \quad (8)$$

$$\frac{(GA)_{MLCC} \cdot 24 \cdot (EI)_{MLCC,local,liq} \cdot (EI)_{MLCC,ap,liq}}{(3 \cdot L^2 - 4 \cdot L^2) \cdot ((EI)_{MLCC,local,liq} - (EI)_{MLCC,ap,liq})} \quad (9)$$

Em que F_2 corresponde a 40% da carga última, F_1 corresponde a 10% da carga última, $\delta_{local,2}$ e $\delta_{local,1}$ são os deslocamentos verticais locais, e $\delta_{global,2}$ e $\delta_{global,1}$ são os deslocamentos verticais globais correspondentes a F_2 e F_1 , respectivamente. O termo L refere-se à distância entre os pontos de aplicação da força (F) e os apoios (A e E), conforme ilustrado na Figura 4.

A norma brasileira não apresenta uma formulação específica para o cálculo da rigidez à flexão de painéis de MLCC com três camadas de espessuras iguais, baseada no módulo de elasticidade transversal das camadas longitudinais (G) e na rigidez ao *rolling shear* (G_{vt}). Por essa razão, a Equação 10 foi elaborada com o objetivo de determinar a rigidez (G_{vt}) a partir de ensaios de flexão. A equação baseia-se na distribuição das tensões de cisalhamento ao longo da altura da seção transversal, considerando a influência do módulo de elasticidade transversal (G), o qual provoca distorção longitudinal nas camadas externas do elemento MLCC, assim como a influência do cisalhamento transversal (*rolling shear*) da camada central por meio do parâmetro de rigidez G_{vt} .

$$\begin{aligned} (GA)_{MLCC} &= k \cdot \sum_{i=1}^n G_i \cdot A_i \\ &= b_{MLCC} \cdot t_{cam} \cdot (1,62 \cdot G + 1,38 \cdot G_{vt}) \end{aligned} \quad (10)$$

Em que κ representa o fator de cisalhamento; G_i é o módulo de elasticidade da madeira da camada i , A_i é a área da camada i , b_{MLCC} corresponde à largura do elemento; t_{cam} é a espessura da camada; o módulo de elasticidade transversal da madeira (G) foi considerado como 1/16 do módulo de elasticidade longitudinal paralelo às fibras (E_0). A resistência do painel de MLCC (f_{vt}) foi determinada pela Equação 11, em que F_u é a força máxima; $(ES)_{MLCC,vt,liq}$ representa o momento estático considerando o módulo de elasticidade de cada camada; e $(EI)_{MLCC,total,liq}$ corresponde ao momento de inércia obtido considerando apenas as camadas longitudinais do painel. O valor médio de ruptura das vigas foi, então, comparado ao valor de ruptura obtido experimentalmente para o painel P-1.

$$f_{vt} = \frac{F_u}{2} \cdot \frac{(ES)_{MLCC,vt,liq}}{b \cdot (EI)_{MLCC,total,liq}} \quad (11)$$

2.4. Validação do modelo numérico e estudo de sensibilidade

A simulação numérica dos ensaios de cisalhamento e de flexão foi realizada por meio do método dos elementos finitos, utilizando o *software* ABAQUS. Os modelos foram desenvolvidos com o objetivo de analisar a distribuição de tensões nas amostras avaliadas experimentalmente.

Para os ensaios de cisalhamento, foram elaborados dois modelos para cada tipo de ensaio, um para cada espessura de camada, totalizando quatro modelos (dois inclinados e dois verticais). Adicionalmente, foram desenvolvidos dois modelos numéricos para os ensaios de flexão, correspondentes aos elementos com ambas as larguras (vigas e painel) consideradas neste estudo.

Para simplificação, a simulação dos ensaios foi realizada utilizando um modelo ortotrópico elástico-linear, com elementos sólidos tridimensionais do tipo C3D8R. Este modelo considera apenas as propriedades elásticas dos materiais como dados de entrada (Módulo de elasticidade longitudinal, módulo de elasticidade transversal e coeficientes de Poisson). A resposta do modelo pode ser aprimorada ao utilizar modelos não lineares que consideram, além das propriedades elásticas, também as propriedades plásticas dos materiais em análise e modelos de dano progressivo. A orientação das fibras foi representada pela alternância dos eixos locais

dos elementos finitos considerados: o eixo local 1 correspondeu à direção longitudinal, o eixo 2 à direção radial e o eixo 3 à direção transversal.

Nos modelos referentes aos ensaios de cisalhamento vertical, o módulo de elasticidade longitudinal (E_1) foi considerado igual ao módulo de elasticidade longitudinal paralelo às fibras obtido no ensaio de compressão paralela (E_{c0}), com valor de 9.818 MPa. Os módulos de elasticidade ao longo dos eixos 2 e 3, perpendiculares às fibras ($E_2 = E_3$), foram considerados iguais ao módulo de elasticidade longitudinal perpendicular às fibras (E_{c90}), definido como 1/20 do valor do E_{c0} , resultando em 491 MPa. O módulo de elasticidade transversal (G) foi adotado como 1/16 do valor do E_{c0} , correspondendo a 614 MPa. No modelo de cisalhamento inclinado, E_1 foi de 9.350 MPa, $E_2 = E_3 = 468$ MPa e $G = 585$ MPa. Os coeficientes de Poisson nos planos longitudinal-radial e longitudinal-tangencial foram considerados iguais ($\nu_{21} = \nu_{31}$), com valor de 0,318, conforme dados do *Forest Service and Forest Products Laboratory* [28]. O coeficiente de Poisson no plano radial-tangencial (ν_{23}) foi determinado a partir do ensaio de compressão perpendicular, com valor de 0,52. Em ambos os modelos, os coeficientes de Poisson foram mantidos constantes.

Nos modelos numéricos dos ensaios de flexão, foram considerados dois tipos de material: um para a camada longitudinal e outro para a camada transversal. Para o corpo de prova P-1, a camada longitudinal apresentou módulo de elasticidade longitudinal (E_1) igual à média dos módulos de elasticidade longitudinal paralelo obtidos nos ensaios de flexão (E_0), com valor de 11.540 MPa. A camada transversal apresentou valor de 9.125 MPa. Os módulos de elasticidade ao longo dos eixos 2 e 3 ($E_2 = E_3$), adotados como 1/20 do módulo de elasticidade longitudinal (E_0), foram de 577 MPa para a camada longitudinal e 456 MPa para a camada transversal. O módulo de elasticidade transversal (G), definido como 1/16 da média dos valores de E_0 entre as lamelas da mesma camada, foi de 721 MPa para a camada longitudinal e 570 MPa para a camada transversal. Para o corpo de prova B-1, o módulo de elasticidade longitudinal E_1 da camada longitudinal foi de 10.635 MPa, enquanto para a camada transversal foi de 10.145 MPa. Os módulos $E_2 = E_3$ foram de 532 MPa para a camada longitudinal e 508 MPa para a camada transversal. O módulo de elasticidade transversal (G) adotado foi de 665 MPa para a camada longitudinal e 634 MPa para a camada transversal.

Com relação às condições de contorno, nos ensaios de cisalhamento, a base de uma das camadas externas foi considerada como apoiada, com translações nulas em todas as direções ($u_x = u_y = u_z = 0$). No modelo do ensaio de cisalhamento vertical, devido ao confinamento lateral do corpo de prova, a translação das faces laterais das camadas externas na direção x do eixo global também foi restringida ($u_x = 0$). Em ambos os casos, a força de ruptura foi aplicada por meio de pressão de superfície na face superior da camada externa adjacente ao corpo de prova.

Na simulação dos ensaios de flexão, os corpos de prova foram considerados simplesmente apoiados, com um apoio fixo (assumindo translações nulas em todas as direções: $u_x = u_y = u_z = 0$) e o outro apoio móvel (assumindo translações nulas nas direções y e z : $u_y = u_z = 0$). A força de ruptura obtida nos ensaios experimentais foi aplicada aos modelos por meio de pressão superficial em áreas com dimensões de 5 mm $\times$ 110 mm ou 5 mm $\times$ 330 mm. As condições de contorno adotadas nos modelos encontram-se ilustradas na Figura 5. Para todos os casos, a interação entre as superfícies de contato das camadas foi considerada rígida, e o tamanho da malha foi fixado em 5 mm. A calibração dos modelos numéricos foi realizada com base nas curvas numéricas (força $\times$ deslocamento), comparadas às curvas experimentais.

Por se tratar de uma superfície colada, admitiu-se nas interfaces coladas ligações do tipo rígida para os modelos numéricos, ou seja, sem a existência de pequenos deslocamentos entre dois nós comuns a mesma interface. Desse modo, dois nós coincidentes na mesma interface de duas camadas unidas apresentaram o mesmo comportamento [12, 29, 30].

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os principais resultados obtidos neste trabalho são apresentados nas seções seguintes, acompanhados pelos comentários mais relevantes.

3.1. Resultados experimentais

As curvas experimentais e numéricas de força *versus* deslocamento obtidas nos ensaios de cisalhamento apresentaram boa concordância, possibilitando a adequada calibração dos modelos numéricos. A Tabela 1 apresenta os valores experimentais de resistência (f_v) e de rigidez ao cisalhamento transversal *rolling shear* (G_{vt}), respectivamente. Lembrando que no caso dos painéis (P) e vigas (B), a rigidez *ao rolling shear* (G_{vt}), foi calculada a partir da rigidez ao cisalhamento dos painéis e do módulo de elasticidade transversal (G) da madeira, adotado igual a 1/16 do módulo de elasticidade longitudinal paralelo às fibras (E_0).

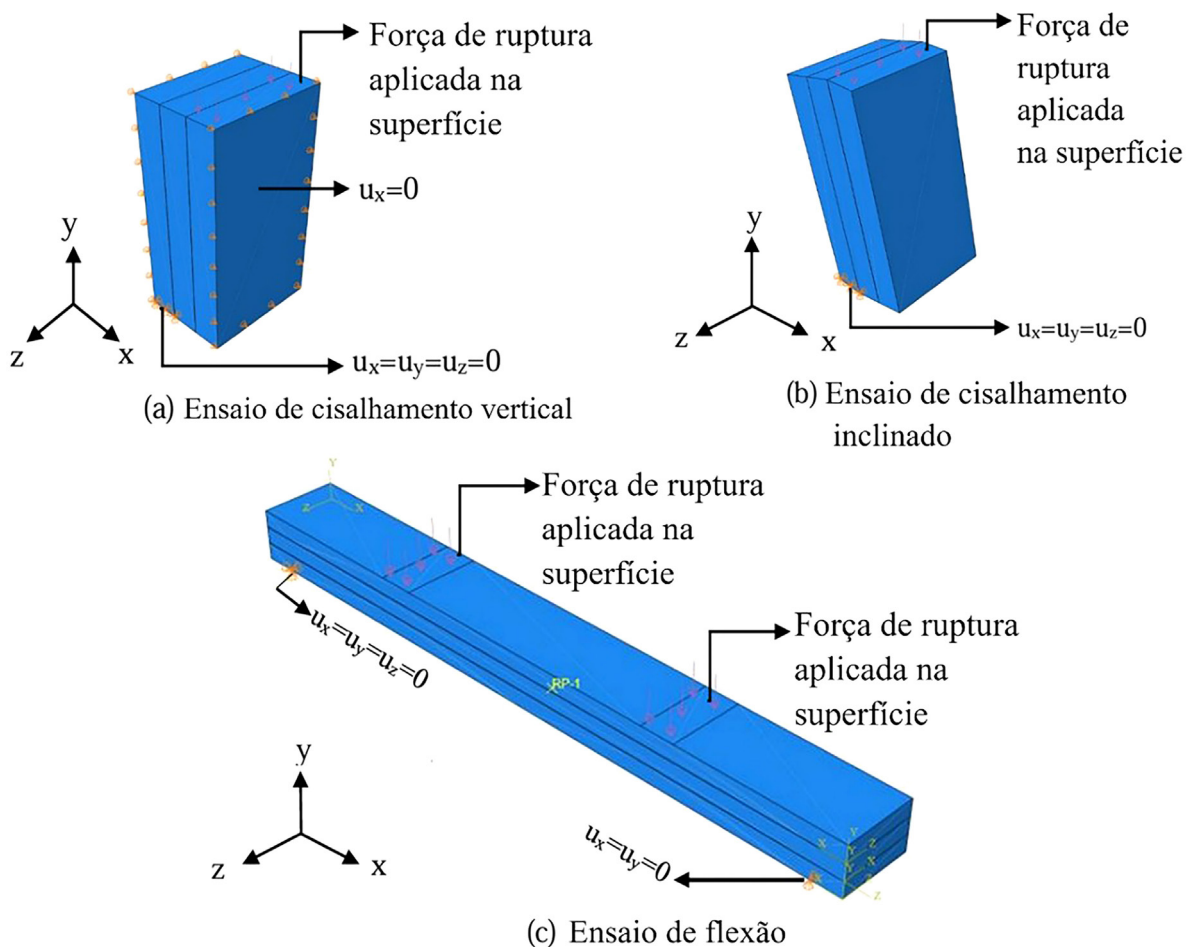


Figura 5: Condições de contorno.

Tabela 1: Valores médios de resistência (f_v) e rigidez ao *rolling shear* (G_v).

CORPO DE PROVA	RESISTÊNCIA MÉDIA (MPa)	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (%)	RIGIDEZ MÉDIA (MPa)	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (%)
VST25	3,02	10	315	39
VST38	2,51	11	200	13
IST25	2,22	22	136	12
IST38	1,73	14	140	12
B	1,65	6	318	97
P	2,08	—	610	43

Nos ensaios de cisalhamento vertical, a resistência (f_v) variou entre 2,11 MPa e 3,45 MPa, com média de 2,79 MPa e coeficiente de variação de 14%. As médias para os corpos de prova com camadas de 25 mm e 38 mm foram de 3,02 MPa (10%) e 2,51 MPa (11%), respectivamente, com o coeficiente de variação em porcentagem indicado entre parênteses.

Nos ensaios de cisalhamento inclinado, os valores de resistência variaram entre 1,37 MPa e 2,77 MPa, com média de 1,98 MPa e coeficiente de variação de 22%. As médias para os corpos de prova com camadas de 25 mm e 38 mm foram de 2,22 MPa (22%) e 1,73 MPa (14%), respectivamente. Nos ensaios de flexão, o painel P-1 apresentou resistência de 2,08 MPa, enquanto as vigas apresentaram valores entre 1,57 MPa e 1,75 MPa, com média de 1,65 MPa e coeficiente de variação de 6%.

O ensaio de cisalhamento vertical apresentou maior resistência média e menor variação em comparação ao ensaio inclinado. Por outro lado, os ensaios de cisalhamento inclinado forneceram valores de resistência ao *rolling shear* (f_v) mais compatíveis com os obtidos nos ensaios de flexão, considerando o componente de

cisalhamento associado ao comportamento global dos painéis. Verificou-se também que o aumento da espessura das camadas das amostras resultou na redução da resistência ao *rolling shear* (f_{vt}) em ambos os tipos de ensaio.

A rigidez média (G_{vt}) dos corpos de prova dos ensaios de cisalhamento vertical foi de 263 MPa, com coeficiente de variação de 41%. Nos ensaios de cisalhamento inclinado, a rigidez média foi de 138 MPa, com variação de 11%. As médias observadas foram de 200 MPa (13%) e 315 MPa (39%) para amostras VS38 e VS25, respectivamente, e de 140 MPa (12%) e 136 MPa (12%) para IS38 e IS25, respectivamente. Observou-se que o aumento da espessura das camadas influenciou negativamente tanto a resistência (f_{vt}) quanto a rigidez (G_{vt}).

De modo geral, os ensaios de cisalhamento vertical apresentaram valores superiores aos dos ensaios inclinados, embora estes últimos tenham mostrado menor variabilidade. Para ambas as propriedades do *rolling shear*, os valores obtidos superaram aqueles indicados por manuais internacionais, os quais indicam a resistência (f_{vt}) de 1,1 MPa (para painéis com razão entre largura e espessura da lamela ≥ 4) ou 0,7 MPa (razão ≤ 4), e a rigidez (G_{vt}) como 50 MPa [4].

Nos ensaios de flexão, a maior rigidez média ao *rolling shear* (G_{vt}) foi observada nos painéis de MLCC com valor de 610 MPa e coeficiente de variação de 43%, calculados a partir da resistência individual dos corpos de prova P-1 e P-2. As vigas apresentaram média de 318 MPa, avaliando-se a resistência das amostras B-1 e B-3, com elevada variabilidade (97%). Essa dispersão é atribuída ao uso de diferentes instrumentos de medição de deslocamento (relógios comparadores nos apoios e transdutores LVDT no vão de flexão), além da adoção do módulo de elasticidade transversal da madeira (G) em função do módulo de elasticidade longitudinal paralelo às fibras (E_0). Os módulos de elasticidade transversal adotados da madeira (G) encontram-se apresentados na Tabela 2, assim como suas respectivas diferenças em relação à rigidez (G_{vt}) estimada pela Equação 10, indicadas em porcentagem.

Tabela 2: Módulo de elasticidade transversal (G) e rigidez ao *rolling shear* (G_{vt}).

CORPO DE PROVA	G (MPa)	G_{vt} (MPa)	DIFERENÇA (%)
P-1	721	795	10
P-2	731	424	72
B-1	665	537	24
B-3	759	99	667

Com base nos resultados apresentados, observou-se que a rigidez (G_{vt}) do elemento P-1 foi superior ao módulo de elasticidade transversal da madeira (G). De acordo com KARACABEYLI e DOUGLAS [4], a relação entre a rigidez ao *rolling shear* (G_{vt}) e o módulo de elasticidade transversal (G) pode ser considerada igual a 1/10. Dessa forma, os valores obtidos experimentalmente foram significativamente superiores aos recomendados na literatura.

Em relação ao modo de ruptura, os corpos de prova com espessura de 25 mm (VS25 e IS25) a falha predominante ocorreu por *rolling shear*. Por outro lado, os elementos com lamelas de 38 mm apresentaram falhas predominantes por delaminação ao longo da linha de cola, conforme ilustrado na Figura 6. Esse comportamento pode ter sido influenciado por fatores relacionados ao processo de fabricação, como variações no processo de colagem e nas condições de cura do adesivo, podem ter contribuído para a ocorrência das falhas por delaminação observadas nos corpos de prova com camadas mais espessas. Embora os parâmetros de aplicação e cura tenham seguido rigorosamente as recomendações normativas e do fabricante do adesivo, pequenas variações locais na pressão ou na umidade da madeira podem ter influenciado a qualidade da linha de cola em determinados casos, afetando assim os modos de falha. Nos ensaios de flexão, independentemente do tipo de corpo de prova (viga ou painel), a ruptura ocorreu exclusivamente por *rolling shear*, como mostrado na Figura 7.

3.2. Resultados numéricos

A rigidez ao *rolling shear* (G_{vt}) foi determinada graficamente a partir das curvas numéricas de força *versus* deslocamento, as quais apresentaram boa concordância com as curvas experimentais. Os valores de rigidez numérica ($G_{vt,n}$) e experimental ($G_{vt,e}$) são apresentados na Tabela 3, em MPa, juntamente com a variação percentual entre eles. De modo geral, os valores numéricos foram ligeiramente superiores aos experimentais, com variação máxima em torno de 17%.

De acordo com os resultados do modelo numérico, as tensões normais foram inferiores às tensões de cisalhamento. As tensões normais máximas (S_{33}) na região de ruptura foram causadas por compressão perpendicular às fibras, variaram de 0,35 MPa a 0,81 MPa para os elementos com 75 mm de espessura, e de 0,36 MPa a 0,58 MPa para as amostras com 114 mm.

Tabela 3: Rigidez ao *rolling shear* experimental e numérica nos ensaios de cisalhamento.

CORPO DE PROVA	$G_{vt,e}$ (MPa)	$G_{vt,n}$ (MPa)	VARIAÇÃO (%)
VS38-5	194	220	13
VS25-3	336	392	17
IS38-5	139	143	4
IS25-3	117	123	4

As tensões de cisalhamento no plano radial-tangencial (S_{23}) variaram entre 3,33 MPa e 3,76 MPa para os corpos de prova com 75 mm de espessura e entre 1,27 MPa e 1,63 MPa para aqueles com 114 mm de espessura. As tensões normais perpendiculares às fibras (S_{33}) na região de ruptura variaram de 0,31 MPa a 0,57 MPa para amostras com 75 mm de espessura e de 0,24 MPa a 0,52 MPa para aquelas com 114 mm, devido à compressão perpendicular às fibras.

Em relação às tensões de cisalhamento no plano radial-tangencial (S_{23}), observou-se distribuição semelhante à dos corpos de prova submetidos ao ensaio de cisalhamento vertical, a qual foi concentrada na região central, com valores entre 1,80 MPa e 1,92 MPa para amostras com 75 mm e entre 1,67 MPa e 2,06 MPa para aquelas com espessura de 114 mm. A distribuição das tensões normais (S_{33}) e de cisalhamento (S_{23}) obtidas numericamente para os ensaios de cisalhamento vertical e inclinado, bem como os modos de ruptura experimentais, estão representados na Figura 6.

Independentemente do tipo de ensaio, observou-se que o modo de ruptura apresentou uma distribuição inclinada das tensões no diagrama de cisalhamento radial-tangencial (S_{23}), a qual coincidiu com as fissuras dos corpos de prova rompidos nas regiões de maior tensão. Tal comportamento caracteriza o modo de falha por *rolling shear*, o que é corroborado pelos valores experimentais de resistência (f_{vt}), os quais se encontram dentro da faixa de tensões apresentada nos diagramas de cisalhamento radial-tangencial (S_{23}), conforme mostrado na Tabela 4, e pela distribuição das tensões de cisalhamento, que indicou concentrações inclinadas características desse modo de falha.

A Figura 7 apresenta a distribuição das tensões normais (S_{33}) e das tensões de cisalhamento (S_{23}) obtidas experimentalmente para os ensaios de flexão, juntamente com o modo de ruptura observado.

O diagrama de tensões normais na direção perpendicular às fibras (S_{22}) indicou concentrações de tensões nas proximidades dos apoios, variando de 0,37 MPa a 2,26 MPa para o painel P-1 e de 0,20 MPa a 3,16 MPa para a viga B-1. Na região de ruptura, as tensões normais de tração foram de 1,52 MPa e 1,21 MPa, e as tensões de cisalhamento máximas (S_{23}) foram de 2,17 MPa e 1,63 MPa para os elementos P-1 e B-1, respectivamente.

O modo de ruptura observado no modelo numérico foi semelhante ao verificado nos ensaios experimentais, indicando falha por *rolling shear*. Esse tipo de ruptura está associado ao nível de tensões de cisalhamento próximo ao valor de ruptura e à concentração dessas tensões na mesma região onde a falha ocorreu.

Os valores experimentais de resistência ao cisalhamento transversal *rolling shear* (f_{vt}) e as faixas de tensões normais (S_{33}) e de cisalhamento (S_{23}) estão apresentados na Tabela 4, em MPa. Os resultados indicaram que as tensões de cisalhamento no plano radial-tangencial (S_{23}) foram as mais próximas dos valores experimentais de resistência, sendo a resistência do painel superior à da viga.

Tabela 4: Resistência experimental e intervalos de tensões numéricas (ensaio de cisalhamento e flexão).

CORPO DE PROVA	f_{vt} (MPa)	S_{23} (MPa)	S_{23} (MPa)
ENSAIOS DE CISALHAMENTO			
VS25-3	3,15	0,35-0,81	3,33-3,76
VS38-5	2,11	0,36-0,58	1,27-1,63
IS25-3	1,88	0,31-0,57	1,80-1,92
IS38-5	1,75	0,24-0,52	1,67-2,06
ENSAIOS DE FLEXÃO			
P-1	2,08	0,37-1,52	2,17
B-1	1,57	0,20-0,40	1,63

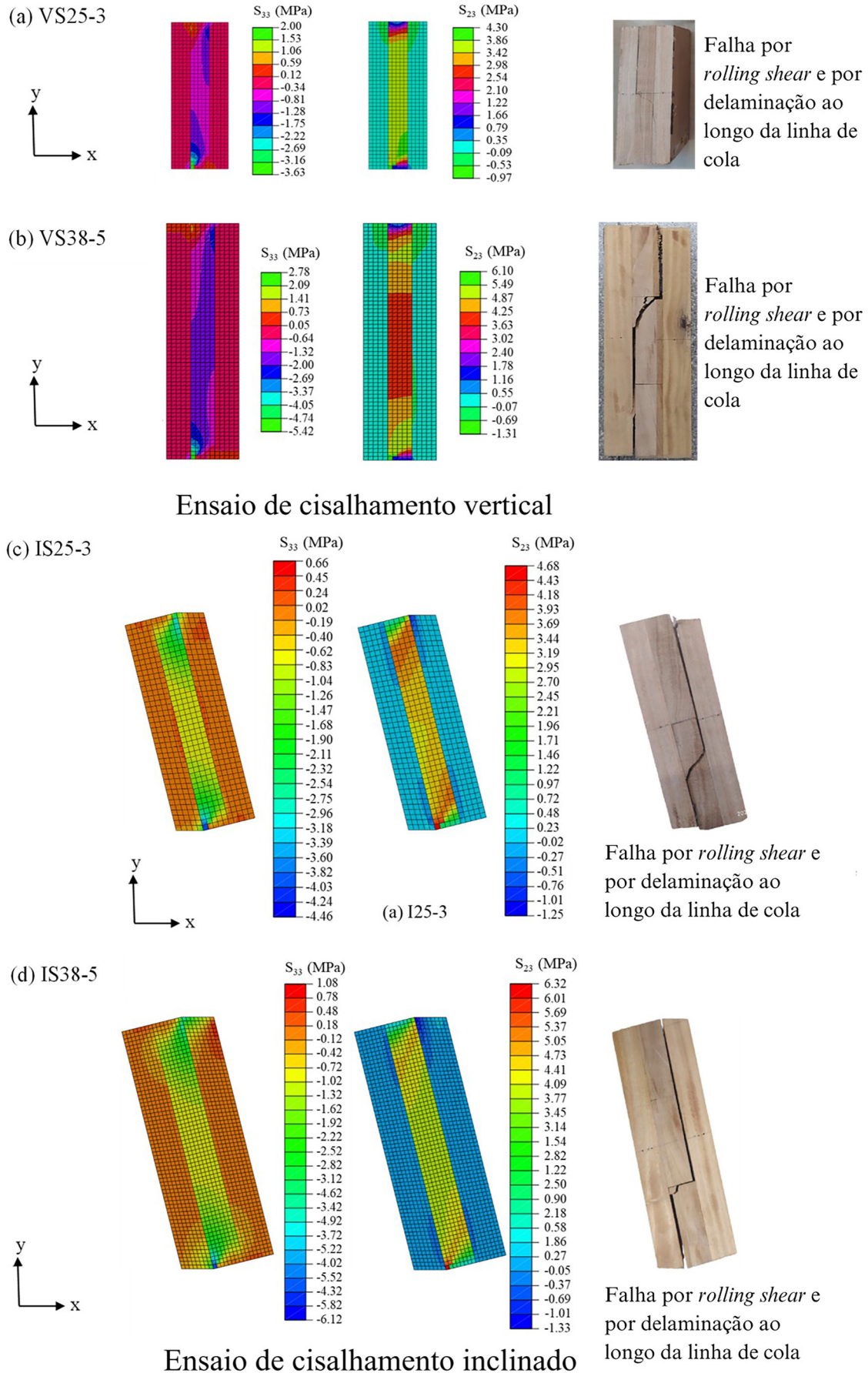


Figura 6: Tensões numéricas em MPa e modos de ruptura experimentais (Cisalhamento vertical e inclinado).

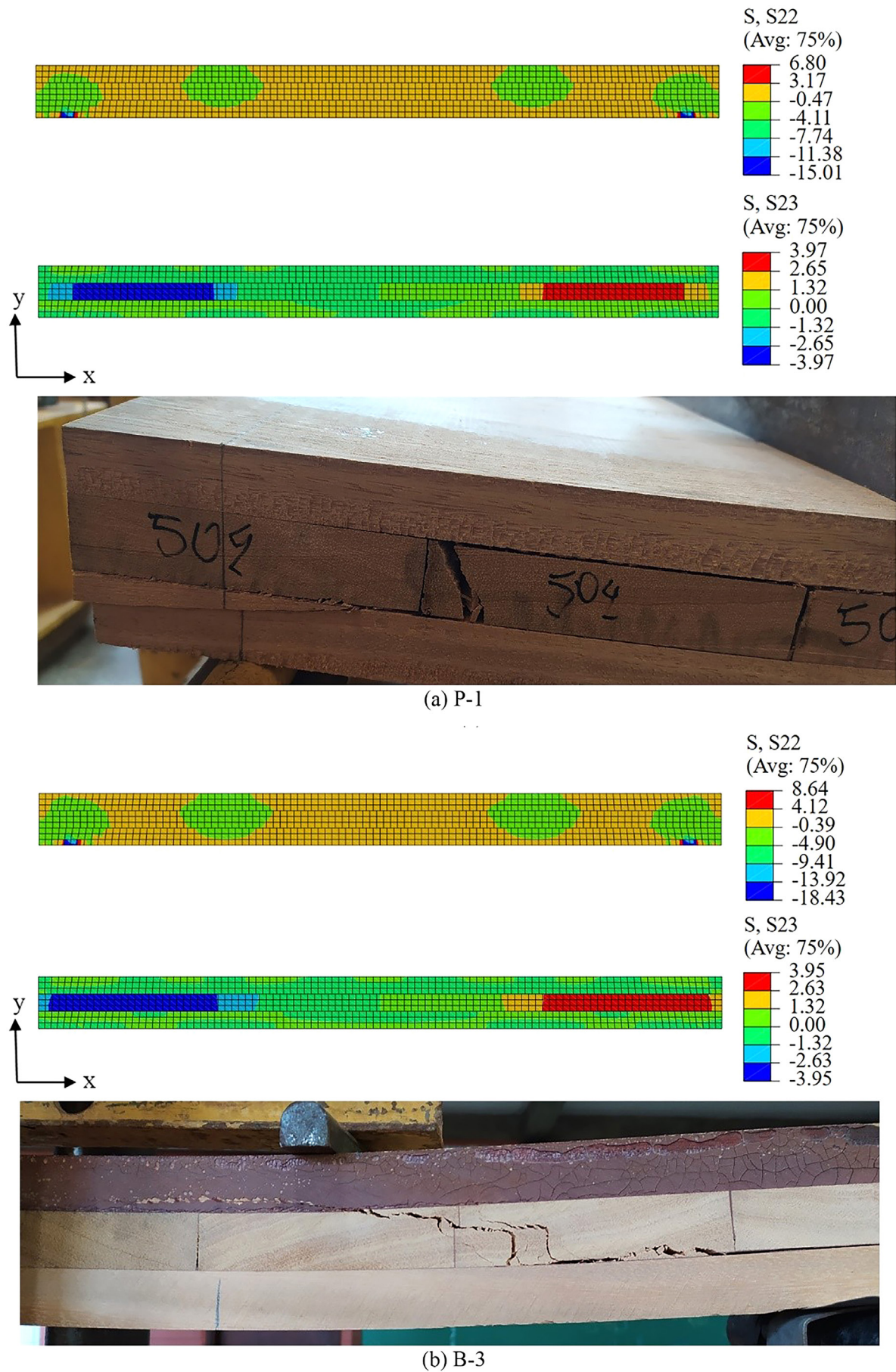


Figura 7: Tensões numéricas e modos de ruptura (Flexão).

4. CONCLUSÕES

1. As propriedades relacionadas ao cisalhamento transversal *rolling shear* (f_{vt} e G_{vt}) foram superiores aos valores indicados na literatura. A rigidez (G_{vt}) foi de duas a seis vezes maior, enquanto a resistência (f_{vt}) foi aproximadamente de duas a três vezes superior.
2. O método de ensaio influenciou significativamente as propriedades *rolling shear* (f_{vt} e G_{vt}). O ensaio de cisalhamento vertical apresentou a maior resistência (2,79 MPa), enquanto o ensaio de flexão em vigas resultou na menor (1,76 MPa), com diferença de até 58% entre os valores máximos. Quanto à rigidez ao *rolling shear* (G_{vt}), o ensaio de flexão em painéis registrou o maior valor (610 MPa), e o ensaio de cisalhamento inclinado, o menor (138 MPa), com diferença de 342%.
3. Os corpos de prova com camadas mais finas apresentaram maiores valores de resistência (f_{vt}) e rigidez (G_{vt}) ao *rolling shear*, indicando influência significativa da espessura da camada nessas propriedades.
4. Os corpos de prova apresentaram dois modos de falha: *rolling shear* e separação das camadas ao longo da linha de cola. Esses modos de ruptura influenciaram a rigidez (G_{vt}), sendo menores nas amostras que apresentaram delaminação.
5. Os resultados numéricos justificaram os modos de ruptura experimentais dos modelos analisados. Nos ensaios de cisalhamento, as tensões normais (S_{33}) foram inferiores às tensões de cisalhamento no plano radial/tangencial (S_{23}); já nos ensaios de flexão, as tensões normais (S_{22}) foram próximas às tensões de cisalhamento (S_{23}). Assim, a falha ocorreu por *rolling shear*, com tensões máximas nas regiões de ruptura dos ensaios experimentais.
6. A execução do ensaio de cisalhamento vertical apresentou maior complexidade em comparação ao ensaio inclinado, devido à necessidade de contenção lateral.
7. A rigidez ao *rolling shear* (G_{vt}) obtida nos ensaios de flexão foi, em geral, superior à dos ensaios de cisalhamento, com maior variabilidade nos valores.
8. O ensaio de cisalhamento inclinado mostrou-se mais adequado para determinar as propriedades do *rolling shear*, por apresentar resultados mais próximos da resistência dos corpos de prova submetidos à flexão e por não ser influenciado pelo atrito lateral entre o corpo de prova e o sistema de contenção.
9. Os estados de tensão variaram conforme o tipo de ensaio: nos ensaios de cisalhamento, as tensões normais (S_{33}) representaram compressão perpendicular às fibras; nos ensaios de flexão, indicaram tração perpendicular às fibras. Em ambos os casos, as tensões de cisalhamento no plano radial-tangencial (S_{23}) foram determinantes para a ruptura.
10. A rigidez ao *rolling shear* (G_{vt}) dos painéis foi superior à das vigas, pois os painéis de MLCC possuem rigidez em ambas as direções, enquanto as vigas apresentam maior rigidez apenas na direção longitudinal do elemento.
11. A equação analítica desenvolvida mostrou-se adequada para o cálculo da rigidez ao *rolling shear* (G_{vt}) a partir da rigidez ao cisalhamento do painel.

Para trabalhos futuros, recomenda-se o desenvolvimento de modelos numéricos que considerem o deslizamento entre as camadas do painel, incorporando comportamento não linear e critérios de falha mais realistas para a adequada representação da ruptura. Sugere-se, ainda, a realização de ensaios experimentais em painéis com cinco e sete camadas, contemplando combinações assimétricas de espessuras, além da aplicação de técnicas avançadas de medição de deslocamentos, como a correlação de imagens digitais (DIC), para comparação com os resultados obtidos por transdutores lineares de deslocamento (LVDT). Também é importante aprofundar a caracterização completa das propriedades elásticas da madeira, visando aprimorar os dados de entrada dos modelos numéricos. Propõe-se investigar as dimensões ideais dos corpos de prova para ensaios de cisalhamento inclinado e desenvolver equações analíticas para painéis com diferentes números e espessuras de camadas. Outra forma de dar continuidade a esta linha de pesquisa consiste na avaliação experimental da qualidade da colagem em diversas combinações de espécies e adesivos. Por fim, recomenda-se a investigação do efeito de configurações reais empregadas em obras, ampliando a aplicabilidade prática dos resultados obtidos e promovendo maior fidelidade entre as análises laboratoriais e as condições reais de uso.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro. Agradecem também ao Prof. Dr. Antonio Alves Dias (*in memorian*), do SET/EESC/USP, pelas valiosas contribuições para o desenvolvimento deste trabalho.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] ZHANG, X., YANG, S., FEI, B., *et al.*, “Bending and shear performance of a cross-laminated composite consisting of flattened bamboo board and Chinese fir lumber”, *Construction & Building Materials*, v. 392, pp. 1, 2023. doi: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131913>.
- [2] WANG, Z., YIN, T., “Cross-laminated timber: a review on its characteristics and an introduction to Chinese practices”, In: Gong, M. (ed), *Engineered wood products for construction*, chapter 15, London, IntechOpen. doi: <http://doi.org/10.5772/intechopen.98956>.
- [3] YOUNIS, A., DODOO, A., “Cross-laminated timber for building construction: a life-cycle-assessment overview”, *Journal of Building Engineering*, v. 52, pp. 104482, Apr. 2022. doi: <http://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104482>.
- [4] KARACABEYLI, E., DOUGLAS, B., *CLT handbook: cross-laminated timber*, Pointe-Claire, FPIInnovations, 2013.
- [5] CRIADO, T.C., SOUZA, C.G.F., TARRILLO, J.L.S., *et al.*, “A review of test methods to evaluate rolling shear properties in CLT Panels”, *Caderno Pedagógico*, v. 22, n. 5, pp. 1–21, Mar. 2025. doi: <http://doi.org/10.54033/cadpedv22n5-037>.
- [6] WANG, Z., ZHOU, J., DONG, W., *et al.*, “Influence of technical characteristics on the rolling shear properties of cross laminated timber by modified planar shear tests”, *Maderas. Ciencia y Tecnología*, v. 20, n. 3, pp. 469–478, Jul. 2018. doi: <http://doi.org/10.4067/S0718-221X2018005031601>.
- [7] BAHMANZAD, A., ASCE, S.M., “Shear properties of eastern hemlock with respect to fiber orientation for use in cross laminated timber”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 32, n. 7, pp. 04020165, Apr. 2020. doi: [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003232](http://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003232).
- [8] WU, G., ZHONG, Y., REN, H., “Effects of grain pattern on the rolling shear properties of wood in cross-laminated timber”, *Forests*, v. 12, n. 6, pp. 668, Jun. 2021. doi: <http://doi.org/10.3390/f12060668>.
- [9] AICHER, S., CHRISTIAN, Z., HIRSCH, M., “Rolling shear modulus and strength of beech wood laminations”, *Holzforschung*, v. 70, n. 8, pp. 773–781, Aug. 2016. doi: <http://doi.org/10.1515/hf-2015-0229>.
- [10] ANWAR-US-SAADAT, M., GOONEWARDENA, J., KAFLE, B., *et al.*, “Comparative study on various strength parameters of structural elements made from cross-laminated timber”, *Journal of Renewable Materials*, v. 10, n. 6, pp. 1575–1606, Jan. 2022. doi: <http://doi.org/10.32604/jrm.2022.018919>.
- [11] LI, X., ASHRAF, M., SUBHANI, M., *et al.*, “Rolling shear properties of cross-laminated timber (CLT) made from Australian Radiata Pine – An experimental study”, *Structures*, v. 33, n. 3, pp. 423–432, May. 2021. doi: <http://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.04.067>.
- [12] SILVA, J.V.F., MORAES PEREIRA, M.C., SILVA, M.F.F., *et al.*, “Experimental and numerical analysis of specimen configurations for Cross Laminated timber on rolling shear stiffness and strength response”, *Engineering Structures*, v. 284, pp. 115973, Mar. 2023. doi: <http://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.115973>.
- [13] WANG, T., YANG, Y., LI, Y., *et al.*, “Rolling shear failure damage evolution process of CLT based on AE technology and DIC method”, *Holz als Roh- und Werkstoff*, v. 80, n. 3, pp. 719–730, Jan. 2022. doi: <http://doi.org/10.1007/s00107-022-01796-5>.
- [14] ZHOU, Y., SHEN, Z., LI, H., *et al.*, “Study on in-plane shear failure mode of cross-laminated timber panel”, *Journal of Wood Science*, v. 68, n. 1, pp. 36, Dec. 2022. doi: <http://doi.org/10.1186/s10086-022-02045-2>.
- [15] TAHMASEBI, M., KURZAWINSKA, H., JOCKWER, R., *et al.*, “Cross laminated timber with air gaps in cross-layers: numerical analysis and experimental evaluation”, *Construction & Building Materials*, v. 481, pp. 141577, Jun. 2025. doi: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141577>.
- [16] WANG, T., HUANG, Q., WANG, Z., *et al.*, “Rolling shear failure of CLT transverse layer: AE characterization of damage mechanisms under different test methods”, *Construction & Building Materials*, v. 440, pp. 137479, Aug. 2024. doi: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137479>.
- [17] YIN, T., WANG, Z., SUN, C., *et al.*, “Embedment behaviour of hybrid cross-laminated timber (HCLT) made of fast-growing Chinese fir and OSB”, *Construction & Building Materials*, v. 438, pp. 137117, Aug. 2024. doi: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137117>.
- [18] HEMATABADI, H., MADHOUSHI, M., KHAZAEYAN, A., *et al.*, “Bending and shear properties of cross-laminated timber panels made of poplar (*Populus alba*)”, *Construction & Building Materials*, v. 265, n. 3, pp. 120326, Dec. 2020. doi: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120326>.

- [19] KABOLI, H., CLOUSTON, P.L., LAWRENCE, S., *et al.*, “Feasibility of two northeastern species in three-layer ANSI-approved cross-laminated timber”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 32, n. 3, pp. 04020006, Jan. 2020. doi: [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003058](http://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003058).
- [20] RAHMAWATI, K., BASUKI, A., SAIFULLAH, H.A., *et al.*, “Effect of thickness and lamina species combination on bending and shear properties of cross laminated timber (CLT) panel”, *Mogjæ Gonghag*, v. 53, n. 3, pp. 207–224, May. 2025. doi: <http://doi.org/10.5658/WOOD.2025.53.3.207>.
- [21] GARDNER, C., DAVIDS, W.G., LOPEZ-ANIDO, R., *et al.*, “The effect of edge gaps on shear strength and rolling shear modulus of cross laminated timber panels”, *Construction & Building Materials*, v. 259, pp. 119710, Oct. 2020. doi: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119710>.
- [22] SCIOMENTA, M., SPERA, L., BEDON, C., *et al.*, “Mechanical characterization of novel Homogeneous Beech and hybrid Beech-Corsican Pine thin Cross-Laminated timber panels”, *Construction & Building Materials*, v. 271, pp. 121589, Feb. 2021. doi: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121589>.
- [23] DAS, S., GAŠPARÍK, M., SETHY, A.K., *et al.*, “Comparative analysis of bending and rolling shear performance of poplar and hybrid maple-poplar Cross-Laminated Timber (CLT)”, *Journal of Composites Science*, v. 9, n. 3, pp. 134, Mar. 2025. doi: <http://doi.org/10.3390/jcs9030134>.
- [24] QUIN JUNIOR, F., FRANCA, T., UNDADI, H., *et al.*, “ Bonding durability and rolling shear strength of commercially produced southern yellow pine crosslaminated timber treated with micronized copper azole-MCA”, *BioResources*, v. 20, n. 2, pp. 134, pp. 3773–3787, 2025. doi: <http://doi.org/10.15376/biores.20.2.3773-3787>.
- [25] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *ABNT NBR 7190-1 projeto de estruturas de madeira. Parte 1: critérios de dimensionamento*, Rio de Janeiro, ABNT, 2022.
- [26] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *ABNT NBR 7190-7 projeto de estruturas de madeira. Parte 1: métodos de ensaio para caracterização de madeira lamelada colada cruzada estrutural*, Rio de Janeiro, ABNT, 2022.
- [27] RUAN, G., XIONG, H., CHEN, J., “Bending and rolling shear properties of cross-laminated timber fabricated with Canadian hemlock”, *SDHM Structural Durability and Health Monitoring*, v. 13, n. 2, pp. 227–246, 2019. doi: <http://doi.org/10.32604/sdhm.2019.04743>.
- [28] KRETSCHMANN, D.E., “Mechanical properties of wood”, In: Forest Products Laboratory (ed), *Wood handbook: wood as an engineering material*, 100 ed., chapter 5, Madison, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 508 p., 2010.
- [29] RIBAS JUNIOR, A.S., CRIADO, T.C., SOUZA, A.J.D., *et al.*, “Non-linear orthotropic numerical simulation for monitoring wood embedment tests according to BS EN 383 2007 Standard European”, *Revista Matéria*, v. 29, n. 4, e20240544, 2024. <http://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2024-0544>.
- [30] GOMES, N.B., JARDIM, P.I.L.G., CHRISTOFORO, A.L., *et al.*, “Análise dos parâmetros de fabricação de elementos de madeira lamelada colada na resposta da qualidade de colagem com base na NBR 7190-6”, *Ambiente Construído*, v. 25, pp. 1, 2025. doi: <http://doi.org/10.1590/s1678-86212025000100786>.