

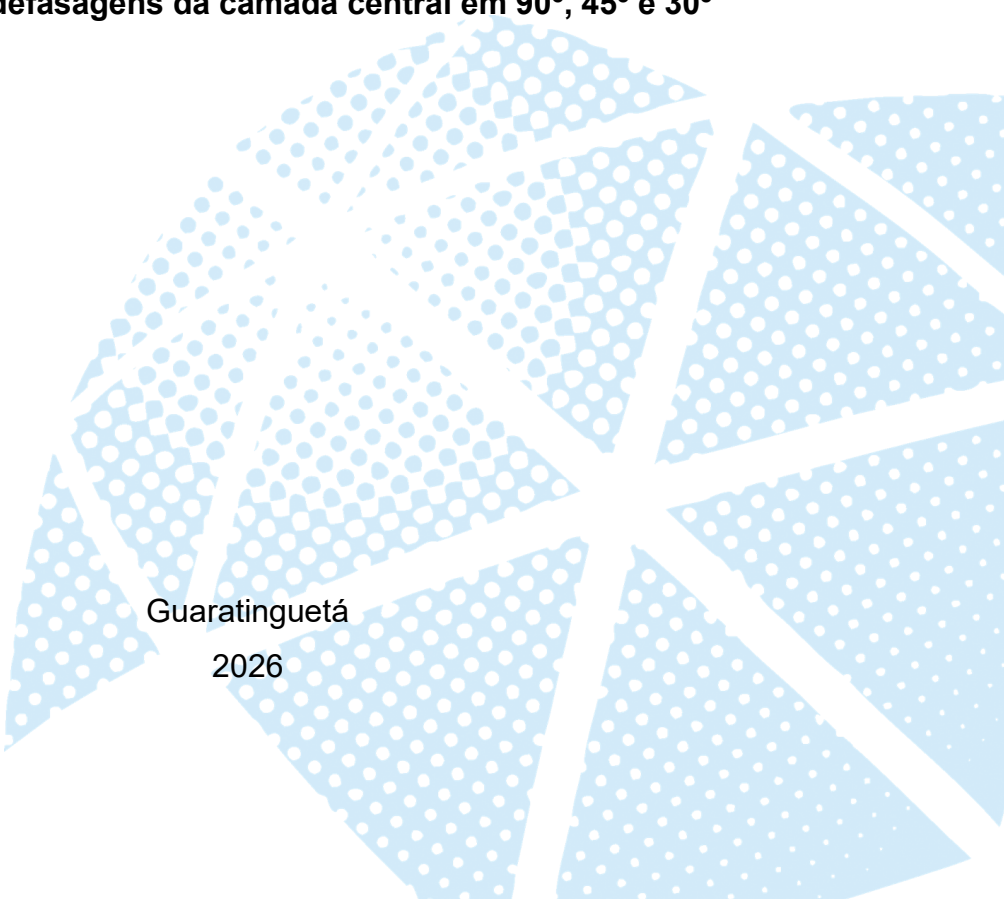
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
Faculdade de Engenharia e Ciências - Campus de Guaratinguetá

AMAURI DA SILVA RIBAS JUNIOR

**Avaliação da resistência e da rigidez de elementos de madeira lamelada colada
cruzada com defasagens da camada central em 90°, 45° e 30°**

Guaratinguetá

2026



AMAURI DA SILVA RIBAS JUNIOR

**Avaliação da resistência e da rigidez de elementos de madeira lamelada colada
cruzada com defasagens da camada central em 90°, 45° e 30°**

Tese de Doutorado apresentada à
Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Faculdade de Engenharia e Ciências,
Guaratinguetá, para obtenção do título de
Doutor em Engenharia.

Área de Concentração: Materiais

Orientador: Prof. Associado Dr. Julio
Cesar Molina

Coorientador: Prof. Dr. Alexandre Jorge
Duarte de Souza

Guaratinguetá

2026

R482a	Ribas Junior, Amauri da Silva Avaliação da resistência e da rigidez de elementos de madeira lamelada colada cruzada com defasagens da camada central em 90°, 45° e 30° / Amauri da Silva Ribas Junior - Guaratinguetá, 2026. 161 f : il. Bibliografia: f. 143-153 Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2026. Orientador: Prof. Dr. Julio Cesar Molina Coorientador: Prof. Dr. Alexandre Jorge Duarte de Souza 1. Painéis de madeira. 2. Cisalhamento. 3. Madeiras de construção. I. Título. CDU 691.11(043)
-------	--

Luciana Máximo

Bibliotecária/CRB-8 3595

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

Esta pesquisa apresenta potencial de impacto científico, técnico, ambiental, econômico e educacional ao ampliar o conhecimento sobre o comportamento estrutural da Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC), especialmente quanto ao fenômeno de *rolling shear* e à influência de diferentes defasagens angulares da camada central. A avaliação de configurações a 90°, 45° e 30°, produzidas com *Pinus elliottii* proveniente de florestas plantadas, contribui para o desenvolvimento de soluções estruturais inovadoras, para a valorização de recursos renováveis disponíveis no Brasil e para o avanço de sistemas construtivos mais sustentáveis. Os resultados obtidos fornecem subsídios técnicos para o dimensionamento, a avaliação experimental e o aprimoramento de critérios normativos relacionados à MLCC, fortalecendo sua inserção local, regional e nacional. Além disso, a pesquisa amplia a literatura nacional sobre o tema, contribui para a formação de profissionais e pesquisadores e aproxima o conhecimento produzido no Brasil dos avanços internacionais relacionados às estruturas de madeira e à construção sustentável.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

This research has the potential to generate scientific, technical, environmental, economic, and educational impacts by expanding knowledge of the structural behavior of Cross-Laminated Timber (CLT), particularly regarding the *rolling shear* phenomenon and the influence of different central layer orientation angles. The evaluation of 90°, 45°, and 30° configurations manufactured with *Pinus elliottii* from planted forests contributes to the development of innovative structural solutions, the valorization of renewable resources available in Brazil, and the advancement of more sustainable construction systems. The results provide technical support for structural design, experimental evaluation, and the improvement of technical standards related to CLT, strengthening its application at local, regional, and national levels. Furthermore, the research expands the Brazilian scientific literature on the subject, contributes to the education of professionals and researchers, and brings the knowledge produced in Brazil closer to international advances in timber structures and sustainable construction.

AMARI DA SILVA RIBAS JUNIOR

**Avaliação da resistência e da rigidez de elementos de madeira lamelada colada
cruzada com defasagens da camada central em 90°, 45° e 30°.**

Tese apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, para obtenção do título de Doutor em Engenharia.

Data da defesa: 31/07/2026

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **JULIO CESAR MOLINA**
Data: 31/07/2026 13:36:27-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. JULIO CESAR MOLINA
Orientador - USP

Documento assinado digitalmente
 **PEDRO GUTEMBERG DE ALCANTARA SEGUNDIN**
Data: 31/07/2026 14:17:13-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. PEDRO GUTEMBERG ALCÂNTARA SEGUNDINHO
UFES

Documento assinado digitalmente
 **VICTOR ALMEIDA DE ARAUJO**
Data: 31/07/2026 15:45:44-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. VICTOR ALMEIDA DE ARAUJO
UNESP

Documento assinado digitalmente
 **ANDRÉ LUIS CHRISTOFORO**
Data: 31/07/2026 15:53:54-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. ANDRÉ LUIS CHRISTOFORO
UFSCar

Documento assinado digitalmente
 **DIEGO HENRIQUE DE ALMEIDA**
Data: 31/07/2026 17:46:06-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof.Dr. DIEGO HENRIQUE DE ALMEIDA
Universidade Federal de Rondônia

Dedico este trabalho ao meu pai Amauri,
à minha mãe Elenice e minha esposa
Taiza.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder forças, saúde e sabedoria ao longo de toda essa jornada.

À Universidade Estadual Paulista (UNESP), tanto ao campus de Guaratinguetá quanto ao campus de Itapeva, pelo suporte institucional e acadêmico essencial para o desenvolvimento deste trabalho.

À Universidade de São Paulo (USP), em especial à Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) e ao Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira (LaMEM), pela disponibilização da infraestrutura e pelo apoio na realização dos ensaios experimentais que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Júlio Cesar Molina, pela orientação, paciência e confiança durante todo o processo da pesquisa.

Ao técnico Alex Siqueira, pelo apoio prático e dedicação nos momentos em que mais precisei.

Ao meu pai, Amauri Ribas, e à minha mãe, Elenice Chiavini, pelo amor, apoio incondicional e, principalmente, por sempre me incentivarem a estudar.

À minha esposa, Taiza Bertoni, por estar ao meu lado em todos os momentos, oferecendo carinho, compreensão e apoio fundamentais para a conclusão desta etapa.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

“Se você não sabe para onde está indo,
qualquer caminho serve.”

*(Lewis Carroll, Alice no País das
Maravilhas).*

RESUMO

A Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC) apresenta elevado potencial como sistema estrutural sustentável, porém sua aplicação no Brasil ainda é limitada por diversos motivos, sendo um deles a necessidade de melhor compreensão do fenômeno de *rolling shear* nas camadas transversais. Esta pesquisa avaliou o comportamento estrutural de elementos de MLCC produzidos com madeira de *Pinus elliottii*, considerando diferentes defasagens angulares da camada central (90°, 45° e 30°), com foco na rigidez (G_{vt}) e na resistência (f_{vt}) ao *rolling shear*, na qualidade da colagem e na resposta estrutural global dos painéis. Foram produzidos painéis de três camadas mantendo-se constantes a geometria e o processo de fabricação, os quais foram submetidos a ensaios de delaminação, cisalhamento na linha de cola, flexão com vão variável e cisalhamento direto em corpos de prova verticais e inclinados, seguidos de análise estatística e avaliação analítica pelo Método Gama. No ensaio de flexão com vão variável, os valores médios de rigidez ao *rolling shear* (G_{vt}) foram de 301,13 MPa, 345,45 MPa e 396,63 MPa para as configurações com camada central a 90°, 45° e 30°, respectivamente, evidenciando aumento progressivo da rigidez com a redução da angulação. A resistência ao *rolling shear* apresentou apenas tendência de aumento, variando de 2,22 MPa a 2,56 MPa entre as configurações avaliadas, sem diferenças estatisticamente significativas. A qualidade da colagem foi considerada satisfatória para todas as configurações, com valores médios de delaminação inferiores ao limite normativo de 4%, indicando adequada integridade das linhas de cola. A aplicação do Método Gama demonstrou elevada sensibilidade da resposta analítica ao valor adotado de G_{vt} , apresentando diferenças entre os resultados analíticos e experimentais nas verificações associadas ao Estado Limite Último e comportamento conservador na previsão das flechas associadas ao Estado Limite de Serviço. Conclui-se que a defasagem angular da camada central altera predominantemente a rigidez e o comportamento em serviço dos painéis de MLCC, sem implicar necessariamente em aumento significativo da resistência última ao *rolling shear*, indicando que configurações alternativas podem contribuir para o aprimoramento do desempenho estrutural do material.

Palavras-chave: *Pinus elliottii*; cisalhamento transversal; delaminação; ensaios experimentais; modelagem analítica; Método Gama.

ABSTRACT

Cross-Laminated Timber (CLT) presents high potential as a sustainable structural system; however, its application in Brazil remains limited due to the need for a better understanding of the *rolling shear* phenomenon in transverse layers. This research evaluated the structural behavior of CLT elements manufactured with *Pinus elliottii* wood, considering different central layer orientation angles (90°, 45°, and 30°), focusing on *rolling shear* stiffness (G_{vt}), *rolling shear* strength (f_{vt}), bonding quality, and the global structural response of the panels. Three-layer panels were produced while maintaining constant geometry and manufacturing procedures and were subjected to delamination tests, glue-line shear tests, variable-span bending tests, and direct shear tests on vertical and inclined specimens, followed by statistical analysis and analytical evaluation using the Gamma Method. In the variable-span bending test, the mean *rolling shear* stiffness (G_{vt}) values were 301.13 MPa, 345.45 MPa, and 396.63 MPa for the configurations with the central layer oriented at 90°, 45°, and 30°, respectively, indicating a progressive increase in stiffness as the orientation angle decreased. *Rolling shear* strength showed only a tendency to increase, ranging from 2.22 MPa to 2.56 MPa among the evaluated configurations, with no statistically significant differences. Bonding quality was considered satisfactory for all configurations, with mean delamination values below the normative limit of 4%, indicating adequate integrity of the glue lines. The application of the Gamma Method demonstrated high sensitivity of the analytical response to the adopted G_{vt} value, showing differences between analytical and experimental results for Ultimate Limit State verifications and conservative behavior in the prediction of deflections associated with the Serviceability Limit State. It is concluded that the angular orientation of the central layer predominantly affects the stiffness and service behavior of CLT panels without necessarily resulting in a significant increase in ultimate *rolling shear* strength, indicating that alternative configurations may contribute to improving the structural performance of the material.

Keywords: *Pinus elliottii*; *rolling shear*; delamination; experimental testing; analytical modeling; Gamma Method.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Relação entre a variação do PIB da Construção Civil e o PIB Geral do Brasil (2021-2022).....	29
Figura 2 – Uso da madeira de forma temporária: a) Fôrmas vigas de cobertura; b) Caixaria de pilares; c) Fôrmas de laje; d) Andaimos; e) Sistema de escoras; f) Carpintaria de baldrame; g) Tapumes OSB; h) Gabarito de obra.	32
Figura 3 – Uso da madeira de forma permanente: a) Esquadrias; b) Estrutura para telhado; c) Portas; d) Pisos	33
Figura 4 – Configuração das camadas de lamelas da MLCC.	36
Figura 5 – Número de publicações relacionadas à MLCC, conforme os anos.	38
Figura 6 – Edifício Brock Commons	40
Figura 7 – Edifício Stadthaus	40
Figura 8 – Edifício norueguês multipavimento mais alto do mundo	41
Figura 9 – Primeiro edifício multipavimento em MLC e MLCC no Brasil.	42
Figura 10 – Arranjo das lamelas em painel MLCC com orientação cruzada das fibras e alternância dos anéis de crescimento.	49
Figura 11 – Prensa a vácuo por membrana flexível.	49
Figura 12 – Prensa hidráulica de pratos rígidos	50
Figura 13 – Aberturas realizadas na fábrica.....	51
Figura 14 – Direções principais da madeira.	52
Figura 15 – Eixos principais do tronco e planos de <i>rolling shear</i> : (a) Representação dos planos principais da madeira (LT, LR e TR). (b) Aplicação de força na direção tangencial (T). (c) Aplicação de força na direção radial (R).....	53
Figura 16 – Falha por <i>rolling shear</i> em um corpo de prova de MLCC submetido à flexão.....	55
Figura 17 – Modos de ruptura associados ao efeito <i>rolling shear</i> : (a) Ruptura tangencial aos anéis de crescimento. (b) Ruptura perpendicular aos anéis de crescimento. (c) Ruptura inclinada em relação aos anéis de crescimento.	55
Figura 18 – Total de publicações em bases de dados com o termo “ <i>rolling shear</i> ”...	58
Figura 19 – Configuração do ensaio de cisalhamento para obtenção do <i>rolling shear</i> , conforme a Norma ABNT NBR 7190-7:2022.....	60

Figura 20 – Configuração de ensaio por pratos colados para determinação da rigidez e resistência ao <i>rolling shear</i> de madeiras maciças, conforme especificada pela Norma ASTM D2718 (2018).	60
Figura 21 – Configuração para determinação da resistência e rigidez ao cisalhamento transversal (<i>rolling shear</i>), pela norma ABNT 7190-7:2022.....	61
Figura 22 – Esquema da configuração de um painel MLCC desenvolvido por Buck e Hagman com camadas de 45° e 90° intercaladas com camadas a 0°.	65
Figura 23 – Protótipo do painel MLCC desenvolvido por Santos: (a) Lamelas cruzadas; (b) Camada híbrida de montagem de camada cruzada; (c) Painel de 3 camadas	66
Figura 24 – Representação esquemática do comportamento ao <i>rolling shear</i> em um elemento de MLCC de três camadas, destacando a lamela transversal como meio deformável ao cisalhamento e a linha neutra da seção.	68
Figura 25 – Sistema de vigas virtuais utilizadas no Método de Kreuzinger.....	76
Figura 26 – Representação esquemática das faces laterais e das linhas de cola avaliadas no ensaio de delaminação em painéis de MLCC.	80
Figura 27 – Esquema da solicitação no plano da linha de cola;.....	83
Figura 28 – Painéis de MLCC com camadas centrais alternadas: (a) Camada central em 90°; (b) Camada central em 45°; (c) Camada central em 30°.	89
Figura 29 – Processo de aplainamento das lamelas de madeira: (a) Utilização de desempenadeira; (b) Utilização de desengrossadeira.	90
Figura 30 – Gabarito de seccionamento das lamelas da camada central do MLCC para painéis com camada central: (a) 90°; (b) 45°; (c) 30°.	91
Figura 31 – Aplicação manual do adesivo poliuretano bicomponente (AG101) durante o processo de colagem dos painéis de MLCC.	93
Figura 32 – Processo de prensagem dos painéis de MLCC, utilizando barras roscadas, chapas metálicas e vigas de madeira para distribuição uniforme da pressão.....	95
Figura 33 – Processo de esquadreamento dos painéis de MLCC utilizando serra circular para ajuste dimensional e acabamento final.	96
Figura 34 – Etapas do ensaio de delaminação: (a) Medição da massa inicial e do comprimento das linhas de cola dos corpos de prova; (b) Autoclave utilizada para aplicação dos ciclos de vácuo e pressão; (c) Corpo de prova após o ciclo de delaminação, evidenciando a abertura nas interfaces coladas.	97
Figura 35 – Configuração experimental do ensaio de cisalhamento na linha de cola: (a) Vista frontal do corpo de prova no interior do dispositivo; (b) Vista lateral do corpo	

de prova durante a aplicação de carga na máquina universal de ensaios; (c) Representação esquemática do corpo de prova e da direção da força aplicada.	98
Figura 36 – Imagem do corpo de prova após o ensaio de cisalhamento, submetida a pré-processamento para segmentação da linha de cola.	100
Figura 37 – Imagem do corpo de prova convertida para tons de cinza para segmentação da linha de cola.	100
Figura 38 – Imagem segmentada da linha de cola após aplicação do Threshold com o método de Otsu.	101
Figura 39 – Configuração do ensaio de vão variável para corpo de prova P90.	105
Figura 40 – Gráfico de $1/E_{m,app}$ vs. $(d/l)^2$ para Determinação de K_1	106
Figura 41 – Dimensões adotadas para o corpo de prova de cisalhamento inclinado	108
Figura 42 – Configuração do ensaio de cisalhamento inclinado	109
Figura 43 – Configurações do ensaio de cisalhamento vertical: (a) Geometria e dimensões do corpo de prova; (b) Hastes de madeira parafusadas às lamelas externas; (c) Instrumentação do ensaio, com transdutores de deslocamento apoiados nas hastes e fixados lateralmente; (d) Arranjo experimental do corpo de prova na máquina de ensaios	112
Figura 44 – Exemplos de delaminação nas linhas de cola observadas em diferentes faces dos corpos de prova após o ensaio de delaminação: (a) Painel P90 (90°); (b) Painel P45 (45°); (c) Painel P30 (30°).	122
Figura 45 – Exemplo de corpo de prova P30 após a ruptura no ensaio de cisalhamento da linha de cola.	124
Figura 46 – Porcentagem de falha na madeira e na linha de adesivo após ruptura – Avaliação por ImageJ	125
Figura 47 – Modos de ruptura associados ao <i>rolling shear</i> em painéis de MLCC para diferentes métodos de ensaio: (a) Cisalhamento inclinado do corpo de prova 5, (b) Cisalhamento vertical do corpo de prova 12 e (c) Flexão com vão variável do corpo de prova 2.	132
Figura 48 – Ordenação crescente das diferenças percentuais médias absolutas entre resultados analíticos do Método Gama e resultados experimentais.	136

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Recomendação de classificação de lamelas para coníferas.	44
Tabela 2 – Recomendação de classificação de lamelas para folhosas.	45
Tabela 3 – Relação vão/profundidade e deslocamento da viga para o ensaio de vão variável.	104
Tabela 4 – Parâmetros experimentais associados ao <i>rolling shear</i> e às cargas experimentais utilizados nas análises pelo Método Gama.	116
Tabela 5 – Resultados da caracterização física e mecânica da madeira de <i>Pinus elliotti</i> (U=12%)	119
Tabela 6 – Resultados médios de delaminação total, em porcentagem.	120
Tabela 7 – Resultados médios da resistência média ao cisalhamento das linhas de cola.	123
Tabela 8 – Resultados de rigidez G_{vt} da MLCC associada ao <i>rolling shear</i>	127
Tabela 9 – Resultados da resistência f_{vt} da MLCC associada ao <i>rolling shear</i>	130
Tabela 10 – Modos de ruptura predominantes em números observados nos ensaios experimentais para as diferentes configurações dos painéis de MLCC.	133
Tabela 11 – Comparação entre os resultados analíticos obtidos pelo Método Gama e os resultados experimentais correspondentes para os Estados Limites Últimos (ELU) e de Serviço (ELS).	135
Tabela 12 – Comparação entre as razões analítico/experimental das verificações de compressão, tração e <i>rolling shear</i> obtidas pelo Método Gama e os modos de ruptura observados experimentalmente para os diferentes métodos de ensaio.	138

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRAINCC – Associação Brasileira de Incorporadoras Imobiliárias
ASTM – American Society for Testing and Materials
CBIC – Câmara Brasileira da Indústria da Construção
CLT – Cross-Laminated Timber
CO₂ – Dióxido de carbono
ELS – Estado Limite de Serviço
ELU – Estado Limite Último
EN – European Norm (Norma Europeia)
FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations
GEE – Gases de Efeito Estufa
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MLC – Madeira Lamelada Colada
MLCC – Madeira Lamelada Colada Cruzada
OSB – Oriented Strand Board
PIB – Produto Interno Bruto
PU – Poliuretano

LISTA DE SÍMBOLOS

A – área (mm^2)

A_1 – área da seção transversal da lamela superior (mm^2)

A_3 – área da seção transversal da lamela inferior (mm^2)

a_1 – distância do centroide da camada superior até a linha neutra (mm)

a_3 – distância do centroide da camada inferior até a linha neutra (mm)

b – largura do corpo de prova / lamela (mm)

C_{total} – comprimento total das linhas de cola do corpo de prova (mm)

D_{el} – delaminação total do corpo de prova (%)

$d_{10\%}$ – deslocamento associado a 10% da força (mm)

$d_{40\%}$ – deslocamento associado a 40% da força (mm)

E – módulo de elasticidade (MPa)

E_{c0} – módulo de elasticidade paralelo às fibras (MPa)

E_{c90} – módulo de elasticidade perpendicular às fibras (MPa)

E_1 – módulo de elasticidade na flexão das lamelas superiores (MPa)

E_2 – módulo de elasticidade na flexão perpendicular das lamelas intermediárias (MPa)

E_3 – módulo de elasticidade na flexão das lamelas inferiores (MPa)

E_{eff} – módulo de elasticidade efetivo do elemento de MLCC (MPa)

$E_{m,\text{app}}$ – módulo de elasticidade aparente (MPa)

$E_{M,0}$ – módulo de elasticidade na flexão das lamelas (MPa)

$E_{M,0,\text{eff}}$ – rigidez efetiva à flexão do elemento (MPa ou $\text{N}\cdot\text{mm}^2$, conforme a formulação)

F – força (N)

F_{max} – força máxima no ensaio (N)

$F_{v0,\text{max}}$ – força máxima no cisalhamento da linha de cola (N)

$F_{0,15\%}$ – força associada à flecha de 0,15% do vão (N)

$F_{0,3\%}$ – força associada à flecha de 0,3% do vão (N)

$F_{25\%}$ – força equivalente a 25% da carga de ruptura estimada (N)

$F_{50\%}$ – força equivalente a 50% da carga de ruptura estimada (N)

f_{v0} – resistência ao cisalhamento da linha de cola (MPa)

f_{vlc} – resistência ao cisalhamento na linha de cola (MPa)

f_{vt} – resistência ao *rolling shear* (MPa)

f_{c0} – resistência à compressão paralela às fibras (MPa)

$f_{c0,1}$ – resistência à compressão paralela às fibras da lamela superior (MPa)

f_{t0} – resistência à tração paralela às fibras (MPa)
 $f_{t0,3}$ – resistência à tração paralela às fibras da lamela inferior (MPa)
 G – módulo de cisalhamento (MPa)
 G_0 – módulo cisalhante (MPa)
 G_1 – módulo de cisalhamento da lamela superior (MPa)
 G_3 – módulo de cisalhamento da lamela inferior (MPa)
 G_{vt} – rigidez ao *rolling shear* (MPa)
 h – altura total do elemento (mm)
 h_1 – altura / espessura da camada superior (mm)
 h_2 – altura / espessura da camada central (mm)
 h_3 – altura / espessura da camada inferior (mm)
 h_{lc} – altura da seção / área da linha de cola (mm)
 I – momento de inércia (mm⁴)
 I_1 – momento de inércia da lamela superior (mm⁴)
 I_2 – momento de inércia da camada central (mm⁴)
 I_3 – momento de inércia da lamela inferior (mm⁴)
 I_{eff} – momento de inércia efetivo do elemento de MLCC (mm⁴)
 k – fator de redução (adimensional)
 k_1 – fator k de redução de rigidez (adimensional)
 K – coeficiente de atrito da rosca (adimensional)
 L – comprimento / vão do elemento (mm)
 L_0 – distância entre apoios (mm)
 M – momento fletor (N·mm)
 P_{rup} – força concentrada no meio do vão (N), quando usado em flexão
 P – pressão aplicada na colagem / prensagem (MPa), quando usado na prensa
 t – espessura da camada (mm)
 w – largura efetiva do elemento considerada no Método Gama (mm)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	JUSTIFICATIVA DO TRABALHO	23
2	OBJETIVOS	26
2.1	OBJETIVO GERAL	26
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	26
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	28
3.1	CONSTRUÇÃO CIVIL	28
3.2	A MADEIRA NA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	30
3.3	MADEIRA LAMELADA COLADA CRUZADA	35
3.4	PROCESSO DE FABRICAÇÃO	42
3.4.1	Seleção das lamelas.....	43
3.4.2	Agrupamento das lamelas	46
3.4.3	Aplainamento das lamelas.....	46
3.4.4	Ajuste do comprimento das lamelas	47
3.4.5	Aplicação do adesivo.....	47
3.4.6	Montagem do painel	48
3.4.7	Prensagem	49
3.4.8	Acabamento e controle da qualidade.	50
3.4.9	Identificação do produto, embalagem e despacho.	51
3.5	ANISOTROPIA NA MADEIRA E EFEITO <i>ROLLING SHEAR</i>	52
3.6	MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DO <i>ROLLING SHEAR</i>	58
3.6.1	Métodos experimentais.....	59
3.6.2	Valores de G_{vt} e f_{vt} reportados na literatura	62
3.6.2.1	Valores de G_{vt}	62
3.6.2.2	Valores de f_{vt}	63
3.7	ESTUDOS COM CONFIGURAÇÕES ALTERNATIVAS DE PAINÉIS MLCC	64
3.8	MÉTODOS DE CÁLCULO PARA ELEMENTO DE MLCC NA FLEXÃO	67
3.8.1	Método Gama	67
3.8.2	Método K	72
3.8.3	Método Kreuzinger	75

3.9	QUALIDADE DE COLAGEM DE ELEMENTOS DE MLCC	78
3.9.1	Procedimentos do método de ensaio ABNT NBR 7190-7 (2022)	80
3.9.1.1	Ensaio de delaminação	80
3.9.1.2	Ensaio de cisalhamento da linha de cola.....	82
3.10	CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	83
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	86
4.1	MATERIAIS	86
4.2	CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA	86
4.3	FABRICAÇÃO DOS PAINÉIS DE MLCC	88
4.4	ENSAIO DE DELAMINAÇÃO	96
4.5	ENSAIO DE CISALHAMENTO DAS LINHAS DE COLA	97
4.5.1	QUANTIFICAÇÃO DAS PORCENTAGENS DE FALHA ADESIVA E COESIVA POR ANÁLISE DE IMAGEM	99
4.6	DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE <i>ROLLING SHEAR</i> PARA A MLCC	102
4.6.1	Ensaio de flexão com vão variável	102
4.6.2	Ensaio de cisalhamento inclinado.....	107
4.6.3	Ensaio de cisalhamento vertical	110
4.7	AVALIAÇÃO ANALÍTICA DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DO PAINEL MLCC ENSAIADO COM BASE NO MÉTODO GAMA.....	113
4.7.1.1	Determinação dos parâmetros do Método Gama	114
4.7.1.2	Verificação de ELU	115
4.7.1.3	Verificação de ELS	115
4.7.2	Parâmetros experimentais utilizados na aplicação do Método Gama Avaliação do Método Gama para os painéis P45 e P30	116
4.8	ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	118
5	RESULTADOS	119
5.1	RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA	119
5.2	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE DELAMINAÇÃO	120
5.3	RESULTADOS DO CISALHAMENTO NA LINHA DE COLA.....	122
5.4	RESULTADOS DOS PARÂMETROS DE <i>ROLLING SHEAR</i> PARA A MLCC	126
5.4.1	Resultados da rigidez associada ao efeito de <i>rolling shear</i>	126
5.4.2	Resultados da resistência associada ao efeito de <i>rolling shear</i>	129

5.4.3	Comparação entre os resultados experimentais e analíticos	134
6	CONCLUSÃO.....	141
6.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	143
	REFERÊNCIAS.....	Erro! Indicador não definido.
	DADOS CURRICULARES	161

1 INTRODUÇÃO

A construção civil é um dos setores mais importantes para a economia de qualquer país, em razão de sua capacidade de gerar empregos, movimentar cadeias produtivas extensas e promover o desenvolvimento de infraestrutura. No Brasil, o setor desempenha papel estratégico no processo de urbanização e modernização das cidades, atendendo demandas relacionadas à habitação, transporte e serviços públicos, além de contribuir de forma significativa para o Produto Interno Bruto (PIB) nacional (IBGE, 2023). Dados oficiais indicam que a indústria da construção civil responde por uma parcela expressiva da geração de emprego e renda no país, envolvendo milhões de trabalhadores e milhares de empresas ao longo de toda a cadeia produtiva (IBGE, 2023; CBIC, 2024). Contudo, apesar de sua relevância econômica e social, o setor enfrenta desafios crescentes relacionados à sustentabilidade ambiental e à eficiência no uso de materiais, o que tem impulsionado a busca por soluções construtivas mais inovadoras e ambientalmente responsáveis (UNEP, 2020; Araújo *et al.*, 2020).

A crescente demanda por soluções sustentáveis na construção civil tem impulsionado a adoção de materiais renováveis e de menor impacto ambiental, especialmente diante da necessidade de redução das emissões associadas ao setor da construção (UNEP, 2020). Nesse contexto, a Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC), também conhecida internacionalmente como *Cross-Laminated Timber* (sigla em inglês CLT), emerge como uma alternativa inovadora e eficiente, ao combinar a sustentabilidade inerente da madeira com características estruturais que permitem sua aplicação em edificações de média e grande altura, competindo tecnicamente com materiais tradicionais como o concreto e o aço (Brandner *et al.*, 2016; Crespell e Gagnon, 2010). Além de suas vantagens estruturais, o MLCC contribui de forma significativa para a redução da pegada de carbono das edificações, uma vez que a madeira atua como armazenamento de carbono e demanda menor energia em seu processo produtivo quando comparada a materiais convencionais, como o concreto e o aço (Araujo *et al.*, 2020; Orozco *et al.*, 2023).

Uma das vantagens mais notáveis do MLCC é sua capacidade de vencer grandes espaços livres a elevados níveis de solicitação estrutural quando comparada a sistemas convencionais em madeira serrada, permitindo sua aplicação em

edificações de múltiplos pavimentos e em estruturas submetidas a maiores exigências de desempenho estrutural (Karacabeyli; Douglas, 2013; Brandner *et al.*, 2016).

A utilização da MLCC é particularmente relevante em aplicações que requerem elevada resistência e rigidez, associadas a critérios de sustentabilidade. O material é constituído pela colagem de lamelas de madeira dispostas em camadas ortogonais entre si, sendo a configuração mais usual aquela com defasagem de 90° entre camadas adjacentes. Essa disposição cruzada resulta em um comportamento estrutural mais homogêneo no plano do painel quando comparado à madeira serrada maciça, uma vez que reduz os efeitos da anisotropia natural da madeira, proporcionando maior estabilidade dimensional, especialmente frente a variações higroscópicas e à redistribuição de tensões internas. Uma variável significativa na performance estrutural desse material é a orientação das camadas, uma vez que a defasagem ortogonal favorece uma melhor distribuição e transferência de esforços nos dois eixos principais do painel, permitindo que o material suporte solicitações estruturais em diferentes direções (Crespell; Gagnon, 2010; Karacabeyli; Douglas, 2013; Brandner *et al.*, 2016; EN 16351).

O *rolling shear*, ou cisalhamento transversal, quando a camada central é disposta com angulação de 90° com relação às camadas externas é um dos modos de falha mais críticos para painéis de MLCC. Esse fenômeno ocorre principalmente nas camadas transversais do material e é caracterizado pela ruptura do adesivo ou da própria madeira devido a esforços de cisalhamento gerados por cargas aplicadas perpendicularmente ao plano do painel. A resistência ao *rolling shear* é diretamente influenciada pela orientação e espessura das camadas, pela qualidade da colagem entre elas, além de outros parâmetros como tipo de madeira, etc. A normalização nacional vigente sobre esse assunto é recente e estudos são necessários para avaliar os métodos de ensaios que quantificam as propriedades de resistência e de rigidez relativas ao *rolling shear*.

Com base no exposto, a proposta deste trabalho consistiu na avaliação da defasagem angular das camadas centrais dos elementos de MLCC para ângulos de 90°, 45° e 30°, a partir de diferentes métodos de ensaio (cisalhamento direto em corpos de prova vertical e inclinado, e flexão com vão variável) com o objetivo de avaliar se essas configurações melhoram a resistência e a rigidez ao *rolling shear*. Alterações na orientação da camada central podem redistribuir os esforços internos, reduzindo o impacto do *rolling shear* e aumentar tanto a rigidez quanto a resistência

global do painel. Os elementos de MLCC produzidos experimentalmente também foram submetidos a testes de qualidade de colagem (delaminação e cisalhamento das linhas de cola) para avaliação das aberturas das linhas de cola e das porcentagens de ruptura na madeira e no adesivo, nas interfaces coladas. Por fim, a partir dos valores de resistência e de rigidez ao *rolling shear* obtidos experimentalmente, foram realizadas verificações analíticas com base no Método Gama para checagem dos Estados Limites Últimos (ELU) e dos Estados Limites de Serviço (ELS) dos painéis avaliados na flexão.

Os resultados desta pesquisa poderão contribuir para o aprimoramento da compreensão do comportamento estrutural de sistemas construtivos em madeira, que utilizam a MLCC além de contribuir para a literatura nacional sobre o tema que atualmente encontra-se em fase de desenvolvimento.

1.1 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

A crescente preocupação com a sustentabilidade e a eficiência na construção civil tem impulsionado a busca por materiais que aliem alto desempenho estrutural à responsabilidade ambiental. Produtos de madeira engenheirada, como MLCC têm sido apontados como alternativas promissoras, combinando propriedades mecânicas adequadas com baixo impacto de carbono e boa rigidez bidirecional, o que os posiciona como materiais estratégicos em construções sustentáveis e de grande porte (Araujo; Christoforo, 2023; Anwar, 2024). Artigos recentes também demonstram que a MLCC já é amplamente estudada e aplicado em países como Áustria, Alemanha, Canadá e Estados Unidos, destacando-se por sua versatilidade estrutural, aceitação crescente na engenharia e contexto de construção verde (Akşar, 2025).

Embora a MLCC tenha se consolidado em alguns países como material de escolha para construções sustentáveis e eficientes, no Brasil sua aplicação ainda enfrenta desafios técnicos, normativos e culturais, o que se reflete na escassez de estudos nacionais dedicados ao tema (Calil Junior; Lahr; Dias, 2010; Ferreira *et al.*, 2020). A falta de investigações específicas sobre o comportamento estrutural do material, e sobre métodos de ensaio para determinação das propriedades de resistência e de rigidez, especialmente no que se refere ao cisalhamento transversal (*rolling shear*) e às diferentes configurações geométricas das camadas, limita a

confiança dos projetistas e dificulta a consolidação de critérios normativos adequados ao contexto brasileiro (Fragiacomo *et al.*, 2015; Brandner *et al.*, 2016).

Um dos maiores desafios técnicos relacionados ao MLCC, e que está diretamente relacionado ao dimensionamento do elemento estrutural, é a ocorrência do cisalhamento transversal (*rolling shear*), que afeta diretamente a resistência e a rigidez do material, especialmente nas camadas transversais (Bodig; Jayne, 1982; Fragiaco *et al.*, 2015). Esse fenômeno pode ser agravado por uma orientação ineficiente das camadas e pela qualidade da colagem entre elas, fatores que, quando otimizados, podem elevar o desempenho estrutural do material em aplicações de alta exigência (Gsell *et al.*, 2007; Brandner *et al.*, 2016). Assim, investigar como diferentes configurações de defasagem angular da camada central afetam os parâmetros de resistência e de rigidez ao *rolling shear* parâmetros é fundamental para a evolução da tecnologia do MLCC. Além disso, dentro deste contexto, avaliar se a modificação da defasagem da camada central pode influenciar a qualidade da colagem entre as camadas também é de fundamental importância uma vez que não existem estudos sobre essa avaliação.

Somado a esses fatores, a escolha de espécies de madeira provenientes de florestas plantadas para a produção de MLCC, neste trabalho, reforça o compromisso com a sustentabilidade e a valorização de recursos renováveis amplamente disponíveis no Brasil. Estudos recentes destacam que produtos de madeira engenheirada, como a MLCC, apresentam elevado potencial para reduzir impactos ambientais na construção civil, em função da estocagem de carbono ao longo de sua vida útil, da menor demanda energética associada à sua produção e da viabilidade de sistemas construtivos industrializados e pré-fabricados (Araújo *et al.*, 2023; Araujo; Pramreiter; Christoforo, 2025).

Por fim, ao integrar métodos experimentais (ensaios em corpos de prova de cisalhamento direto e também de flexão) e analíticos, este estudo tem o potencial de gerar subsídios técnicos aplicáveis ao dimensionamento e à avaliação experimental do desempenho estrutural de elementos em MLCC. A análise detalhada da influência das diferentes configurações de defasagem angular da camada central e sua relação com a resistência, a rigidez a partir de diferentes métodos de ensaio, e a qualidade da colagem, permite orientar decisões de projeto, especialmente no que se refere ao comportamento em serviço e à escolha de configurações mais adequadas para aplicações estruturais.

A inovação deste trabalho reside na contribuição inédita para a literatura nacional, uma vez que não foram identificados estudos que explorem a utilização de elementos de MLCC com camadas centrais defasadas em ângulos distintos de 90°, como 30° e 45°, empregando espécies florestais plantadas cultivadas no Brasil e diferentes métodos de ensaios.

Na literatura internacional, apenas dois estudos com abordagem conceitualmente similar foram identificados (Buck; Hagman, 2018; Haftkhani; Hematabadi, 2022). Ambos os trabalhos utilizaram espécies florestais distintas daquelas amplamente cultivadas no contexto produtivo brasileiro e não contemplaram a avaliação experimental do cisalhamento transversal, principalmente utilizando diferentes métodos de ensaios.

Assim, este trabalho busca não apenas contribuir para o avanço científico sobre MLCC no Brasil, mas também oferecer subsídios para o desenvolvimento da normalização nacional, em especial da ABNT NBR 7190 e práticas de engenharia que viabilizem sua aplicação de forma eficiente e segura.

1.2 – Estruturação do trabalho

Seção 1 – Proposta do trabalho e justificativa;

Seção 2 – Objetivos;

Seção 3 – Principais pesquisas realizadas sobre o tema;

Seção 4 – Materiais e métodos

Seção 5 – Resultados

Seção 6 – Conclusões finais e recomendações

Referências – Contém os principais trabalhos consultados;

Anexo A – Script para automatização das verificações no método Gama.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o comportamento estrutural de elementos da MLCC produzida com *Pinus elliottii*, considerando diferentes configurações de defasagem angular da camada central (90°, 45° e 30°), e a influência dessas variações na resistência e na rigidez ao cisalhamento transversal (*rolling shear*), bem como na qualidade da colagem entre as camadas considerando diferentes métodos de ensaio.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar um levantamento bibliográfico para identificação dos principais métodos de ensaios e de avaliação da resistência (f_{vt}) e da rigidez (G_{vt}) ao *rolling shear* e também para quantificação dos faixas de valores mais recomendados obtidos por outros pesquisadores para estas propriedades;
- Avaliar a qualidade de colagem através de ensaios de delaminação e de resistência ao cisalhamento da linha de cola de elementos de MLCC produzidos com *Pinus elliottii* e resina poliuretana, considerando diferentes defasagens angulares da camada central (90°, 45° e 30°);
- Determinar a resistência (f_{vt}) e a rigidez (G_{vt}) ao *rolling shear* de elementos de MLCC com defasagens da camada central de 90°, 45° e 30° a partir de ensaios de flexão considerando o método do vão variável;
- Determinar a resistência (f_{vt}) e a rigidez (G_{vt}) ao *rolling shear* de elementos de MLCC com defasagens da camada central de 90°, 45° e 30° a partir de ensaios de corpos de prova (verticais) sujeitos ao cisalhamento direto;
- Determinar a resistência (f_{vt}) e a rigidez (G_{vt}) ao *rolling shear* de elementos de MLCC com defasagens da camada central de 90°, 45° e 30° a partir de ensaios de corpos de prova (inclinados) sujeitos ao cisalhamento direto;
- Comparar os resultados experimentais de resistência (f_{vt}) e de rigidez (G_{vt}) obtidos para os elementos de MLCC com diferentes defasagens

angulares da camada central (90° , 45° e 30°), a partir dos diferentes métodos de ensaio considerados na pesquisa (corpos de prova de cisalhamento vertical, de cisalhamento inclinado e método do vão variável);

- Avaliar as equações analíticas propostas pelo método Gama no cálculo de elementos MLCC, considerando os resultados experimentais obtidos para a rigidez (G_{vt}) e resistência (f_{vt}) ao *rolling shear*, bem como os valores das propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Pinus elliottii* obtidos por meio da caracterização experimental.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

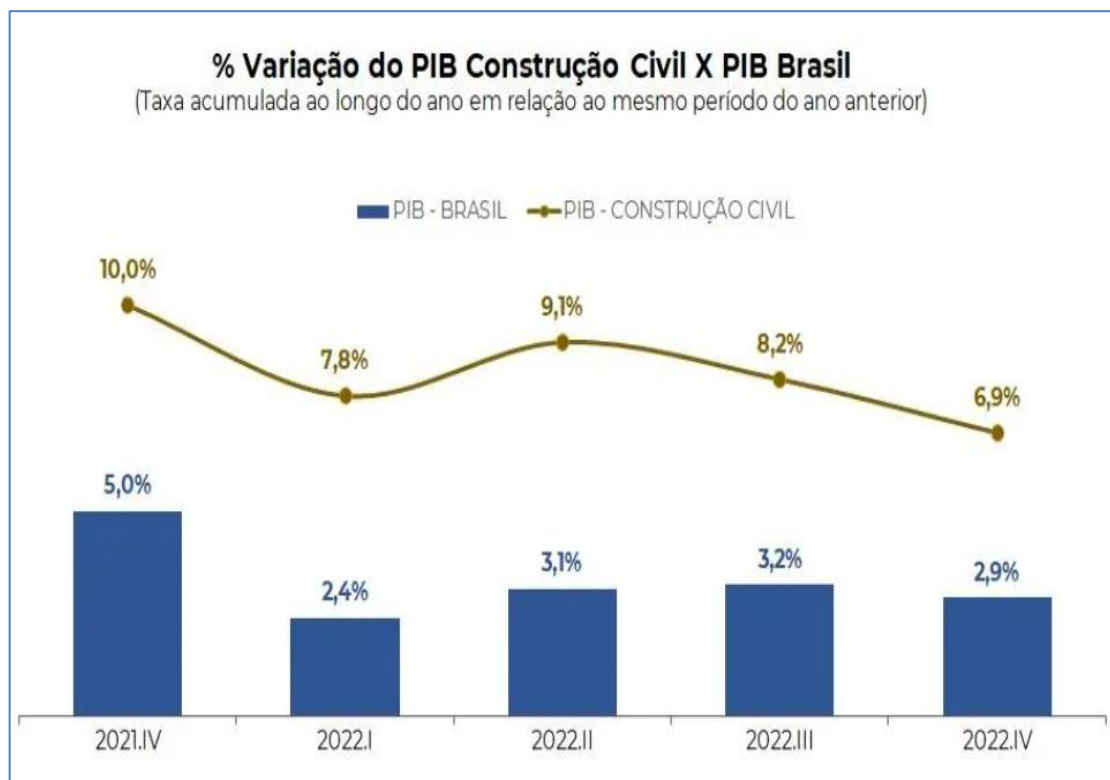
3.1 CONSTRUÇÃO CIVIL

A construção civil desempenha um papel estratégico no desenvolvimento socioeconômico de qualquer país, sendo responsável pela promoção da infraestrutura, geração de empregos e dinamização de cadeias produtivas (Dang; Sui Pheng, 2015). Além de atender às demandas por habitação, transporte e serviços públicos, o setor contribui diretamente para a modernização e urbanização das cidades, desempenhando um papel fundamental na melhoria da qualidade de vida da população (Cunha, 2022; Bueno, 2019).

Representa uma parcela expressiva do Produto Interno Bruto (PIB) de diversas nações, configurando-se como uma das principais alavancas do crescimento econômico (Nunes *et al.*, 2020). No Brasil, o setor possui contribuição relevante ao movimentar cadeias produtivas associadas, como as indústrias de cimento, aço, madeira e vidro, além de serviços de transporte e logística, destacando-se também por sua elevada capacidade de geração de empregos e promoção do desenvolvimento regional (Santos, 2020; Gonçalves Junior *et al.*, 2014; Antunes, 2021; Cunha, 2022; Kodongo e Ojah, 2016). Durante períodos de expansão econômica, o setor se destaca como um dos primeiros setores a apresentar crescimento, refletindo diretamente em maiores níveis de investimento e consumo (Gonçalves Junior *et al.*, 2014).

É possível observar uma forte correlação com o desempenho do PIB nacional, atuando como um importante motor da economia brasileira. Em diferentes cenários econômicos, o setor tem registrado taxas de crescimento superiores às do PIB geral, como observado no último trimestre de 2021 e ao longo de 2022, mesmo em períodos de desaceleração econômica. Esse comportamento evidencia o papel estratégico da construção civil na dinamização e na recuperação da economia nacional, conforme dados da Associação Brasileira de Incorporadoras Imobiliárias (ABRAINC, 2023), ilustrados na Figura 1.

Figura 1 – Relação entre a variação do PIB da Construção Civil e o PIB Geral do Brasil (2021-2022)



Fonte: ABRAIN (2023), com dados base do IBGE.

A construção civil, apesar de seu papel estratégico no desenvolvimento socioeconômico, é amplamente reconhecida como um dos setores com maior impacto ambiental, em razão do elevado consumo de recursos naturais e energia, da expressiva emissão de gases de efeito estufa (GEE) e da significativa geração de resíduos sólidos (Conto *et al.*, 2017; Ghisellini *et al.*, 2018; Hoxha *et al.*, 2017; Huang *et al.*, 2018). Estima-se que o setor seja responsável por aproximadamente 40% dos materiais extraídos globalmente, além de cerca de 39% das emissões globais de GEE, considerando tanto as emissões diretas nos canteiros de obra quanto aquelas associadas à produção de materiais e ao consumo energético das edificações ao longo de sua vida útil (Blankendaal *et al.*, 2014; Cabeza *et al.*, 2013; Soust-Verdaguer *et al.*, 2017). Nesse contexto, materiais convencionais como o concreto apresentam papel central nas emissões, sobretudo devido ao processo de produção do cimento, intensivo em carbono (Gustavsson ; Sathre, 2006; Skullestad *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2014).

Além das emissões atmosféricas, a construção civil também se destaca pelo elevado consumo de água, especialmente em sistemas construtivos baseados

em alvenaria, nos quais grandes volumes são empregados na mistura, cura e execução de concretos e argamassas, agravando impactos ambientais em regiões com restrições hídricas (Knight *et al.*, 2023; Marques *et al.*, 2017; Miller *et al.*, 2018). Soma-se a isso a expressiva geração de resíduos sólidos provenientes tanto da execução quanto da demolição de edificações, frequentemente descartados sem adequada reutilização ou reciclagem, o que intensifica a pressão sobre aterros sanitários e compromete a eficiência no uso de recursos (Ajayi *et al.*, 2017; Conto *et al.*, 2017; Leite *et al.*, 2017). Esses fatores reforçam a necessidade de mudanças estruturais nos sistemas construtivos e nos materiais empregados, direcionando o setor para soluções mais sustentáveis e alinhadas aos princípios da economia circular.

Diante dos impactos ambientais associados à construção civil convencional, torna-se fundamental a adoção de materiais mais sustentáveis, capazes de reduzir o consumo de recursos naturais, as emissões de gases de efeito estufa e a geração de resíduos. Nesse contexto, a madeira destaca-se como uma alternativa promissora, especialmente em sua forma engenheirada, como a MLCC. Além de ser um material renovável, a madeira apresenta um ciclo produtivo menos intensivo em carbono e menor demanda de água quando comparada a sistemas construtivos tradicionais, como o concreto e o aço. (Kremer; Symmons, 2015; Skullestad *et al.*, 2016; Sneed, 2017; Wang *et al.*, 2014).

3.2 A MADEIRA NA CONSTRUÇÃO CIVIL

A madeira, um dos materiais mais antigos da construção civil, permanece relevante e versátil, sendo aplicada desde edificações simples até projetos de elevada complexidade. Nas últimas décadas, seu uso tem ganhado destaque em função do apelo sustentável, do desempenho técnico e do potencial para inovação na construção civil (Almeida *et al.*, 2015; Song *et al.*, 2018; Zubizarreta *et al.*, 2019).

Do ponto de vista técnico, a madeira apresenta uma combinação de propriedades que a tornam competitiva em relação a materiais tradicionais, como concreto e aço. Entre suas características, destacam-se a alta resistência mecânica, leveza e capacidade de suportar esforços em tração e compressão. A relação entre resistência e densidade da madeira supera a de muitos materiais convencionais,

permitindo estruturas mais eficientes e com menor impacto ambiental (Huber et al., 2019; Milner ; Woodard, 2016; Wang et al., 2014; Xia et al., 2014).

Do ponto de vista ambiental, o uso da madeira na construção civil contribui para a redução da pegada de carbono do setor. A madeira é um material renovável que, durante seu crescimento, sequestra dióxido de carbono da atmosfera, mitigando os efeitos das mudanças climáticas. Em comparação com o concreto e o aço, a produção da madeira consome menos energia e emite quantidades significativamente menores de gases de efeito estufa. Além disso, as construções em madeira têm a capacidade de armazenar carbono durante sua vida útil, funcionando como um reservatório de longo prazo (Gustavsson; Sathre, 2006; Hildebrandt et al., 2017; Lu et al., 2017; Milner ; Woodard, 2016; Skullestad et al., 2016; Sneed, 2017; Woodard; Milner, 2016).

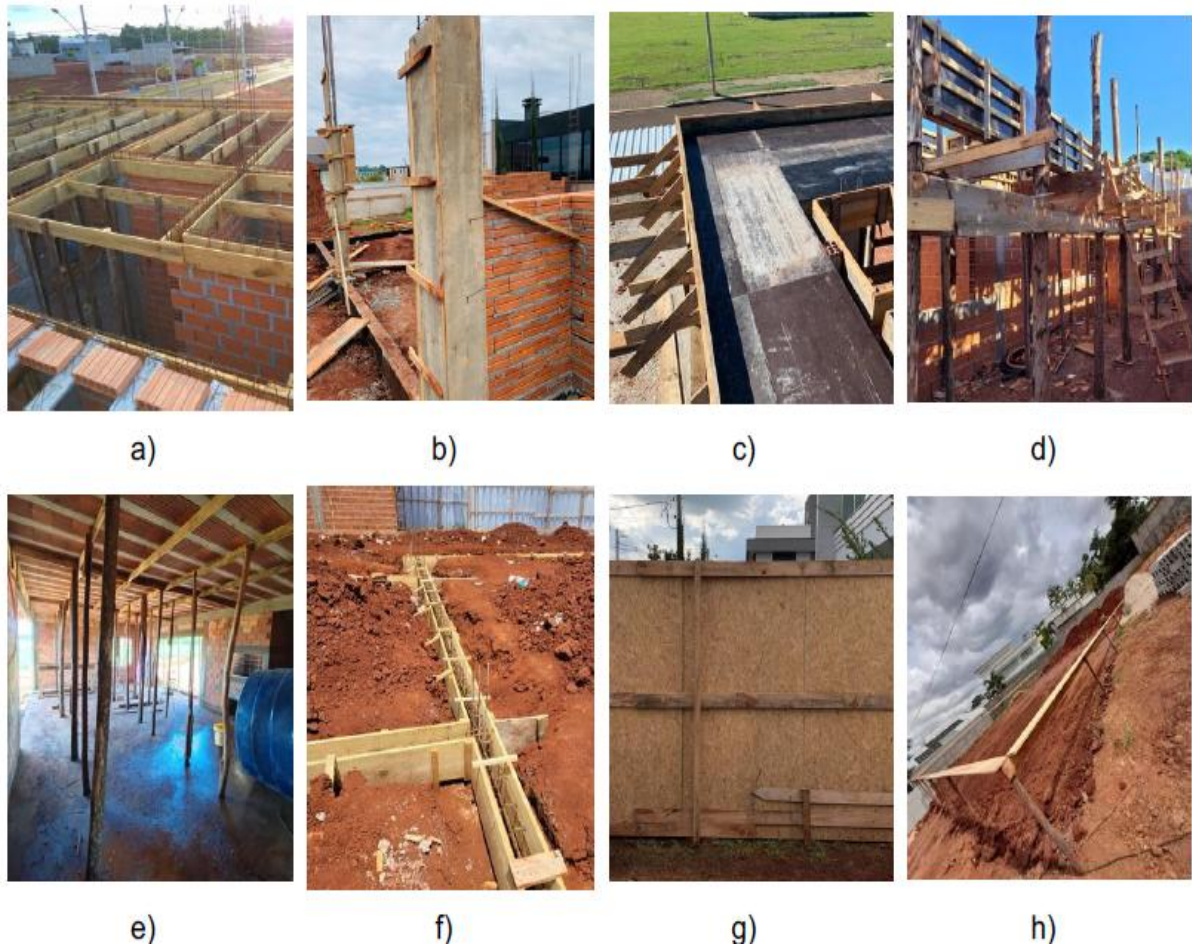
A madeira também se destaca pela sua contribuição para a sustentabilidade na construção civil, uma vez que sistemas construtivos em madeira podem reduzir emissões ao estocar carbono na biomassa utilizada. No panorama brasileiro levantado por Araujo *et al.* (2020), técnicas contemporâneas baseadas principalmente em espécies de florestas plantadas (eucalipto e pinus) apresentaram fixação de carbono entre 30 e 40 kgC/m², podendo atingir valores superiores, como 107 kgC/m² em soluções modulares em MLCC. No entanto, o uso da madeira na construção civil ainda enfrenta desafios culturais, normativos e técnicos (Bukauskas et al., 2019; Oliveira et al., 2024; Orlowski, 2020; Steffens et al., 2017).

No *ranking* dos dez maiores produtores de madeira serrada no mundo, o Brasil ocupa a 10^a posição, com 8,2 milhões de m³ de madeira serrada. O país possui um dos maiores índices de produtividade de floresta plantada do mundo, 29,7 - 38,9 m³/ha (pinus e eucalipto, respectivamente) (IBA, 2023), porém a maior parte do volume de madeira nacional (53,5%) é destinada ao uso industrial, a exemplo das toras para serrar e folhear, madeira para trituração, outras toras industriais, aparas e partículas e resíduos de madeira (FAO, 2021).

A madeira serrada é amplamente empregada nos canteiros de obras, sobretudo em aplicações temporárias, como formas para concreto, andaimes e estruturas provisórias (Jaillon et al., 2009; Kern et al., 2018). Esse tipo de utilização é favorecido pela disponibilidade do material, pela facilidade de manuseio e pelo custo relativamente baixo, o que a torna uma solução recorrente para funções transitórias nos processos construtivos (Lachimpadi et al., 2012). No entanto, em muitos casos, a

madeira utilizada nessas aplicações apresenta ciclo de vida curto, sendo descartada após poucos usos, o que contribui para a geração de resíduos e para o desperdício de recursos naturais (Hao et al., 2021). Essa prática evidencia uma subutilização do potencial estrutural da madeira, especialmente quando comparada à sua possível aplicação em sistemas permanentes e de maior valor agregado (Araujo et al., 2020; Kern et al., 2018). Alguns dos principais elementos dos sistemas provisórios (sistema de formas, escoramento e proteção coletiva) estão devidamente ilustrados a seguir (Figura 2).

Figura 2 – Uso da madeira de forma temporária: a) Fôrmas vigas de cobertura; b) Caixaria de pilares; c) Fôrmas de laje; d) Andaimes; e) Sistema de escoras; f) Carpintaria de baldrame; g) Tapumes OSB; h) Gabarito de obra.

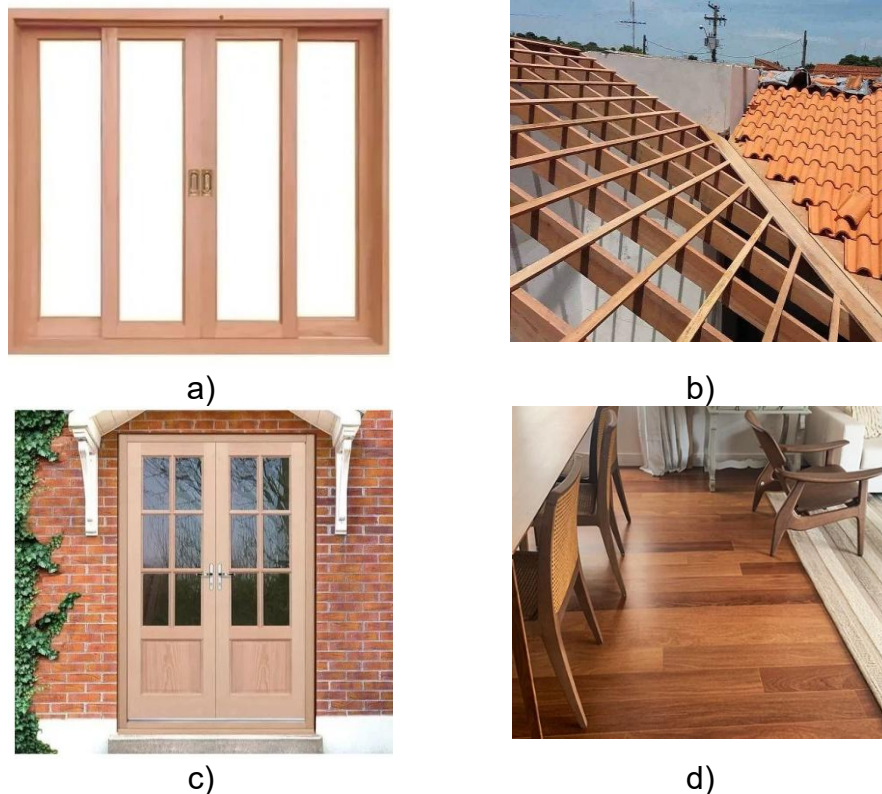


Fonte: Adaptado de Oliveira (2022).

Embora a madeira serrada também seja empregada de forma permanente na construção civil brasileira, seu uso estrutural permanece, em grande parte, restrito

a soluções tradicionais, como esquadrias, estruturas de cobertura (vigas, caibros e ripas), portas e pisos, conforme ilustrado na Figura 3. Esses elementos são amplamente difundidos em edificações rurais, comerciais e residenciais, porém estão majoritariamente associados a funções secundárias ou a sistemas construtivos convencionais, não refletindo a ampla gama de possibilidades estruturais que a madeira pode oferecer quando empregada em soluções engenheiradas e industrializadas.

Figura 3 – Uso da madeira de forma permanente: a) Esquadrias; b) Estrutura para telhado; c) Portas; d) Pisos



Fonte: Adaptado de Oliveira (2022).

Esse cenário contrasta fortemente com países que lideram o uso da madeira como material de construção, especialmente em sistemas estruturais e arquitetônicos mais avançados. Em muitos países europeus e na América do Norte, a madeira serrada e as madeiras engenheiradas, como a MLC e a MLCC, são amplamente utilizados em edifícios residenciais, comerciais e até mesmo em arranha-céus de madeira. Esses sistemas destacam-se pela eficiência estrutural, durabilidade e, sobretudo, pela sustentabilidade, atributos que poderiam ser explorados no

mercado brasileiro em maior escala (Brandner et al., 2016; Santos et al., 2024; Kremer; Symmons, 2015; Passarelli, 2013; Toppinen et al., 2018).

O uso relativamente reduzido da madeira serrada em aplicações estruturais permanentes na construção civil brasileira está historicamente associado a fatores culturais, técnicos e institucionais, como a predominância de sistemas construtivos em concreto e alvenaria, amplamente normatizados e consolidados ao longo do século XX (Oliveira et al., 2024; Shigue, 2018). Estudos setoriais indicam que, até recentemente, políticas públicas e instrumentos de fomento voltados à habitação no Brasil apresentavam caráter pouco favorável à adoção de sistemas construtivos em madeira, especialmente aqueles baseados em maior nível de industrialização e engenharia do material (De Araujo et al., 2019). No entanto, trabalhos mais recentes apontam uma mudança gradual nesse cenário, impulsionada por agendas globais de descarbonização, economia circular e uso eficiente de biomateriais na construção, nas quais a madeira passa a ser reconhecida como material estratégico para a mitigação das emissões do setor (De Araujo; Pramreiter; Christoforo, 2025).

Essa limitação também reflete a ausência de maior valorização das propriedades naturais da madeira e a falta de investimentos em tecnologias que aprimorem sua durabilidade e desempenho estrutural. Tratamentos contra agentes biológicos, como fungos e cupins, bem como o uso de produtos engenheirados, poderiam ampliar significativamente a gama de aplicações da madeira serrada, aumentando sua competitividade frente aos materiais tradicionais (Punhagui, 2014; Araujo et al., 2020).

Portanto, apesar de o Brasil possuir um dos maiores potenciais mundiais para a produção e utilização de madeira serrada, sua aplicação na construção civil ainda é predominantemente subvalorizada temporária (Oliveira et al., 2024; Punhagui, 2014). Para reverter esse quadro, é necessário promover mudanças culturais, políticas e tecnológicas que incentivem o uso da madeira de forma mais ampla e permanente (Araujo et al., 2020). Isso inclui desde a disseminação de conhecimento técnico sobre os benefícios do material até o desenvolvimento e a adoção de sistemas construtivos em madeira claramente definidos, que abrangem desde soluções tradicionais e de baixa altura, como *wood frame (light-frame)* e sistemas pilar-viga (*post-and-beam*), até sistemas engenheirados e industrializados, aplicáveis a edificações de média e maior altura, como estruturas em MLC, painéis de MLCC, sistemas modulares pré-fabricados e soluções híbridas madeira–concreto (Araujo,

2023). Esses sistemas contribuem para um modelo de construção mais sustentável e alinhado às demandas ambientais contemporâneas (Brandner et al., 2016; Shigue, 2018).

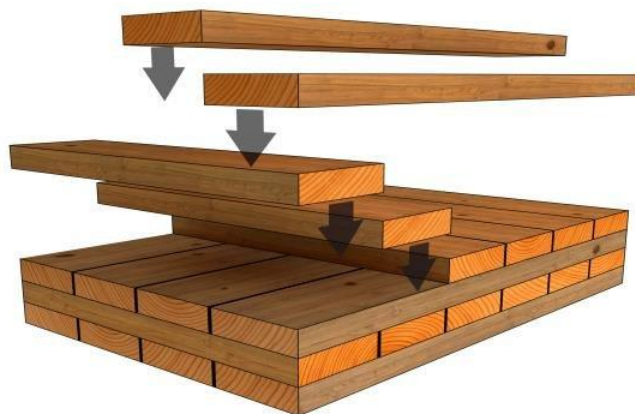
3.3 MADEIRA LAMELADA COLADA CRUZADA

A MLCC é um elemento construtivo relativamente recente, cujo desenvolvimento inicial ocorreu na Europa Central ao longo da década de 1990. Os primeiros protótipos e aplicações experimentais do material foram registrados na Suíça, enquanto a consolidação tecnológica e o desenvolvimento do MLCC no formato atualmente conhecido resultaram de um projeto de pesquisa conduzido na Áustria, estabelecido por meio de parcerias entre a indústria e instituições acadêmicas (Crespell; Gagnon, 2010). A partir de então, diversas pesquisas aprofundaram o estudo da MLCC, e indústrias começaram a ser instaladas na Europa Central, especialmente na Áustria, Suíça e Alemanha, evoluindo de produções em pequena escala para operações industriais nos últimos anos (Brandner *et al.*, 2016).

A MLCC está amplamente consolidada na Europa, com destaque para a Áustria, que responde por 63% da produção do material no continente europeu (Passarelli, 2013b). Esse dado é evidenciado por análises que identificam os principais fabricantes globais de MLCC, sendo que cinco das maiores empresas estão localizadas na Áustria, com destaque para Binderholz, Stora, KLH Massivholz, Mayr Melnhof Holz e Hasslacher Norica Timber (Ebner, 2017).

A MLCC, também conhecida pelas siglas "X-Lam" ou "CrossLam", e mais comumente no mundo como "*Cross Laminated Timber*" é um material engenheirado formado por um número ímpar de camadas de madeira maciça, geralmente três, cinco ou sete (Baño *et al.*, 2018). Essas camadas são compostas por lamelas de madeira dispostas lado a lado e organizadas transversalmente em ângulos de 90° (Figura 4), sendo unidas por adesivos estruturais (Karacabeyli; Gagnon, 2019). Essa configuração cruzada confere ao material propriedades anisotrópicas equilibradas, proporcionando alta estabilidade dimensional e resistência a esforços tanto no plano quanto fora dele, tornando-o adequado para diversas aplicações estruturais (Brandt *et al.*, 2019; Liao *et al.*, 2017).

Figura 4 – Configuração das camadas de lamelas da MLCC.



Fonte: Buck; Hagman (2018).

As lamelas utilizadas na fabricação da MLCC apresentam variações em suas dimensões dependendo das especificações de projeto e normas técnicas. Segundo Karacabeyli e Gagnon (2019), a espessura das lamelas pode variar de 16 mm a 45 mm, enquanto Karacabeyli e Douglas (2013) indicam que a espessura pode ser de 16 mm a 51 mm, com larguras variando de 60 mm a 240 mm. FPInnovations (2011) também sugere que a espessura das lamelas pode variar entre 10 mm e 50 mm, sendo possível que as larguras dentro de uma mesma camada sejam diferentes. A norma ANSI/APA PRG 320:2012, por sua vez, estabelece que a espessura deve estar entre 16 mm e 51 mm, com a largura na direção principal maior que 1,75 vezes a espessura e na direção secundária maior que 3,5 vezes a espessura, garantindo parâmetros consistentes para aplicações estruturais.

No Brasil, a produção industrial de painéis de MLCC ainda é incipiente, sendo realizada atualmente por poucas empresas. De acordo com o levantamento global dos principais desenvolvedores de MLCC, destacam-se no país as empresas Crosslam, localizada em Suzano (SP), e Urbem, sediada em Almirante Tamandaré (PR), (Araujo; Christoforo, 2023). No caso da Crosslam, são reportados painéis com número variável de camadas, usualmente entre 3 e 7 camadas, com espessuras compatíveis com aplicações estruturais em edificações, cujas dimensões máximas podem ser condicionadas por aspectos logísticos e por regulamentações de transporte no território nacional (Santos, 2021).

O arranjo ortogonal das camadas da MLCC proporciona elevada capacidade para suportar esforços em duas direções, oferecendo maior resistência e rigidez tanto no plano quanto fora dele. Essa característica permite sua aplicação em

diversas funções estruturais, como diafragmas de parede, placas de piso ou mesmo como elementos de vigas e pilares (Brandner *et al.*, 2016; Christovasilis *et al.*, 2016a).

A disposição cruzada das camadas da MLCC garante uma elevada estabilidade dimensional, minimizando significativamente as taxas de contração e inchamento, características inerentes ao efeito da laminação cruzada (Brandner *et al.*, 2016). Essa configuração também contribui para a homogeneização das propriedades mecânicas do material, reduzindo impactos de defeitos naturais da madeira, como rachaduras, trincas, desvios de grã, nós e variações na largura dos anéis de crescimento. Como resultado, a rigidez do painel final torna-se comparável à das placas de concreto armado, ampliando seu potencial de aplicação no mercado da construção civil (Buck; Hagman, 2018; Pereira, 2015).

A MLCC destaca-se pela alta qualidade em termos de pré-fabricação, oferecendo significativa facilidade de montagem e redução no tempo de construção (Brandner *et al.*, 2016). Os elementos são produzidos em fábrica e entregues prontos para instalação, o que permite uma montagem rápida e eficiente, necessitando apenas de uma grua, elementos conectores estruturais, um plano de montagem e mão de obra especializada (FPInnovations, 2011).

Essa característica contribui para maior segurança no canteiro de obras, reduzindo substancialmente os custos de construção, os resíduos e o desperdício de materiais. Comparada a sistemas construtivos tradicionais, como a alvenaria, a MLCC apresenta um elevado nível de precisão e eficiência, tornando-a uma solução vantajosa e sustentável para projetos de construção civil (Gsell *et al.*, 2007).

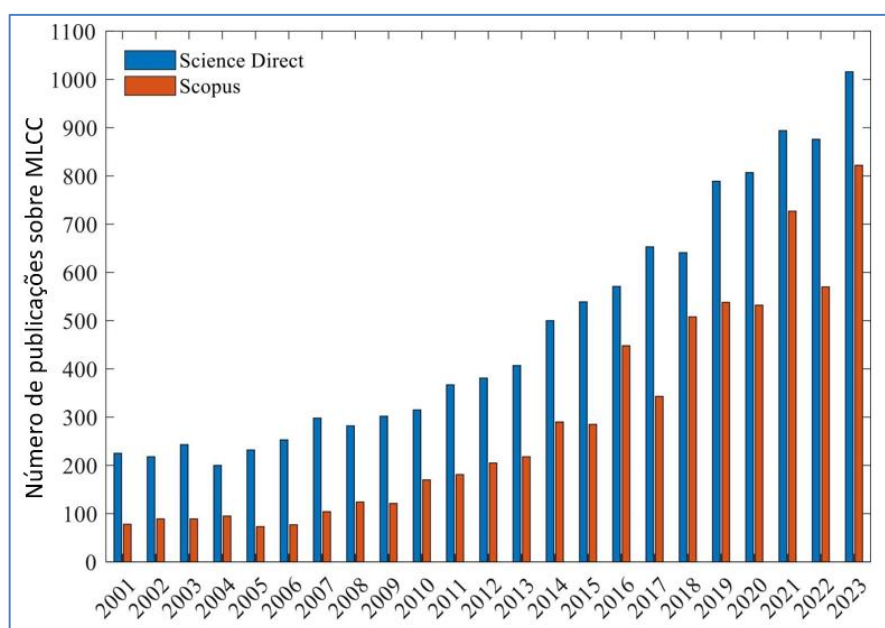
A MLCC é amplamente reconhecida como uma solução sustentável por reduzir impactos ambientais, ser proveniente de fontes renováveis e apresentar alta eficiência energética e baixas emissões de CO₂ durante sua produção, destacando-se frente a materiais convencionais como concreto e aço (Lehmann, 2013; Tellnes *et al.*, 2020; Younis; Dodoo, 2022). Sua reutilização contribui para a economia circular, enquanto sua versatilidade permite o uso independente ou combinado com outros materiais, adaptando-se a diferentes formatos arquitetônicos. Essas características tornam a MLCC uma escolha alinhada às práticas construtivas mais conscientes e inovadoras (Gsell *et al.*, 2007; Ren *et al.*, 2024; Tellnes *et al.*, 2020).

O painel de MLCC apresenta excelente isolamento acústico e térmico (FPInnovations, 2011). Vale ressaltar que um bom isolamento térmico contribui para a redução do consumo de energia necessária para aquecer ou resfriar os ambientes

internos, promovendo maior eficiência energética das edificações. Outra característica destacável é sua resistência superior a incêndios, abalos sísmicos e explosões, o que reforça sua segurança em diversas condições estruturais. Sua baixa relação resistência/peso possibilita construções de múltiplos pavimentos sem comprometer a estabilidade estrutural (Flores et al., 2016; Karacabeyli; Gagnon, 2019).

O número de publicações relacionadas à MLCC tem apresentado um crescimento significativo ao longo dos últimos 23 anos, desde 2001, conforme dados obtidos nas bases de pesquisa *ScienceDirect* e *Scopus*, a partir do trabalho de Ren et al. (2024) e ilustrados na Figura 5. Esse aumento reflete o interesse crescente da comunidade acadêmica e científica por este material. Observa-se que o crescimento das publicações foi particularmente acentuado a partir de 2010, marcando o início de um período de rápida expansão. Entre 2010 e 2023, o número de trabalhos publicados sobre MLCC teve um aumento expressivo de 222%. Esses dados demonstram claramente a importância crescente da MLCC na pesquisa científica atual e sua relevância como material inovador, sustentável e de alto desempenho, acompanhando a tendência de desenvolvimento tecnológico e ambientalmente consciente na construção civil.

Figura 5 – Número de publicações relacionadas à MLCC, conforme os anos.



Fonte: Ren et al. (2024).

Apesar de suas inúmeras vantagens, a MLCC enfrenta barreiras significativas para sua ampla adoção, como a desconfiança em relação à madeira

como material estrutural, a percepção limitada de sua eficiência, custos iniciais mais altos em comparação aos materiais tradicionais e a necessidade de mão de obra especializada. Além disso, desafios relacionados à logística, disponibilidade de matéria-prima e conscientização sobre suas vantagens também dificultam sua aceitação no mercado. Superar essas limitações exige esforços para reduzir custos, capacitar profissionais e aumentar a conscientização sobre os benefícios da MLCC, consolidando-a como uma alternativa viável e sustentável na construção civil (FPInnovations, 2011; Jones *et al.*, 2016; Penfield *et al.*, 2022).

Apesar dessas barreiras, as inúmeras vantagens já citadas da MLCC têm impulsionado um crescimento expressivo do número de edificações que adotam esse sistema construtivo em escala global. Um levantamento realizado por Jeong (2024) identificou 358 edifícios em MLCC com três ou mais pavimentos construídos entre 2004 e 2023, evidenciando a consolidação do material em aplicações estruturais de média e maior altura. Desse total, aproximadamente 73% correspondem a edificações entre 5 e 10 pavimentos, enquanto 15,3% já se enquadram como edifícios altos, com 11 pavimentos ou mais, demonstrando a viabilidade técnica do sistema para diferentes tipologias e escalas construtivas. Essas edificações abrangem predominantemente usos residenciais, educacionais, comerciais e de uso misto, com forte concentração na Europa e crescente participação na América do Norte, o que reforça a MLCC como uma alternativa estrutural eficiente e alinhada às demandas contemporâneas de sustentabilidade na construção civil.

Os painéis de MLCC, apesar de serem uma tecnologia relativamente recente na construção civil, já são amplamente utilizados em diversos países e continentes. Seu potencial é evidente em edificações residenciais e comerciais de múltiplos pavimentos, marcando o renascimento das construções em madeira no ambiente urbano (Brandner *et al.*, 2016). A maioria das edificações em MLCC está concentrada na Europa, especialmente na Áustria, Alemanha, Suíça, Inglaterra, França, Itália e países nórdicos (Oliveira, 2019).

No Canadá, encontra-se o edifício *Brock Commons* (Figura 6), concluído em 2017. Com 18 pavimentos, sua estrutura combina concreto e madeira, sendo que o primeiro andar é feito em concreto armado, enquanto os 17 andares superiores utilizam pilares de Madeira Lamelada Colada (MLC) e lajes de MLCC. Além disso, dois núcleos de circulação vertical foram construídos em concreto. O edifício foi

projetado para servir como residência estudantil, acomodando cerca de 400 alunos da The University of British Columbia.

Figura 6 – Edifício Brock Commons



Fonte: Adaptado de Oliveira (2019).

O *Stadthaus*, (Figura 7) situado em Londres, é um edifício residencial que se destaca pelo uso do MLCC em sua estrutura. Com nove pavimentos distribuídos em uma área de 289 m², sua construção foi concluída em apenas 49 semanas, um tempo significativamente menor do que as 72 semanas previstas para uma edificação em concreto armado. Os painéis de MLCC utilizados no projeto foram fabricados na Áustria e transportados por caminhões até o Reino Unido, o que restringiu suas dimensões a 14 metros de comprimento e 2,95 metros de largura. Inaugurado em 2010, o *Stadthaus* tornou-se uma referência na construção em madeira, sendo amplamente reconhecido por sua abordagem inovadora (Costa, 2013).

Figura 7 – Edifício Stadthaus



Fonte: Adaptado de Vilela (2020).

Localizado em Brumunddal, na Noruega, o edifício Mjøstårnet (Figura 8) foi finalizado em março de 2019 e, até o momento, é considerado o maior prédio construído em madeira no mundo. Com uma altura de 85,4 metros e 18 pavimentos, sua estrutura é composta por pilares de MLC, enquanto as paredes e os pisos são formados por painéis de MLCC. Imponente na paisagem urbana, o edifício se tornou um ponto de destaque na cidade, despertando o interesse de turistas que visitam a região (Block, 2013).

Figura 8 – Edifício norueguês multipavimento mais alto do mundo



Fonte: Adaptado de (Vilela, 2020)

Além dos exemplos emblemáticos apresentados, estudos recentes evidenciam que a construção em madeira em múltiplos pavimentos deixou de ser pontual e passou a assumir escala global. Um levantamento quantitativo conduzido por Orozco *et al.* (2023), identificou 300 edifícios contemporâneos em madeira de múltiplos pavimentos, distribuídos principalmente pela Europa, América do Norte, Ásia e Oceania, envolvendo mais de 600 agentes globais entre arquitetos, engenheiros e fabricantes especializados. O estudo demonstra não apenas o aumento expressivo no número dessas edificações ao longo das últimas duas décadas, mas também uma tendência clara de crescimento a partir da década de 2010, associada à evolução dos marcos normativos, à industrialização dos sistemas construtivos em madeira e à consolidação de produtos engenheirados, como MLCC e MLC. Observa-se ainda a ampliação das tipologias arquitetônicas, abrangendo usos residenciais, comerciais,

institucionais e de uso misto, bem como o aumento progressivo em altura e complexidade estrutural, o que reforça a consolidação da madeira engenheirada como uma solução estrutural viável e amplamente adotada no cenário internacional da construção civil contemporânea.

A implementação do sistema construtivo utilizando painéis de MLCC ainda é recente no Brasil, mas vem ganhando espaço gradativamente, impulsionada pelos benefícios associados à madeira engenheirada, como sustentabilidade, eficiência energética e redução do tempo de obra. Um marco nesse avanço foi a inauguração, no final de 2020, de um edifício comercial em São Paulo (Figura 9), loja de chocolates da Dengo, na avenida Brigadeiro Faria Lima. Com quatro pavimentos e uma área aproximada de 1.500 m², a estrutura do edifício combina diferentes materiais, incluindo um núcleo rígido em concreto, pilares e vigas de MLC, além de lajes e paredes em MLCC, empregadas para garantir a rigidez global da construção. Esse empreendimento representou um avanço significativo na aplicação e na integração da cadeia produtiva da madeira engenheirada no contexto da construção civil brasileira (Santos, 2021).

Figura 9 – Primeiro edifício multipavimento em MLC e MLCC no Brasil.



Fonte: Adaptado de Santos (2021).

3.4 PROCESSO DE FABRICAÇÃO

O processo de fabricação do MLCC segue uma sequência de etapas rigorosas, que visam garantir a qualidade e o desempenho estrutural do material.

Inicialmente, ocorre a seleção da madeira serrada, seguida da classificação visual e mecânica das lamelas secas, assegurando a uniformidade e resistência das peças. Posteriormente, as lamelas passam pelo aplainamento, etapa essencial para nivelar suas superfícies e garantir a eficiência da colagem. Quando necessário, realizam-se cortes e inserção de emendas dentadas (*finger joints*) para ajuste do comprimento das lamelas. Em algumas situações, pode ser aplicada colagem nas faces estreitas das lamelas de uma mesma camada, com o objetivo de aumentar a coesão estrutural. Após a preparação das lamelas, as camadas são organizadas e coladas, respeitando a orientação cruzada característica da MLCC. Em seguida, os painéis passam pelo processo de prensagem, que garante a aderência entre as camadas e a formação da estrutura final. Na fase de finalização, os painéis são submetidos a acabamentos e cortes precisos, seguidos pela embalagem e transporte para o local de aplicação (Costa, 2013; Oliveira, 2019; Santos, 2021). Cada uma destas etapas será discutida a seguir.

3.4.1 Seleção das lamelas

A primeira etapa é a seleção das lamelas, sendo uma etapa fundamental no processo de fabricação do MLCC, uma vez que influencia diretamente a qualidade e o desempenho estrutural do material final. Nesse estágio, é realizada uma triagem criteriosa das peças de madeira, considerando aspectos como classificação visual e propriedades mecânicas, em especial propriedades elásticas. O principal objetivo desse procedimento é identificar e descartar elementos que apresentem defeitos que comprometam sua integridade estrutural, como nós excessivos, rachaduras, empenamentos e falhas decorrentes de uma secagem inadequada (Pereira, 2015).

Além da avaliação das propriedades individuais das lamelas, há também a possibilidade de utilizar peças de classes inferiores nas camadas internas do painel, especialmente onde as tensões normais são menos significativas. Nesse contexto, madeiras provenientes de desbaste, parcialmente atacadas por insetos ou até mesmo recuperadas de incêndios florestais podem ser empregadas, desde que atendam aos requisitos mínimos de resistência e estabilidade dimensional. Essa prática, além de otimizar o aproveitamento da matéria-prima, contribui para a sustentabilidade do processo produtivo, reduzindo desperdícios e promovendo o uso eficiente dos recursos naturais (Li, 2015; Santos, 2021).

A norma ABNT NBR 7190-2 (2022) estabelece diretrizes para a classificação mecânica e visual das lamelas utilizadas na fabricação de elementos estruturais de madeira. De acordo com essa regulamentação, as lamelas devem ser classificadas em três diferentes classes, garantindo que as propriedades mecânicas do material atendam aos requisitos estruturais exigidos.

No caso específico da madeira de Pinus, a mesma norma determina sua classificação conforme os critérios presentes na Tabela 1, para coníferas, enquanto as madeiras de eucalipto (folhosas) seguem os parâmetros definidos na Tabela 2.

Tabela 1 – Recomendação de classificação de lamelas para coníferas.

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

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190:2022-2.

A correta classificação das lamelas é essencial para garantir a uniformidade e a previsibilidade do desempenho estrutural dos painéis massivos de MLCC. Esse procedimento permite um melhor aproveitamento da matéria-prima, separando as

peças conforme suas propriedades e destinando as de maior resistência para as camadas externas, onde há maior solicitação mecânica, enquanto lamelas de classes inferiores podem ser utilizadas em camadas internas, desde que atendam aos requisitos normativos (Silva, 2023).

É importante que ocorra diferenciação das coníferas e folhosas, pois se deve às características intrínsecas de cada espécie, como densidade, resistência mecânica e comportamento em condições de carga. Além disso, é fundamental distinguir entre madeiras de folhosas e coníferas, pois apresentam diferenças significativas em termos de estrutura anatômica, variação na distribuição de fibras e propriedades mecânicas (Oliveira, 2019).

Tabela 2 – Recomendação de classificação de lamelas para folhosas.

Defeito	Unidade	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Medula	–	Não se admite		
Nós na face	–	≤ 1/5	≤ 1/3	≤ 1/2
Nós na borda	–	≤ 1/5	≤ 1/3	≤ 1/2
Inclinação das fibras	mm·mm ⁻¹	≤ 1:12	≤ 1:9	≤ 1:6
Fissuras não passantes	m	O comprimento das fissuras não deve ser maior que 1,0 m e nem exceder 1/4 do comprimento da peça		
Fissuras passantes	m	Somente se permitem fissuras passantes nos extremos e o comprimento não deve ser maior que a largura da peça		
Encurvamento	mm	Menor que 8 mm para cada 3 m de comprimento		
Arqueamento	mm	Menor que 3 mm para cada 2 m de comprimento		
Torcimento	mm·m ⁻¹	Menor que 5 mm para cada 1 m de comprimento		
Encanoamento	mm	Sem restrições		
Esmoadado	mm·mm ⁻¹	Transversalmente menor que 1/4 da espessura ou da largura da peça		
Ataques biológicos		Sem restrições para o comprimento		
	-	Não se admitem zonas atacadas por fungos causadores de podridão		
		Admitem-se zonas atacadas por fungos cromógenos		
		Admitem-se orifícios causados por insetos com diâmetro inferior a 2 mm		
Outros defeitos	–	Danos mecânicos, presença de bolsa de resina e outros defeitos devem ser limitados por analogia com característica similar		

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190:2022-2.

3.4.2 Agrupamento das lamelas

A seguinte etapa é o agrupamento e a organização das lamelas na produção de MLCC, as quais são essenciais para assegurar tanto o desempenho estrutural quanto a qualidade estética dos painéis. Esse processo classificatório envolve a seleção das melhores lamelas para as camadas longitudinais ou transversais, considerando as suas propriedades mecânicas. As peças na direção principal da madeira devem apresentar resistência e rigidez semelhantes, e deve-se atentar para as regiões que recebem ferragens ou parafusos devem utilizar lamelas de qualidade superior devido às altas solicitações. Além disso, as camadas externas podem ser compostas por lamelas de maior apelo mecânico/visual, valorizando o acabamento do painel. O controle rigoroso desses aspectos garante a conformidade com normas técnicas e a eficiência do MLCC em diferentes aplicações (FPInnovations, 2011 Pereira, 2015; Silva, 2023).

3.4.3 Aplainamento das lamelas

A etapa seguinte no processo de produção do MLCC é o aplainamento das lamelas, que desempenha um papel crucial na preparação das peças para a colagem. Esse procedimento visa remover a camada superficial oxidada da madeira, permitindo a abertura dos poros e melhorando a penetração do adesivo nas células, o que resulta em uma colagem mais eficiente. Além disso, o aplainamento garante a uniformidade dimensional das lamelas, especialmente quando realizado nas quatro faces da madeira (S4S), mesmo nos casos em que a cola não é aplicada nas laterais das peças (Pereira, 2015).

Para assegurar a eficiência do processo, recomenda-se a remoção de 2,5 mm na espessura da madeira e 3,8 mm na largura das lamelas, conforme apontado por FPInnovations (2011). Após o aplainamento, é comum que o teor de umidade da madeira apresente variações, sendo necessário um novo controle para garantir a conformidade com os parâmetros exigidos.

Adicionalmente, o procedimento de aplainamento requer cuidado com a velocidade de avanço e a escolha das ferramentas utilizadas, as quais devem ser adequadas ao tipo de madeira em processamento. Parâmetros inadequados podem gerar deformações nas superfícies, como ondulações, que comprometem o contato

entre as peças e, conseqüentemente, reduzem a eficiência da colagem. Assim, essa etapa é fundamental para preparar as lamelas de maneira adequada, assegurando a qualidade e o desempenho estrutural do painel final (Karacabeyli; Gagnon, 2019; Silva, 2023).

3.4.4 Ajuste do comprimento das lamelas

Nesta etapa, as lamelas são cortadas no comprimento adequado, de acordo com as dimensões do prato da prensa e as limitações dos equipamentos de produção ou transporte até o canteiro de obras (Pereira, 2015). Esse corte, denominado destopo, é essencial para definir a dimensão final das peças. Para prensas com dimensões retangulares, é possível aproveitar pedaços de lamelas longitudinais destopadas para compor camadas transversais no centro do painel. Já em prensas com dimensões quadradas, é necessário que as peças nas direções longitudinal e transversal possuam o mesmo comprimento (Silva, 2023).

Além do corte, é realizada a união longitudinal das lamelas por meio de emendas do tipo *finger-joint*. Essa técnica garante a continuidade das peças em comprimentos maiores, sendo fundamental para a resistência do elemento estrutural. No entanto, as propriedades mecânicas das emendas representam uma região crítica do painel, exigindo atenção especial para assegurar a qualidade e o desempenho estrutural, conforme estabelecido pela ABNT NBR 7190-1 (2022) e Fortuna et al., (2020).

3.4.5 Aplicação do adesivo

Nesta etapa, a aplicação de adesivo é realizada por máquinas chamadas coladeiras, que espalham o adesivo sobre as lamelas de madeira de forma contínua, fazendo uma linha de produção, com velocidades que variam de 18 a 60 m/min (Pereira, 2015).

A aplicação de adesivo na produção de MLCC e MLC é um processo fundamental, cuja eficiência depende da escolha do tipo de adesivo e da conformidade com as especificações fornecidas pelo fabricante. O adesivo deve ser espalhado uniformemente sobre a superfície da madeira, garantindo a aplicação correta da massa por unidade de área (g/m^2) para assegurar uma colagem eficiente e de alta

qualidade (Pereira, 2015). O adesivo deve ser aplicado de forma uniforme sobre a superfície da madeira para garantir a eficiência da colagem. Quantidades insuficientes podem comprometer a qualidade da ligação, enquanto pequenos excessos são toleráveis. No entanto, a aplicação excessiva resulta em desperdício de material e pode causar escorrimientos fora do painel, prejudicando o acabamento e a qualidade do produto final (Chen, 2011).

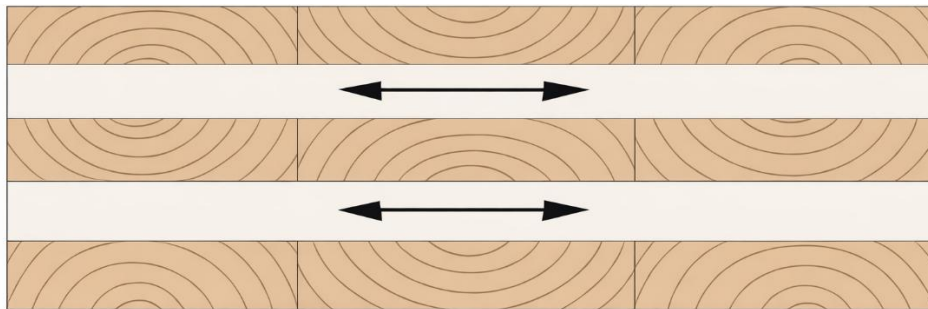
A aplicação do adesivo estrutural deve ser realizada em até 24 horas após o aplainamento das lamelas, garantindo que as superfícies estejam limpas e isentas de substâncias como óleos e graxas, que podem comprometer a penetração e a eficácia da colagem. Os adesivos utilizados no processo de fabricação de MLCC, em sua maioria, curam em temperatura ambiente, eliminando a necessidade de aquecimento das lamelas ou do painel. Essa característica contribui para a eficiência energética do processo, reduzindo o consumo de energia durante essa etapa produtiva (Karacabeyli; Gagnon, 2019; Oliveira, 2019; Silva, 2023). O controle da umidade da madeira é fundamental para garantir a qualidade de colagem do elemento. A colagem da madeira deve ser realizada com teores de umidade entre 6% e 14%. Na ausência de valores mais precisos recomenda-se a umidade de 12%.

3.4.6 Montagem do painel

A montagem das lamelas do painel é uma etapa crucial no processo de fabricação do MLCC, pois envolve a orientação adequada das lamelas em cada camada, de acordo com as classes definidas previamente durante a caracterização da madeira. Essa orientação é planejada para maximizar o desempenho estrutural do painel e garantir sua durabilidade ao longo do tempo (Silva, 2023).

Segundo Pereira (2015), é recomendado que os anéis de crescimento das lamelas sejam orientados de forma "invertida" na camada inferior do painel (Figura10). Essa configuração tem como objetivo reduzir as deformações, como a flecha, que podem ocorrer durante a vida útil da estrutura. Assim, a montagem cuidadosa das camadas é essencial para assegurar tanto a estabilidade dimensional quanto a resistência do painel final.

Figura 10 – Arranjo das lamelas em painel MLCC com orientação cruzada das fibras e alternância dos anéis de crescimento.



Fonte: Adaptado de FPIInnovations (2019).

3.4.7 Prensagem

A prensagem do painel é responsável por garantir a aderência entre as lamelas e a formação de um elemento estrutural sólido e uniforme. Durante esse processo, o painel é submetido a altas pressões, aplicadas de maneira controlada, para promover a colagem eficiente do adesivo (Karacabeyli; Gagnon, 2019).

Dois principais tipos de prensas são utilizadas, dadas por: prensa a vácuo (por membrana flexível) e prensa hidráulica (de pratos rígidos). As mesmas se encontram ilustradas nas Figura 11 e 12, respectivamente.

Figura 11 – Prensa a vácuo por membrana flexível.



Fonte: Adaptado de Silva (2023).

Figura 12 – Prensa hidráulica de pratos rígidos



Fonte: Adaptado de Silva (2023).

Os tempos de montagem e de prensagem são influenciados pela temperatura e umidade ambiente. Durante a prensagem, é recomendável que a temperatura seja mantida acima de 15°C, pois temperaturas mais baixas podem retardar o processo de cura de alguns tipos de adesivos, comprometendo a eficiência da colagem (Karacabeyli; Gagnon, 2019; Pereira, 2015).

Prensas a vácuo operam com pressões de até 0,1 MPa, enquanto que as prensas hidráulicas podem atingir pressões entre 0,1 e 1,0 MPa (Pereira, 2015; Oliveira, 2018). Adesivos à base de melamina e fenol requerem pressões de até 2,0 MPa para uma colagem eficiente, enquanto os adesivos de poliuretano são eficazes com pressões de até 1,0 MPa (Oliveira, 2018).

3.4.8 Acabamento e controle da qualidade.

Após a etapa anterior, os painéis recebem os acabamentos, ou seja, são lixados ou aplainados, para em seguida serem embalados e então transportados. O acabamento superficial do painel de MLCC é realizado com o auxílio de lixadeiras industriais, similares às utilizadas em contraplacados, garantindo um acabamento uniforme e preciso, com tolerância de até 0,1 mm. Já o corte de esquadrejamento final do painel, assim como as aberturas para portas e janelas, pode ser feito em máquinas de comando numérico computadorizado (CNC), que utilizam plataformas avançadas para assegurar alta precisão e eficiência no processo (Pereira, 2015; Silva, 2023).

O controle de qualidade no processo de produção do MLCC é uma etapa fundamental para garantir a eficiência estrutural e a confiabilidade do material. Esse

processo inclui a retirada de amostras de algumas placas produzidas, que são submetidas a análises detalhadas para avaliar a qualidade da colagem e verificar as propriedades físico-mecânicas, como resistência e estabilidade. Essas inspeções asseguram que os painéis atendam aos padrões técnicos exigidos, garantindo seu desempenho em aplicações estruturais e contribuindo para a durabilidade e segurança das construções. (Karacabeyli; Gagnon, 2019; Silva, 2023)

Devido ao elevado nível de pré-fabricação, as aberturas para portas, janelas, canaletas para passagem de eletrodutos e componentes hidráulicos são incorporadas com alta precisão nos painéis de MLCC diretamente na fábrica (Kuilen *et al.*, 2011), conforme ilustrado na Figura 13.

Figura 13 – Aberturas realizadas na fábrica.



Fonte: Costa (2013).

3.4.9 Identificação do produto, embalagem e despacho.

A etapa final do processo de produção do MLCC consiste na identificação do produto, que inclui a aplicação do logo do fabricante e informações técnicas, como dimensões, recomendações de uso e locais indicados para a fixação de conectores. Em seguida, os painéis são embalados de forma a minimizar a troca de umidade com o ambiente, preservando suas propriedades físico-mecânicas até a entrega. Por fim, os produtos são despachados para o canteiro de obras, garantindo que cheguem ao destino em perfeitas condições para aplicação (Silva, 2023).

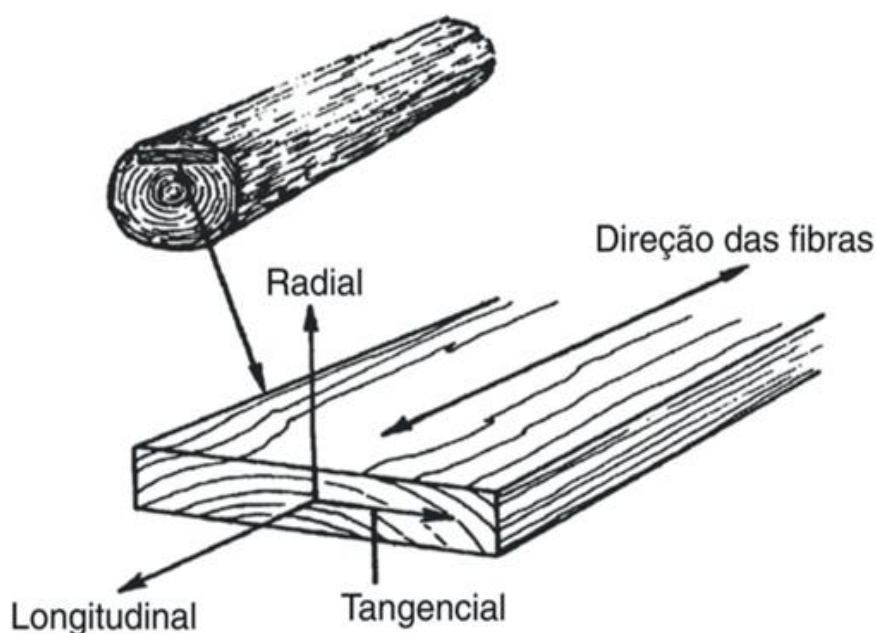
Durante o transporte e despacho dos painéis, é essencial que eles sejam protegidos contra umidade e calor excessivo, a fim de preservar suas propriedades físico-mecânicas. Essa proteção deve ser mantida não apenas durante o transporte e

a entrega, mas também ao longo do armazenamento e da execução da obra (Pereira, 2015).

3.5 ANISOTROPIA NA MADEIRA E EFEITO *ROLLING SHEAR*

A madeira é um material com comportamento anisotrópico devido à sua composição estrutural. Esse comportamento é atribuído ao alinhamento das fibras ao longo da direção longitudinal, que conferem maior resistência e rigidez nessa direção (Sousa, 2012). No entanto, para simplificação em estudos e aplicações práticas, a madeira é frequentemente tratada como um material ortotrópico, com três direções principais ortogonais entre si. A direção Longitudinal (L) corresponde ao alinhamento das fibras ou dos traqueídeos, característica das espécies do gênero *Pinus*. A direção Tangencial (T) é tangente aos anéis de crescimento, enquanto a direção Radial (R) é perpendicular a esses anéis. Essas três direções principais definem os planos característicos da madeira e ajudam a compreender suas propriedades mecânicas, especialmente nos estudos sobre resistência e rigidez (Bodig; Jayne, 1982; Calil Jr. *et al.*, 2003; Galvão; Jankowsky, 1985; Shackelford, 1996). A Figura 14 ilustra essas direções em uma peça de madeira serrada, destacando a relação entre os anéis de crescimento e as fibras.

Figura 14 – Direções principais da madeira.

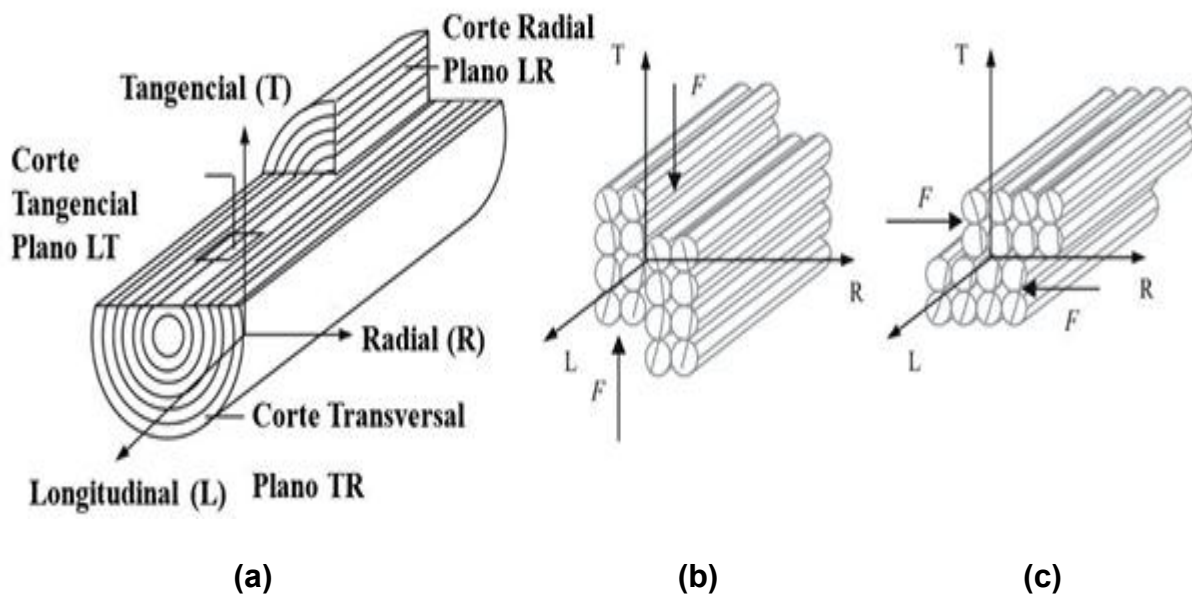


Fonte: Calil Junior *et al.* (2019).

A madeira, quando submetida a tensões tangenciais em planos transversais, apresenta o fenômeno conhecido como *rolling shear* (Wu *et al.*, 2021). Esse efeito ocorre principalmente nas direções Radial (R) e Tangencial (T), que são denominadas como direções perpendiculares às fibras, apesar dessas direções apresentarem propriedades mecânicas diferentes (Criado *et al.*, 2024; Glasner *et al.*, 2023). Nos estudos práticos, são definidos três planos principais: longitudinal-radial (LR), longitudinal-tangencial (LT) e radial-tangencial (RT), conforme mostrado na Figura 14a. Em elementos estruturais compostos, como os painéis de MLCC, tensões cisalhantes são geradas nas camadas transversais quando esses painéis são submetidos à flexão unidirecional (Glasner *et al.*, 2023; Sandoli; Calderoni, 2020).

A Figura 15 ilustra os eixos principais do tronco (a), a aplicação de forças na direção tangencial (b) e na direção radial (c), evidenciando como os planos LR, LT e RT se relacionam com o *rolling shear*. Essas representações são fundamentais para compreender os planos de cisalhamento predominantes e o comportamento mecânico da madeira em situações de carregamento complexo (Ehrhart; Brandner, 2018).

Figura 15 – Eixos principais do tronco e planos de *rolling shear*: (a) Representação dos planos principais da madeira (LT, LR e TR). (b) Aplicação de força na direção tangencial (T). (c) Aplicação de força na direção radial (R).



Fonte: Adaptado de Ehrhart; Brandner (2018).

O efeito *rolling shear* na madeira maciça pode ser entendido como a tendência das fibras de "rolar" sob tensões tangenciais ao longo dos planos radial-tangencial (RT) ou tangencial-radial (TR) (Cao *et al.*, 2019). Esse efeito promove o deslizamento entre as fibras no plano transversal sem causar uma ruptura completa, como ilustrado nas Figuras 14b e 14c. A consideração do *rolling shear* é especialmente relevante em elementos de placas, onde o fluxo de esforços internos não está alinhado com a direção das fibras principais. Já em elementos reticulados, como vigas e pilares, a direção principal dos esforços coincide com a orientação longitudinal das fibras, tornando o efeito menos significativo (Lum *et al.*, 2022; Sandoli; Calderoni, 2020).

O *rolling shear* é um fenômeno crítico para a resistência e a rigidez de elementos estruturais da MLCC. Esse efeito ocorre devido ao comportamento anisotrópico da madeira, que apresenta resistência significativamente menor ao cisalhamento no plano radial-tangencial em comparação com sua resistência na direção longitudinal (Frangi *et al.*, 2004). Esse fenômeno tem sido amplamente estudado, uma vez que pode limitar a capacidade de carga dos painéis, especialmente em aplicações estruturais como lajes e vigas de edifícios de múltiplos pavimentos (Gagnon; Pirvu, 2011).

Além disso, o módulo de elasticidade transversal relacionado ao *rolling shear* (G_{vt}) é consideravelmente menor que os módulos de elasticidade transversal GLR ou GLT (identificados por G_0), sendo da ordem de 10%, ou seja, $G_{vt} = 0,10G_0$. Por esse motivo, os deslocamentos devido à cortante não podem ser ignorados em elementos de MLCC sujeitos ao *rolling shear* (Vilela, 2020). Este fenômeno também pode influenciar a resistência máxima do elemento estrutural, afetando diretamente o módulo de ruptura na flexão (MOR). Quando a ruptura é desencadeada pelo *rolling shear*, a capacidade de resistência máxima é atingida no ponto onde a tensão de cisalhamento é mais crítica (Bahmanzad *et al.*, 2020; Rahman *et al.*, 2020). É ilustrado na Figura 16 um corpo de prova flexionado com ruptura devido ao efeito *rolling shear*.

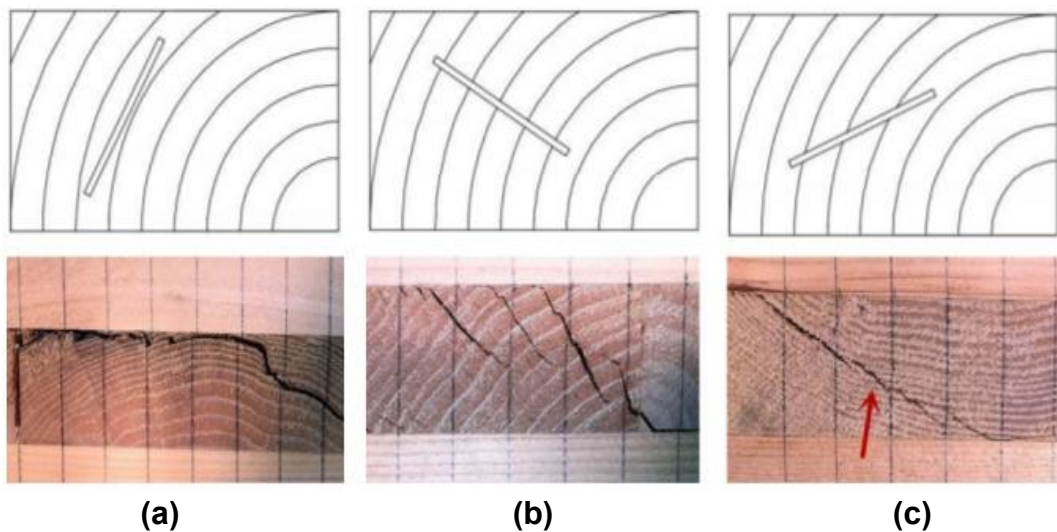
Figura 16 – Falha por *rolling shear* em um corpo de prova de MLCC submetido à flexão.



Fonte: Zhou *et al.*, 2014

Conforme Nie (2015), a ruptura associada ao efeito *rolling shear* pode apresentar diferentes padrões de propagação em relação aos anéis de crescimento da madeira. A fratura pode ocorrer de forma tangencial aos anéis de crescimento (Figura 17a), perpendicular a eles (Figura 17b) ou inclinada em relação aos mesmos (Figura 17c). A ocorrência de cada tipo de ruptura está relacionada às características específicas do lenho inicial e à resistência dos raios da madeira.

Figura 17 – Modos de ruptura associados ao efeito *rolling shear*: (a) Ruptura tangencial aos anéis de crescimento. (b) Ruptura perpendicular aos anéis de crescimento. (c) Ruptura inclinada em relação aos anéis de crescimento.



Fonte: Adaptado de Nie (2015).

O avanço do MLCC como material estrutural sustentável tem impulsionado estudos sobre esse modo de falha, visando otimizar o desempenho mecânico dos painéis e permitir maior segurança e eficiência nos projetos (Wang *et al.*, 2021). O interesse na utilização de madeiras de florestas plantadas e espécies nativas em diferentes regiões do mundo, incluindo o Brasil, levou ao desenvolvimento de novas metodologias para avaliar a influência da composição do MLCC em sua resistência ao *rolling shear* (Silva, 2023).

O *rolling shear* em painéis MLCC é influenciado por diversas características estruturais e de fabricação. A orientação dos anéis de crescimento é um dos fatores mais significativos, como destacado por Wang; Yin, (2021). Os autores observaram que a inclinação dos anéis afeta significativamente o módulo de elasticidade transversal (G_{vt}). No estudo realizado por Ukyo *et al.*, (2019), o qual utilizou análises numéricas e experimentais, foi demonstrado que o padrão dos anéis de crescimento impacta significativamente a rigidez e a resistência ao cisalhamento em painéis de MLCC. Em particular, o módulo de elasticidade transversal aumentou com a largura da lamela e varia de acordo com a distância radial em relação ao centro da madeira (*pith*). Esses resultados foram corroborados por Ehrhart; Brandner, (2018), e Aicher *et al.*, (2016), destacando a forte relação entre o padrão dos anéis de crescimento G_{vt} .

Outro aspecto importante é a presença de nós nas lamelas. Kumar *et al.*, (2022) observaram que os nós nas camadas transversais dos elementos podem melhorar as propriedades do *rolling shear*. Cao *et al.*, (2019) verificaram que tanto nós rígidos quanto nós soltos resultaram em resistências superiores ao *rolling shear* em comparação com amostras sem nós.

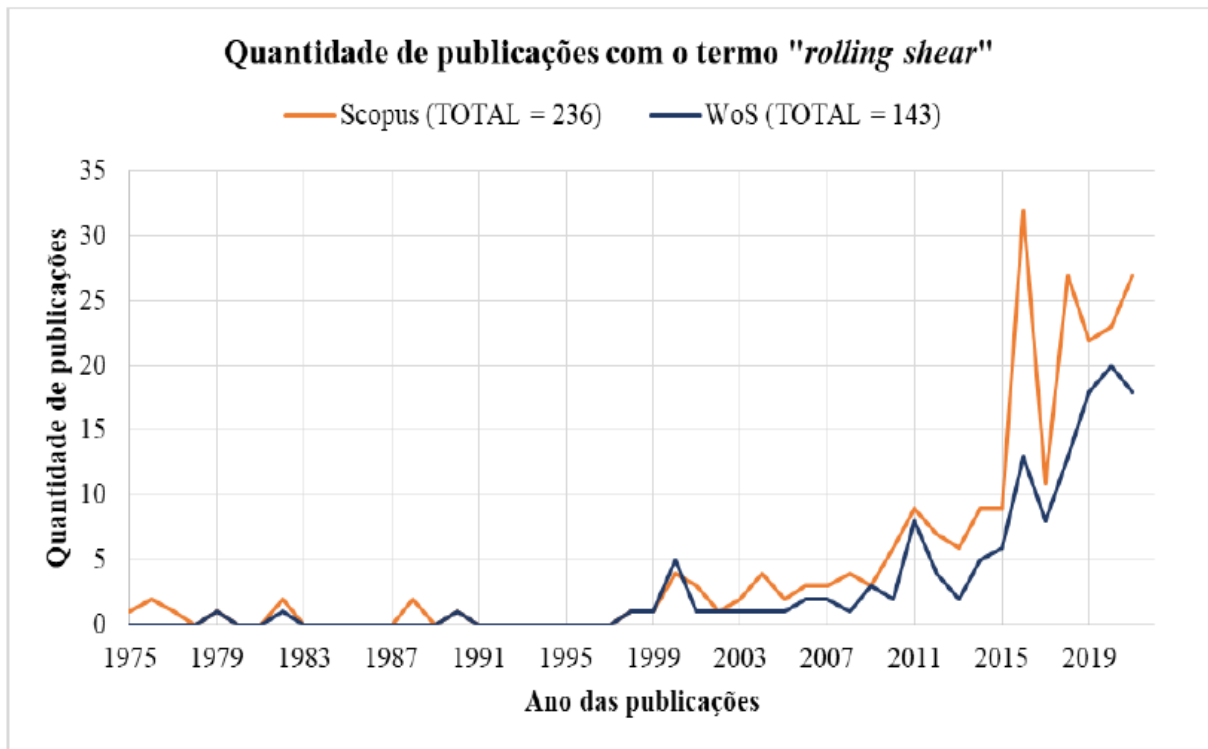
As condições de fabricação, como espaçamento lateral das lamelas e a pressão de prensagem, também têm papel fundamental. (Gardner *et al.*, 2020) relataram que o aumento no espaçamento lateral das lamelas inicialmente melhora o módulo de elasticidade transversal G_{vt} até atingir um espaçamento de 89 mm; após esse ponto, ocorre uma redução abrupta na rigidez. Além disso, o espaçamento maior reduz a resistência ao *rolling shear*, como também observado por Wang *et al.*, (2018). Silva (2023) investigou os efeitos da pressão de colagem na fabricação de elementos de MLCC utilizando diferentes espécies de madeira. O autor analisou cinco níveis de pressão, que variaram de 0,1 MPa a 1,3 MPa, e concluiu que a pressão de 0,7 MPa foi a mais eficaz para melhorar a resistência ao cisalhamento na linha de cola, com desempenho superior em comparação com os outros níveis de pressão testados.

Outro fator relevante é o parâmetro de lamelação (γ), que se refere à relação entre a largura e a espessura das lamelas. Segundo ANSI/APA PRG 320 (2018), um valor mínimo de $\gamma = 3,5$ é necessário para painéis sem colagem lateral, sendo que $\gamma = 4$ é recomendado para garantir melhor superfície de contato durante a prensagem e maior resistência ao *rolling shear*. Ehrhart; Brandner, (2018), Li *et al.*, (2019), e Sun *et al.*, (2022) confirmaram que maiores valores de γ estão associados a aumentos na resistência última e no módulo de elasticidade transversal.

A resistência ao *rolling shear* também depende da espécie de madeira utilizada na fabricação do MLCC. Em países europeus, onde a produção do material é consolidada, a madeira de *Picea abies* (*espruce*) tem sido amplamente utilizada devido à sua uniformidade e boa relação entre resistência e peso (Rahman *et al.*, 2020). No Brasil, há um crescente interesse em espécies de madeiras plantadas, como *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliottii*, devido ao seu rápido crescimento e boas propriedades mecânicas (Pereira, 2014). No entanto, pesquisas indicam que madeiras folhosas tendem a apresentar maior resistência ao *rolling shear* do que as coníferas, devido à sua estrutura anatômica mais densa (Silva, 2023). Esses resultados ressaltam a complexa interação entre as características geométricas, materiais e de fabricação que afetam o comportamento do *rolling shear* em painéis de MLCC.

Ao longo do tempo, a crescente preocupação com as pesquisas sobre *Rolling shear* tem se tornado evidente, como demonstrado no levantamento bibliográfico realizado por Silva (2023), onde a Figura 18 ilustra a evolução do número de trabalhos publicados com o termo “*rolling shear*”. Com o avanço das investigações e o desenvolvimento de novas metodologias de fabricação, espera-se que os efeitos desse fenômeno possam ser reduzidos, possibilitando um uso mais eficiente do MLCC em edificações de grande porte (Miotto, 2023). Estratégias como a otimização da disposição das lamelas e a aplicação de adesivos estruturais de alto desempenho têm o potencial de melhorar significativamente o comportamento mecânico desses painéis (Silva, 2023). Além disso, o aprimoramento de técnicas numéricas avançadas pode proporcionar previsões mais precisas sobre o desempenho estrutural do MLCC, contribuindo para um dimensionamento mais seguro e uma tomada de decisão mais eficaz por parte dos projetistas (Wang *et al.*, 2021).

Figura 18 – Total de publicações em bases de dados com o termo “*rolling shear*”.



Fonte: Adaptado de Silva (2023).

A compreensão do *rolling shear* e seu impacto no desempenho estrutural dos painéis de MLCC é essencial para garantir a segurança e a durabilidade das edificações que utilizam esse material (Sciomenta *et al.*, 2022). Estudos combinando ensaios experimentais, modelagem numérica e abordagens analíticas têm permitido avanços significativos na previsão e mitigação desse fenômeno, proporcionando melhorias substanciais na confiabilidade e no desempenho mecânico do MLCC (Glasner *et al.*, 2023; Li, 2017). No entanto, desafios ainda persistem, especialmente no que se refere à normatização e à padronização dos métodos de ensaio para diferentes tipos de madeira e configurações estruturais (Kumar *et al.*, 2022). Assim, a continuidade das pesquisas nessa área é fundamental para consolidar o MLCC como uma alternativa viável e sustentável para a construção civil global.

3.6 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DO *ROLLING SHEAR*

Os métodos de avaliação do *rolling shear* são fundamentais para compreender o comportamento mecânico dos painéis de MLCC e otimizar seu desempenho estrutural. Essas abordagens incluem métodos experimentais,

numéricos e analíticos, cada um com suas vantagens e limitações (Aicher *et al.*, 2016; Gardner *et al.*, 2020).

Esses métodos, possibilitam uma avaliação abrangente e confiável do *rolling shear*, sendo fundamentais tanto para o desenvolvimento de painéis de MLCC mais eficientes quanto para a melhoria das práticas de engenharia estrutural (Lum *et al.*, 2022; Sandoli; Calderoni, 2020). Nos itens seguintes, serão apresentados detalhes sobre os ensaios experimentais e numéricos aplicados na avaliação do *rolling shear*.

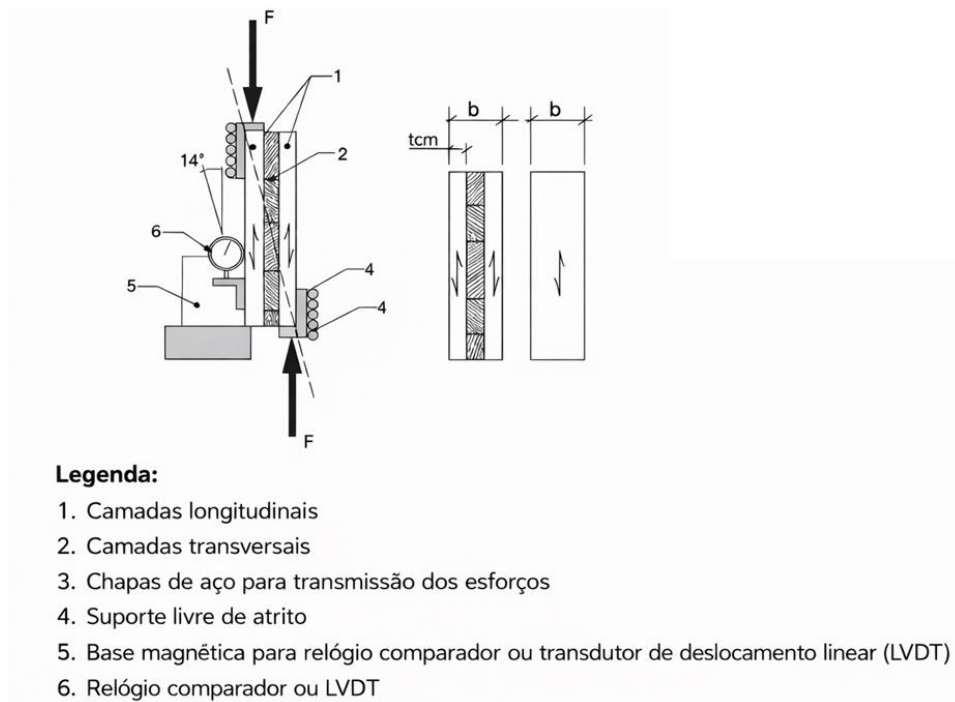
3.6.1 Métodos experimentais

Os ensaios experimentais são amplamente utilizados para caracterizar o comportamento do *rolling shear*, fornecendo dados empíricos essenciais para a validação de modelos e para a elaboração de normas técnicas. Esses métodos permitem observar diretamente os efeitos do cisalhamento transversal em diferentes condições, como variações de orientação dos anéis de crescimento, presença de nós e qualidade da colagem. (Glasner *et al.*, 2023; Kumar *et al.*, 2022; Li, 2017; Shahnewaz *et al.*, 2023).

Dentre as técnicas laboratoriais mais empregadas, destacam-se os testes de cisalhamento direto, que permitem determinar a resistência ao cisalhamento no plano das camadas transversais. Conforme a ABNT NBR 7190-7 (2022), o método para o ensaio de cisalhamento consiste na aplicação de forças verticais em corpos de prova posicionados verticalmente, os quais são confeccionados, conforme ilustrado na Figura 19. Esse método exige atenção especial ao comprimento do corpo de prova, que deve ser calculado com base na espessura, a fim de garantir a inclinação correta durante o ensaio. Além disso, a largura do corpo de prova deve ser de no mínimo 100 milímetros, assegurando condições adequadas para a realização do teste.

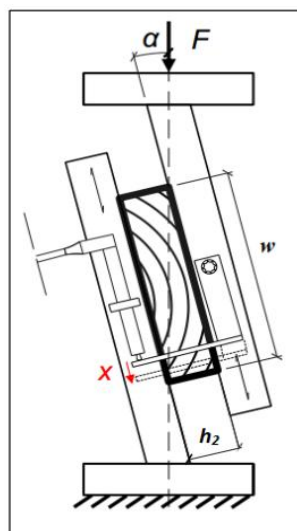
Outras configurações de ensaio podem ser utilizadas para obter essa propriedade, conforme pode ser observado na configuração de ensaio por pratos colados, especificada pela ASTM D2718 (2018) e ilustrada na Figura 20. Nesse método, o ângulo de inclinação do corpo de prova (α) é de 14° , enquanto x representa a direção do deslocamento causado pela aplicação da força (F). Essa configuração oferece uma alternativa para avaliar as propriedades de cisalhamento, garantindo precisão nos resultados obtidos.

Figura 19 – Configuração do ensaio de cisalhamento para obtenção do *rolling shear*, conforme a Norma ABNT NBR 7190-7:2022.



Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190-7:2022.

Figura 20 – Configuração de ensaio por pratos colados para determinação da rigidez e resistência ao *rolling shear* de madeiras maciças, conforme especificada pela Norma ASTM D2718 (2018).



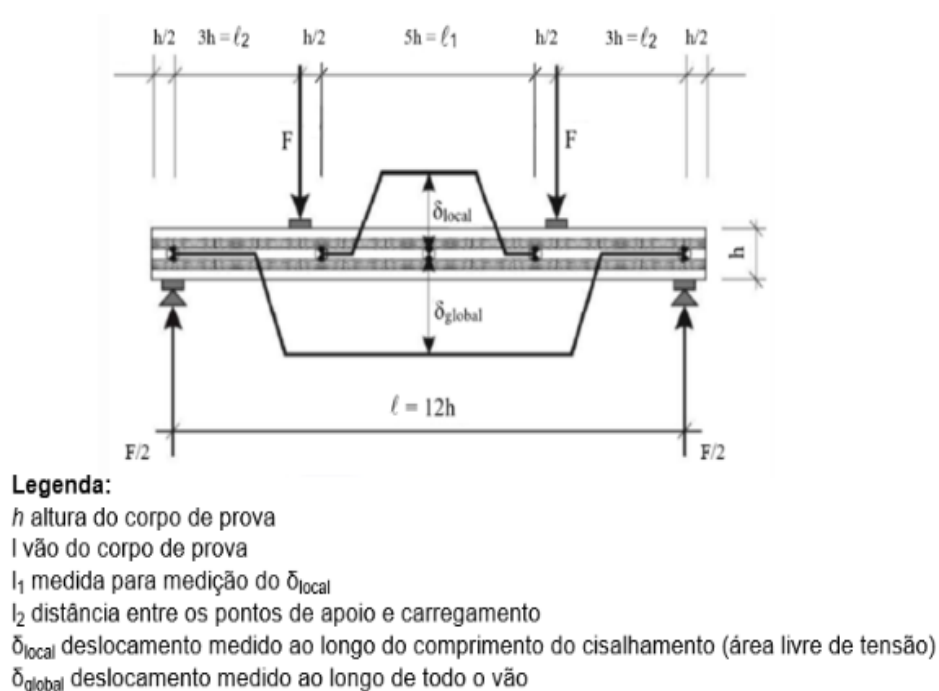
Fonte: Adaptado de Ehrhart; Brandner, (2018).

Maneiras alternativas de se medir os parâmetros relacionados ao *rolling shear* devem ser pesquisadas, especialmente pelo fato de que o método por pratos

colados exigir alto tempo de ensaio e empenho devido à colagem e a limpeza dos pratos metálicos, além de grande variabilidade nos resultados obtidos (WANG *et al.*, 2018).

Outra forma de obter as propriedades de *rolling shear* é por meio de ensaios de flexão com uso de galgas metálicas, conforme descrito pela ABNT NBR 7190-7:2022. Esses ensaios permitem determinar a rigidez ao cisalhamento (G_{vt}) e a resistência ao cisalhamento transversal (f_{vt}) em painéis de MLCC. A configuração do ensaio e a aplicação da carga podem seguir as disposições ilustradas na Figura 21, utilizando uma taxa de carregamento especificada. Esse método avalia tanto a resistência quanto a rigidez ao cisalhamento, considerando o módulo de cisalhamento transversal e a força resistente ao cisalhamento em diferentes direções do painel.

Figura 21 – Configuração para determinação da resistência e rigidez ao cisalhamento transversal (*rolling shear*), pela norma ABNT 7190-7:2022.



Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190-7:2022.

Silva (2023) utilizou o ensaio de flexão com vão variável como um dos métodos para determinar a resistência e a rigidez ao *rolling shear* em elementos de MLCC. Esse ensaio é baseado na norma americana ASTM D198 – 15, que estabelece procedimentos para a avaliação das propriedades mecânicas da madeira e produtos

derivados. De acordo com os resultados obtidos, os valores obtidos para a rigidez ao *rolling shear* (G_{vt}) e resistência ao *rolling shear* (f_{vt}) no ensaio de vão variável foram comparados aos resultados de outros ensaios (como o de cisalhamento vertical e cisalhamento inclinado). Entre os métodos experimentais analisados, o ensaio de flexão com vão variável demonstrou resultados consistentes e alinhados à literatura, indicando sua viabilidade para a avaliação das propriedades relacionadas ao *rolling shear*. Embora o ensaio de vão variável não forneça exatamente o valor de rigidez ao *rolling shear* (G_{vt}) e sim o valor do módulo de cisalhamento transversal (G_0) este fornece valores mais representativos que o método de flexão apresentado na Figura 22 segundo a ABNT NBR 7190-7 (2022).

3.6.2 Valores de G_{vt} e f_{vt} reportados na literatura

Nesta seção serão apresentados valores de G_{vt} e f_{vt} apresentados por diferentes autores.

3.6.2.1 Valores de G_{vt}

Diversos autores têm se dedicado à caracterização da rigidez transversal em painéis de madeira lamelada colada cruzada, com foco na influência da espécie de madeira e de sua densidade. Os estudos indicam que os valores dessa propriedade variam amplamente, refletindo as características intrínsecas de cada material. Wang *et al.* (2017) reportaram um valor de G_{vt} igual a 84,92 MPa para a combinação de espécies conhecidas como SPF (spruce-pine-fir ou espruce-pinus-abeto), enquanto Wang *et al.* (2018b), avaliando o mesmo grupo com densidade de 470 kg/m³, encontraram valores mais elevados, entre 104 MPa e 126 MPa.

Aicher, Christian e Hirsch (2016), ao analisarem a madeira *Picea abies* (abeto), observaram rigidez variando entre 40 MPa e 60 MPa, para densidades entre 450 kg/m³ e 540 kg/m³. Ehrhart *et al.* (2015) também avaliaram essa mesma espécie, obtendo 100 MPa com densidade de 439 kg/m³. Para a madeira *Populus tremula L.* (popularmente conhecida como choupo), foi registrado um valor de 127 MPa, com densidade de 463 kg/m³. Já para o *Pinus Linnaeus.*, foi identificado 158 MPa,

associado a uma densidade de 521 kg/m³; e para a *Betula Linnaeus* (bétula), o valor atingiu 188 MPa, com densidade de 612 kg/m³.

Zhou *et al.* (2014), ao estudarem a espécie *Picea mariana* (abeto negro), relataram valores significativamente mais elevados, variando de 255 MPa a 313 MPa, com densidades entre 459 kg/m³ e 534 kg/m³. Espécies de maior densidade, como *Fagus sylvatica* (faia) e *Fraxinus L.* (freixo), apresentaram rigidez ainda mais elevada. Ehrhart *et al.* (2015) encontraram valores de 357 MPa para a *Fagus sylvatica* (720 kg/m³) e de 401 MPa para o *Fraxinus L.* (798 kg/m³). Em estudo complementar, Aicher, Christian e Hirsch (2016) também analisaram a *Fagus sylvatica*, observando valores de rigidez G_{vt} entre 400 MPa e 500 MPa, para densidades variando de 650 kg/m³ a 760 kg/m³.

3.6.2.2 Valores de f_{vt}

De forma análoga, diversos autores também têm se dedicado ao estudo da resistência ao cisalhamento transversal em painéis de MLCC, com foco na influência da espécie, da densidade da madeira e das condições de colagem. Assim como ocorre com a rigidez transversal, os valores dessa propriedade apresentam variações significativas, refletindo a diversidade de materiais e metodologias empregadas nas investigações experimentais.

Para as madeiras do grupo SPF (spruce-pine-fir), Wang *et al.* (2017) identificaram resistência f_{vt} de 1,41 MPa, enquanto Wang *et al.* (2018b) reportaram variação entre 1,15 MPa e 1,52 MPa, com densidade de 470 kg/m³. Li (2015) obteve valores entre 1,23 MPa e 1,68 MPa para a mesma combinação de espécies, e Lam, Li e Li (2016) apresentaram um valor superior, de 3,86 MPa. No caso da espécie *Picea abies* (abeto), Aicher, Christian e Hirsch (2016) relataram resistência de 4,2 MPa, enquanto Ehrhart *et al.* (2015) encontraram 1,88 MPa, e Fink, Kohler e Brandner (2018) observaram valores entre 1,01 MPa e 1,61 MPa, com densidade variando entre 430 kg/m³ e 492 kg/m³.

Para outras espécies, Ehrhart *et al.* (2015) obtiveram 2,88 MPa para *Populus tremula L.* (populus), 2,29 MPa para *Pinus L.*, 3,45 MPa para *Betula L.* (bétula) e 5,57 MPa para *Fraxinus L.* (freixo), cuja densidade foi de 798 kg/m³. Zhou *et al.* (2014) identificaram, para a espécie *Picea mariana* (abeto negro), valores entre 1,19 MPa e 1,61 MPa, com densidade variando entre 459 kg/m³ e 534 kg/m³.

Espécies de maior densidade apresentaram resistências significativamente mais elevadas. Franke (2016) relatou 3,8 MPa para *Fagus sylvatica* (faia), enquanto Ehrhart *et al.* (2015) encontraram 5,37 MPa para a mesma espécie com densidade de 720 kg/m³. Em estudo complementar, Aicher, Christian e Hirsch (2016) verificaram valores entre 3,2 MPa e 5,7 MPa para a faia, com densidades entre 650 kg/m³ e 760 kg/m³.

É importante destacar que os valores de rigidez e resistência ao cisalhamento transversal reportados na literatura referem-se, em sua maioria, a painéis de MLCC com defasagem de 90° entre as camadas adjacentes, configuração amplamente utilizada tanto em aplicações comerciais quanto em investigações acadêmicas.

Embora alguns estudos mais recentes tenham explorado arranjos alternativos, com camadas dispostas em ângulos distintos, como 30° ou 45°, esses trabalhos têm se concentrado, em geral, na avaliação do desempenho global dos painéis em flexão ou compressão, não apresentando valores diretos ou específicos relacionados à rigidez ou resistência ao cisalhamento transversal. Assim, permanece a necessidade de ampliar o escopo das pesquisas com foco explícito nas propriedades transversais, especialmente em configurações não ortogonais, de modo a compreender melhor o impacto da orientação das lamelas no fenômeno de *rolling shear*. A seguir, se apresentam esses estudos alternativos.

3.7 ESTUDOS COM CONFIGURAÇÕES ALTERNATIVAS DE PAINÉIS MLCC

Buck e Hagman (2018) investigaram o desempenho estrutural de painéis de MLCC confeccionados com a espécie *Picea abies* (abeto), cuja densidade média dos elementos utilizados foi de 420 kg/m³. O estudo teve como foco a produção e o comportamento mecânico à compressão no plano de painéis de MLCC com camadas transversais inclinadas a 45°, em contraste com a configuração convencional de 90°. Para isso, os autores fabricaram e testaram painéis de cinco camadas em duas configurações: 0°/90°/0°/90°/0° (convencional) e 0°/±45°/0°/∓45°/0° (alternativa) (Figura 22).

Figura 22 – Esquema da configuração de um painel MLCC desenvolvido por Buck e Hagman com camadas de 45° e 90° intercaladas com camadas a 0°.



Fonte: Buck e Hagman (2018).

Os ensaios de compressão permitiram avaliar a rigidez (módulo de elasticidade) e a resistência à compressão no plano dos painéis. Para a configuração ortogonal (90°), os autores obtiveram valores médios de rigidez à compressão de 5533,0 MPa e resistência à compressão de 26,3 MPa. Já na configuração com camadas inclinadas a $\pm 45^\circ$, os valores foram superiores, com rigidez média à compressão de 7167,2 MPa e resistência média à compressão de 30,2 MPa. Considerando os valores característicos (percentil 5%), a configuração $\pm 45^\circ$ apresentou um aumento de aproximadamente 42% na rigidez à compressão e 33% na resistência à compressão, em comparação à configuração convencional. Esses resultados demonstram que a orientação inclinada das camadas transversais contribui significativamente para o aumento da eficiência mecânica dos painéis sob carregamento de compressão no plano.

Haftkhani e Hematabadi (2022) investigaram o impacto da *orientação das camadas na resistência à flexão de painéis de MLCC confeccionados com Populus deltoides L.* (choupo). A densidade da madeira utilizada foi de 0,38 g/cm³ (equivalente a 380 kg/m³) e os painéis foram produzidos com três camadas de lamelas, cada uma com 16 mm de espessura. No total, foram fabricadas cinco configurações distintas: 0/30/0, 0/45/0, 0/90/0, 45/0/45 e 45/45/45. Os autores realizaram ensaios de flexão fora do plano, conforme a norma ASTM D198, avaliando o módulo de elasticidade aparente (MOE_{app}) e o módulo de ruptura (MOR) tanto no eixo principal quanto secundário. Os melhores resultados foram obtidos para a configuração 0/30/0, que apresentou MOE_{app} de 7988 MPa e MOR de 65,4 MPa no eixo principal. No eixo secundário, o maior valor de MOE_{app} foi registrado na configuração 45/45/45, atingindo

1146 MPa, enquanto o MOR mais elevado foi obtido na configuração 90/0/90, com 13,0 MPa. As demais configurações apresentaram variações de desempenho coerentes com a orientação das fibras, sendo observada tendência de redução das propriedades mecânicas à medida que o ângulo das lamelas se afastava da direção longitudinal.

O trabalho de Santos *et al.* (2024) apresenta um novo tipo de painel de MLCC alternada (aMLCC), que difere dos painéis tradicionais de MLCC ao substituir as camadas cruzadas por camadas híbridas. Nessas camadas híbridas, as lamelas foram organizadas de maneira alternada entre lamelas cruzadas e lamelas alinhadas na mesma direção da fibra da madeira (Figura 23), semelhante ao conceito de *Glued Laminated Timber* (GLT).

Figura 23 – Protótipo do painel MLCC desenvolvido por Santos: (a) Lamelas cruzadas; (b) Camada híbrida de montagem de camada cruzada; (c) Painel de 3 camadas



(a)



(b)



(c)

Fonte: Adaptado de P. Santos *et al.*, (2024).

Os painéis foram produzidos com duas espécies: *Pinus pinaster*, com densidade média de 677 kg/m³, e *Acacia melanoxylon*, com densidade média de 552 kg/m³. Os autores realizaram ensaios experimentais de cisalhamento de acordo com as normas EN 789 e EN 16351, a fim de determinar diretamente o módulo de cisalhamento e a resistência ao cisalhamento dos painéis. Os resultados mostraram que os painéis de MLCC de *Pinus pinaster* apresentaram valores de G_{vt} variando entre 394 MPa e 890 MPa, e f_{vt} entre 4,3 MPa e 4,8 MPa. Para os painéis confeccionados com *Acacia melanoxylon*, os valores de G_{vt} ficaram entre 464 MPa e 553 MPa, e f_{vt} entre 3,5 MPa e 4,3 MPa. Como referência, os painéis MLCC convencionais de *Pinus pinaster* testados no estudo apresentaram módulo de cisalhamento médio de 252 MPa e resistência de 3,85 MPa.

3.8 MÉTODOS DE CÁLCULO PARA ELEMENTO DE MLCC NA FLEXÃO

Os métodos analíticos são essenciais para avaliar o comportamento estrutural de painéis de MLCC, para prever seu desempenho mecânico para os ELU e ELS. O Método Gama é o método disponibilizado pela ABNT NBR 7190-1 (2022) para a avaliação de elementos de MLCC e considera a teoria de vigas de Euler Bernoulli, ou seja, somente efeitos de flexão são considerados na medida dos deslocamentos. Outros métodos analíticos também são propostos na literatura para a avaliação de elementos de MLCC na flexão. O Método K avalia a interação entre camadas, oferecendo uma visão integrada do desempenho estrutural. Já o Método de Analogia de Cisalhamento, ou Método de Kreuzinger, utiliza sistemas simplificados para analisar deformações e efeitos de *rolling shear*, sendo uma ferramenta eficiente na otimização de projetos de MLCC (Gagnon e Popovski, 2011; FPInnovations, 2011; Pereira, 2015; Silva, 2023).

3.8.1 Método Gama

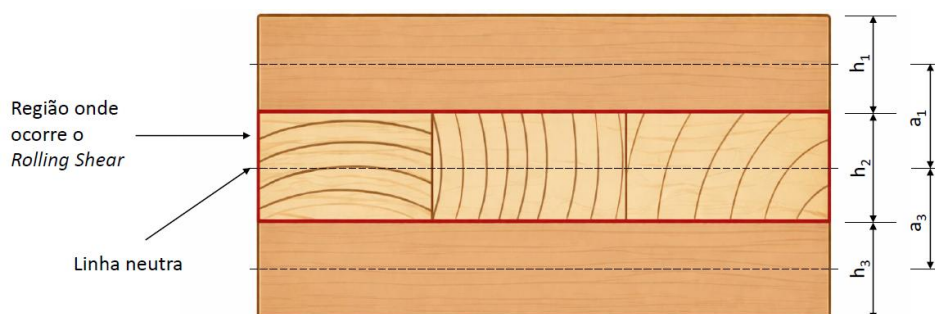
O Método Gama é uma abordagem analítica amplamente utilizada para avaliar o comportamento estrutural de elementos compostos e foi ajustado para o cálculo de painéis de MLCC submetidos à flexão. Esse método considera as camadas longitudinais do painel como elementos lineares conectados às camadas transversais como se fossem conexões distribuídas continuamente, fornecendo rigidez ao

cisalhamento. A eficiência dessas conexões é representada pelo fator γ (gama), que varia de 0 a 1, indicando o grau de interação entre as camadas; um valor de γ igual a 1 sugere uma conexão perfeita, enquanto γ igual a 0 implica ausência de ação conjunta entre as camadas longitudinais (Pereira; Calil Junior, 2019).

Uma das principais vantagens do Método Gama é sua simplicidade, permitindo a análise de painéis de MLCC utilizando a teoria de vigas de Bernoulli-Euler. Nesse sentido, este método apresenta limitações, como a suposição de que as deformações por cisalhamento nas camadas longitudinais são desprezíveis e a dependência da rigidez efetiva à flexão em relação ao comprimento do vão, tornando-o dependente do sistema. Além disso, o Método Gama é mais adequado para painéis com até cinco camadas totais; para configurações mais complexas, métodos estendidos ou análises numéricas podem ser mais apropriados (Christovasilis et al., 2016; C. Huber; Deix, 2021).

O método considera que as lamelas orientadas longitudinalmente são as principais responsáveis pela resistência aos esforços normais decorrentes do carregamento, enquanto a lamela orientada transversalmente atua como um meio deformável ao cisalhamento, permitindo o deslizamento relativo entre as camadas longitudinais (Figura 24). Esse comportamento é mecanicamente análogo ao de uma viga em seção “I” com ligação semirrígida entre a mesa e a alma, na qual o deslizamento relativo entre os componentes estruturais é controlado pela rigidez dos conectores. Dessa forma, a deformação associada ao efeito de *rolling shear* na camada transversal é modelada, por analogia, como o deslizamento de conectores mecânicos semirrígidos distribuídos ao longo da interface entre as camadas.

Figura 24 – Representação esquemática do comportamento ao *rolling shear* em um elemento de MLCC de três camadas, destacando a lamela transversal como meio deformável ao cisalhamento e a linha neutra da seção.



Fonte: Adaptado de Pereira (2019).

A determinação da rigidez ao cisalhamento transversal (G_{vt}) pelo Método Gama inicia-se com o cálculo das distâncias entre os centroides das camadas superior e inferior em relação à linha neutra do painel, além da definição das áreas das seções transversais envolvidas.

Considerando um painel de três camadas, para simplificar o entendimento, tem-se que a posição do centroide da camada superior em relação à linha neutra (a_1) e da camada inferior (a_3) são obtidas a partir das Equações 1 e 2, respectivamente.

$$a_1 = \left(\frac{h_1}{2}\right) + h_2 + \left(\frac{h_3}{2}\right) - a_3 \quad (1)$$

Onde:

a_1 : distância do centroide da camada superior até a linha neutra da seção, em mm;

h_1 : espessura da camada superior do painel de MLCC, em mm;

h_2 : espessura da camada intermediária do painel de MLCC, em mm;

h_3 : espessura da camada inferior do painel de MLCC, em mm.

a_3 : distância do centroide da camada inferior até a linha neutra da seção, em mm.

$$a_3 = \frac{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot \left(\frac{h_1}{2} + h_2 + \frac{h_3}{2}\right)}{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 + \gamma_3 \cdot E_3 \cdot A_3} \quad (2)$$

Onde:

γ_1 : coeficiente redutor de rigidez da lamela superior, valor adimensional;

E_1 : módulo de elasticidade na flexão das lamelas superiores, em N/mm²;

A_1 : área da seção transversal da lamela superior, em mm²;

γ_3 : coeficiente redutor de rigidez das lamelas inferiores, valor adimensional;

E_3 : módulo de elasticidade na flexão da lamela inferior, em N/mm²;

A_3 : área da seção transversal da lamela inferior, em mm².

A área da seção transversal da camada superior (A_1) pode ser determinada pela Equação 3. De forma análoga, a área da camada inferior (A_3) é calculada pela Equação 4:

$$A_1 = w \cdot h_1 \quad (3)$$

Onde:

w: largura do painel de MLCC.

$$A_3 = w \cdot h_3 \quad (4)$$

No caso de um elemento de MLCC biapoiado com distância entre apoios no valor de L_0 , os fatores gama (γ) das lamelas superior e inferior são determinados utilizando-se a Equação 5 e a Equação 6, respectivamente.

$$\gamma_1 = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot h_2}{G_{vt} \cdot L_0^2 \cdot w}} \quad (5)$$

Onde:

L_0 : distância entre apoios, em mm.

G_{vt} : rigidez ao cisalhamento por *rolling shear*, em N/mm² (obtido por ensaio em corpo de prova, ou na ausência de valores mais precisos, estimado por $E_{co}/160$).

$$\gamma_3 = 1 \quad (6)$$

É necessário calcular o momento de inércia das lamelas superior e inferior. O momento de inércia da lamela superior (I_1) é obtido pela Equação 7, enquanto o momento de inércia da lamela inferior (I_3) é obtido pela Equação 8.

$$I_1 = \frac{w \cdot h_1^3}{12} \quad (7)$$

$$I_3 = \frac{w \cdot h_3^3}{12} \quad (8)$$

A rigidez efetiva do elemento de MLCC (E_{eff}) é determinada a partir das contribuições das camadas individuais e dos coeficientes redutores de rigidez (γ_1 e γ_3). A equação que expressa essa relação é dada pela Equação 9:

$$E_{eff} = E_1 \cdot I_1 + \gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot a_1^2 + E_3 \cdot I_3 + \gamma_3 \cdot E_3 \cdot A_3 \cdot a_3^2 \quad (9)$$

O momento fletor máximo (M) é um parâmetro fundamental para a análise estrutural do painel de MLCC, pois influencia diretamente as tensões normais nas lamelas e as verificações de resistência do elemento. Para uma carga concentrado no meio do vão, por exemplo, o momento fletor máximo é calculado pela Equação 10:

$$M = \frac{P_{rup} \cdot L_0}{4} \quad (10)$$

Onde:

M: momento fletor máximo aplicado no elemento de MLCC para uma carga concentrada no meio do vão, em N.mm;

P_{rup}: carga de ruptura aplicada ao corpo de prova, em N.

Após isso, se faz necessário realizar as verificações para os Estados Limites Últimos (ELU), considerando as tensões de compressão na lamela superior (σ_{c01}), tração na lamela inferior (σ_{t03}) e cisalhamento nas lamelas intermediárias (τ_{vt2}). Essas verificações são realizadas por meio das Equações 11, 12 e 13, respectivamente.

$$\sigma_{c01} = \frac{E_1 \cdot M \cdot (\gamma_1 \cdot a_1 + 0.5 \cdot h_1)}{E_{eff}} \leq f_{c01} \quad (11)$$

Onde:

σ_{c01} : tensão de compressão na lamela superior, em MPa;

f_{c01} : resistência à compressão paralela às fibras da lamela superior, em MPa.

$$\sigma_{t03} = \frac{E_3 \cdot M \cdot (\gamma_3 \cdot a_3 + 0.5 \cdot h_3)}{E_{eff}} \leq f_{t03} \quad (12)$$

Onde:

σ_{t03} : tensão de tração na lamela inferior, em MPa;

f_{t03} : resistência à tração paralela às fibras da lamela inferior, em MPa.

$$\tau_{vt} = (\gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot a_1 + 0.5 \cdot E_2 \cdot w \cdot h_2^2) \cdot \left(\frac{V}{w \cdot E_{eff}} \right) \leq f_{vt} \quad (13)$$

Onde:

τ_{vt2} : tensão de cisalhamento na camada interna, em MPa;

E_2 : módulo de elasticidade na flexão perpendicular das lamelas intermediárias, em MPa;

V : força de corte atuante no elemento de MLCC, em N, referente a atuação de uma força concentrada no centro do vão (Equação 14).

$$V = \frac{P_{rup}}{2} \quad (14)$$

A verificação em relação ao Estado Limite de Utilização para uma carga concentrada no meio do vão deve ser feita em relação à flecha no meio do vão, de acordo com a Equação 15. O limite de deslocamento admite que não existe materiais frágeis associados ao elemento principal.

$$\delta_y = \frac{P_{flecha} \cdot L_0^3}{48 \cdot E_{eff}} \leq \frac{L_0}{300} \quad (15)$$

Onde:

δ_y : flecha no meio do vão para uma carga concentrada, em mm.

P_{flecha} : carga aplicada ao elemento para a avaliação da flecha no Estado Limite de Serviço (ELS), em N.

3.8.2 Método K

O Método K é uma abordagem analítica amplamente utilizada para prever o comportamento estrutural de materiais compósitos heterogêneos. O método considera as interações entre as camadas longitudinais e transversais do painel, avaliando propriedades mecânicas como rigidez à flexão e resistência ao cisalhamento. Essa abordagem permite compreender como cada camada contribui

para o desempenho global do painel, considerando a natureza anisotrópica do material (FPInnovations, 2011; Amorim et al., 2018).

No Método K, as camadas longitudinais suportam a maior parte das cargas aplicadas, enquanto as camadas transversais distribuem essas forças e fornecem rigidez ao cisalhamento. A análise é realizada por meio de coeficientes que representam a eficiência das ligações entre as camadas, permitindo uma avaliação integrada do comportamento estrutural. Essa característica torna o método apropriado para analisar painéis com diferentes configurações de espessura, material e orientação das camadas (Karacabeyli; Gagnon, 2019).

Embora o Método K seja reconhecido por sua simplicidade e aplicabilidade em diretrizes normativas, ele apresenta limitações em casos de configurações geométricas complexas ou em situações que envolvem interações mais sutis, como falhas de colagem. Além disso, a precisão das análises depende de dados de entrada confiáveis, como propriedades ortotrópicas das camadas e coeficientes de interação. Por isso, muitas vezes, é necessário complementá-lo com abordagens experimentais ou numéricas para garantir maior confiabilidade nos resultados. Ainda assim, o Método K continua sendo uma ferramenta indispensável na análise e no desenvolvimento de painéis de MLCC (FPInnovations, 2011; Gimenez; Cecchini Júnior, 2023).

A principal diferença desse método em relação ao Método Gama está na forma como a interação entre as camadas é modelada, utilizando um coeficiente de eficiência estrutural K_1 para representar a transferência de esforços entre as camadas.

O coeficiente K_1 é calculado a partir das propriedades mecânicas das camadas do MLCC e da interação entre elas. A equação base para a determinação de K_1 é dada pela equação 16.

$$k_1 = 1 - \left(1 - \frac{E_{c90}}{E_{c0}}\right) \cdot \left(\frac{h_2^3}{h^3}\right) \quad (16)$$

Onde:

k_1 : fator k de redução de rigidez, adimensional;

E_{c90} : módulo de elasticidade perpendicular às fibras da camada intermediária (MPa);

E_{c0} : módulo de elasticidade paralelo às fibras da camada externa (MPa).

h: altura total do painel (mm).

Caso seja considerada a resistência e a rigidez de todas as camadas, faz-se uso da relação descrita na Equação 17 para determinação de E_{c90} .

$$E_{c90} = \frac{E_{c0}}{30} \quad (17)$$

Levando-se em consideração onde as três camadas da MLCC têm a mesma espessura, k_1 assume o valor de 791/810 (aproximadamente 0,96).

A partir desse coeficiente de eficiência estrutural, pode-se calcular a rigidez à flexão efetiva do MLCC, utilizando a Equação 18.

$$E_{M,0,eff} = k_1 \cdot E_{M,0} \quad (18)$$

Onde:

$E_{M,0,eff}$: rigidez efetiva à flexão do elemento de MLCC, em MPa;

$E_{M,0}$: módulo de elasticidade das lamelas externas (MPa).

A resistência efetiva à flexão do MLCC é expressa pela Equação 19:

$$f_{M,0,eff} = f_{M,0} \cdot k_1 \quad (19)$$

O momento de inércia efetivo (I_{eff}) pode é obtido pela Equação 20:

$$I_{eff} = k_1 \cdot \frac{w \cdot h^3}{12} \quad (20)$$

Onde:

I_{eff} : momento de inércia do elemento de MLCC, em mm⁴.

Com a rigidez efetiva determinada e o momento de inércia efetivo, o módulo de elasticidade efetivo (E_{Ieff}) é calculado conforme a Equação 21.

$$EI_{eff} = E_{M,0,eff} \cdot I_{eff} \quad (21)$$

A verificação da tensão normal máxima efetiva é realizada utilizando a Equação 22, garantindo que a tensão máxima no painel de MLCC esteja dentro dos limites normativos. Essa tensão é determinada pela relação entre o momento fletor máximo e o módulo de resistência elástico da seção W.

$$\sigma_{max,eff} = \left(\frac{M}{W} \right) = \frac{3 \cdot P \cdot L_0}{2 \cdot W \cdot k_1 \cdot h^2} \leq f_{M,0,eff} \quad (22)$$

Onde:

$\sigma_{max,eff}$: tensão máxima efetiva aplicada no elemento, em MPa;

W: módulo de resistência elástico da seção de MLCC, em mm³.

A verificação do Estado Limite de Serviço (ELS) é realizada por meio da flecha no meio do vão (δ_y), que deve estar dentro do limite normativo estabelecido. A flecha é determinada pela Equação 23.

$$\delta_y = \frac{P \cdot L_0^3}{48 \cdot E_{eff}} \leq \frac{L_0}{300} \quad (23)$$

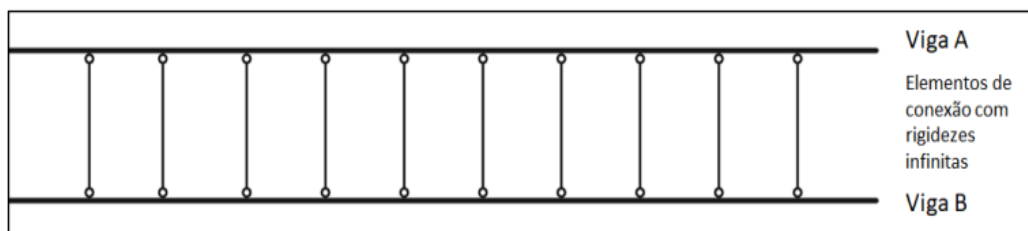
3.8.3 Método Kreuzinger

O Método de Analogia de Cisalhamento, desenvolvido por Kreuzinger em 1999, é uma abordagem analítica utilizada para determinar as propriedades mecânicas de elementos de MLCC. Este método considera a deformação por cisalhamento nas camadas transversais do painel, conhecidas como *rolling shear*, que podem influenciar significativamente o comportamento estrutural da MLCC. Ao incorporar esses efeitos, o método oferece uma análise mais precisa da rigidez e resistência dos painéis (FPInnovations, 2011).

O Método de Kreuzinger separa as características de uma seção transversal multicamadas ou de superfície em dois feixes virtuais denominados A e B. O feixe A considera a soma da resistência à flexão das camadas individuais ao longo de seus respectivos eixos neutros, enquanto o feixe B inclui as contribuições das resistências à flexão obtidas pelo teorema de Steiner, além da resistência ao cisalhamento durante a flexão e a flexibilidade das conexões entre as camadas. Esses

dois feixes são interligados como se fossem membros rígidos de uma malha com rigidez infinita, garantindo que a flexão entre os feixes A e B seja idêntica. A análise resulta na sobreposição do momento fletor e das forças de cisalhamento (tensões) provenientes de ambos os feixes, permitindo a obtenção das propriedades finais de toda a seção transversal. Essa abordagem está ilustrada na Figura 25, que representa graficamente a interação entre os dois feixes e os elementos de conexão (Karacabeyli; Gagnon, 2019; Pereira, 2015; Zhou *et al.*, 2014).

Figura 25 – Sistema de vigas virtuais utilizadas no Método de Kreuzinger.



Fonte: Adaptado de Gagnon e Popovski (2011).

O Método de Kreuzinger consiste na substituição do elemento de MLCC por duas vigas virtuais unidas por elementos infinitamente rígidos. Esse modelo permite avaliar o comportamento estrutural de painéis de MLCC considerando os efeitos do cisalhamento de forma análoga à flexão de vigas compostas (Pereira, 2019). Os símbolos utilizados nos equacionamentos foram os mesmos ilustrados na Figura 24.

O módulo de elasticidade efetivo do elemento pode ser determinado como a soma das rigidezes das vigas A e B, conforme expresso na seguinte Equação 24.

$$EI_{eff} = EI_A + EI_B \quad (24)$$

Onde:

EI_A : rigidez efetiva da viga A, em N.mm²;

EI_B : rigidez efetiva da viga B, em N.mm².

A rigidez efetiva da viga A é expressa pela Equação 25. Já a rigidez efetiva da viga B é expressa pela Equação 26.

$$EI_A = E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_2 + E_3 \cdot I_3 \quad (25)$$

Onde:

E_1, E_2, E_3 : módulos de elasticidade das camadas superior, intermediária e inferior, respectivamente, em MPa;

I_1, I_2 e I_3 : momentos de inércia das respectivas camadas, em mm⁴;

$$EI_B = E_1 \cdot A_1 \cdot \left(\frac{h_1 + h_2}{2}\right)^2 + E_3 \cdot A_3 \cdot \left(\frac{h_2 + h_3}{2}\right)^2 \quad (26)$$

No que se refere ao módulo de cisalhamento, a viga A é considerada infinitamente rígida, enquanto a viga B sofre deformação por cisalhamento. Esse efeito é quantificado pela Equação 27:

$$GA_{eff} = \frac{\left(h - \frac{h_1 + h_3}{2}\right)^2}{\left(\frac{h_1}{2 \cdot G_1 \cdot w}\right) + \left(\frac{h_2}{G_{vt} \cdot w}\right) + \left(\frac{h_3}{2 \cdot G_3 \cdot w}\right)} \quad (27)$$

Onde:

GA_{eff} : módulo de cisalhamento efetivo da viga B, em MPa;

G_1 : módulo de cisalhamento da lamela superior, em MPa;

G_3 : módulo de cisalhamento da lamela inferior, em MPa.

Para a verificação dos Estados Limites Últimos (ELU), são consideradas as tensões máximas de compressão na lamela superior (σ_{c0}), de tração na lamela inferior (σ_{t03}) e de cisalhamento na camada intermediária (τ_{vt2}). Essas tensões podem ser calculadas pelas equações 28, 29 e ,30 respectivamente. Em seguida devem ser comparadas com os valores limites de resistência dos materiais.

$$\sigma_{c0} = \frac{E_1 \cdot M}{2} \cdot \left[\left(\frac{h_1}{EI_A}\right) + \left(\frac{h_1 + h_2}{EI_B}\right) \right] \leq f_{c01} \quad (28)$$

Onde:

M: momento fletor aplicado (Equação 19), em N·mm.

$$\sigma_{t03} = \frac{E_3 \cdot M}{2} \cdot \left[\left(\frac{h_3}{EI_A} \right) + \left(\frac{h_2 + h_3}{EI_B} \right) \right] \leq f_{t03} \quad (29)$$

$$\tau_{vt2} = \left(\frac{V}{2} \right) \cdot \left[\frac{3 \cdot I_2 \cdot E_2}{EI_A \cdot w \cdot h_2} + \frac{E_3 \cdot A_3}{EI_B} \right] \leq f_{vt} \quad (30)$$

Onde:

V: força cortante atuante (Equação 14), em N.

Por fim, a verificação quanto aos Estados Limites de Serviço (ELS) é feita pela flecha máxima do elemento, que é determinada pela soma dos deslocamentos das vigas A e B, conforme Equação 31.

$$\delta_y = \frac{P \cdot L_0^3}{48 \cdot EI_{eff}} \cdot \left[1 + \frac{12 \cdot EI_{eff} \cdot K}{GA_{eff} \cdot L_0^2} \right] \leq \frac{L_0}{300} \quad (31)$$

Onde:

P: carga aplicada, em N;

K: fator de forma do coeficiente de cisalhamento, adotado como aproximadamente 1,5.

3.9 QUALIDADE DE COLAGEM DE ELEMENTOS DE MLCC

A qualidade da colagem é fundamental para o desempenho estrutural de elementos de madeira engenheirada, como a MLCC e a MLC. A integridade das linhas de cola influencia diretamente a resistência ao cisalhamento, a durabilidade dos painéis e sua capacidade de suportar esforços em condições ambientais adversas. Falhas na colagem, como a delaminação, comprometem significativamente o comportamento mecânico, especialmente nas camadas transversais, onde os efeitos de *rolling shear* são mais pronunciados (Dugmore *et al.*, 2019; Purba *et al.*, 2022).

A delaminação é expressa em percentual, calculada por equações que consideram o somatório dos comprimentos delaminados em relação ao comprimento total colado da amostra. A norma ABNT NBR 7190-7 (2022) também especifica dimensões e quantidade mínima de corpos de prova, a fim de garantir representatividade estatística dos resultados (Dugmore *et al.*, 2019; Knorz *et al.*, 2017;

Zelinka *et al.*, 2019). No entanto, o referido documento normativo não informa a porcentagem limite de delaminação para elementos de MLCC.

Os ensaios de avaliação da qualidade da colagem geralmente seguem normas técnicas específicas. A norma europeia EN 16351 estabelece procedimentos para a realização de testes de delaminação em MLCC, incluindo ciclos de imersão em água e secagem para simular condições de exposição ao intemperismo. Esses testes visam avaliar a resistência da linha de cola à penetração de umidade e às variações dimensionais resultantes. Tais ensaios buscam garantir que o adesivo utilizado seja capaz de manter a integridade da união mesmo sob condições de serviço agressivas (Kim, 2020; Knorz *et al.*, 2017).

Para elementos de MLC, a norma EN 14080 estabelece limites máximos de delaminação de 4% para coníferas e 6% para folhosas, aplicáveis a elementos colados com lamelas paralelas no contexto europeu. No entanto, esses limites não se aplicam diretamente ao MLCC, uma vez que os esforços atuantes e o padrão de distribuição de tensões são distintos, especialmente nas camadas transversais. Estudos recentes (Fathoni *et al.*, 2023; Ibach; Cai, 2020) indicam que, para MLCC, valores limites de delaminação aceitáveis podem ser mais elevados, situando-se em torno de 10%, embora ainda não haja consenso normativo consolidado sobre esse parâmetro. O trabalho de Knorz *et al.* (2016), por exemplo, mostrou que fatores como a espessura da lamela, a espécie da madeira e o tipo de adesivo influenciam significativamente os níveis de delaminação observados.

Além dos métodos de ensaio, os parâmetros de fabricação exercem papel decisivo na qualidade da colagem. Fatores como pressão de prensagem, tempo de prensagem, tipo e gramatura do adesivo, e teor de umidade das lamelas influenciam diretamente na penetração e ancoragem do adesivo na superfície da madeira. Adesivos como o resorcinol-formaldeído (RF) e o poliuretano bicomponente (PUR) são amplamente utilizados na fabricação de MLCC, por apresentarem boa resistência mecânica e estabilidade sob condições de umidade, mas sua eficiência está diretamente relacionada à correta aplicação das condições de colagem (Kim, 2020; O'Ceallaigh *et al.*, 2018; Sikora *et al.*, 2016; Zelinka *et al.*, 2019).

Ainda que as normas ofereçam diretrizes gerais, as exigências podem variar entre países. A norma norte-americana ANSI/APA PRG 320, por exemplo, adota critérios diferentes da EN 16351 (europeia) quanto aos limites de delaminação, métodos de envelhecimento acelerado e controle de qualidade. Isso reforça a

necessidade de desenvolvimento de normas nacionais adaptadas às condições climáticas, espécies de madeira e processos industriais locais.

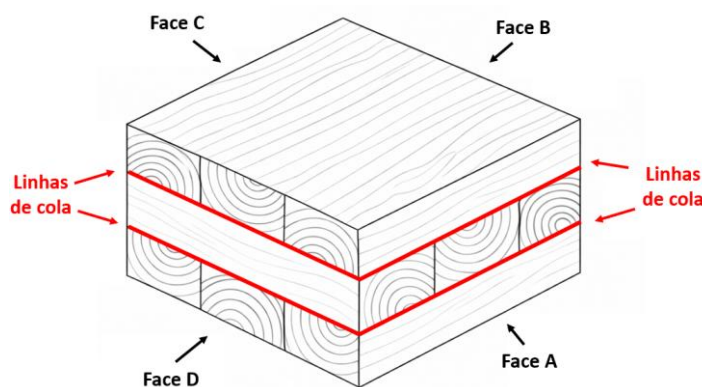
3.9.1 Procedimentos do método de ensaio ABNT NBR 7190-7 (2022)

3.9.1.1 Ensaio de delaminação

A norma brasileira ABNT NBR 7190-7 (2022) estabelece os procedimentos para a avaliação da qualidade da colagem em elementos de MLCC, por meio de ensaios de delaminação em corpos de prova submetidos a ciclos controlados de variação de umidade e temperatura. O objetivo deste ensaio é verificar a integridade da colagem entre as camadas de madeira, identificando possíveis falhas adesivas nas linhas de cola após exposição a condições que simulam ambientes agressivos.

Inicialmente, recomenda-se a medição da massa inicial de cada amostra por meio de balança de precisão, bem como o registro do comprimento total das linhas de cola, de modo a possibilitar a comparação com os trechos delaminados ao término do ensaio. Conforme ilustrado na Figura 26, as linhas destacadas em vermelho nas quatro faces laterais do corpo de prova representam as interfaces coladas entre as camadas do painel de MLCC, as quais constituem as regiões avaliadas quanto à ocorrência de delaminação. Essas linhas de cola estão presentes ao longo das faces laterais do corpo de prova, repetindo-se nas faces B e C, onde também podem ser observadas as possíveis aberturas nas interfaces adesivas após a realização do ensaio.

Figura 26 – Representação esquemática das faces laterais e das linhas de cola avaliadas no ensaio de delaminação em painéis de MLCC.



Fonte: Autoria própria (2026).

Em seguida, os corpos de prova devem ser totalmente submersos em água com temperatura controlada entre 10 °C e 20 °C, no interior de um recipiente adequado. Durante esse processo, aplica-se inicialmente um vácuo de 75 kPa por 30 minutos, seguido de pressurização a 550 kPa, mantida por 2 horas. Esse ciclo tem como objetivo promover a penetração de umidade nas interfaces coladas, induzindo tensões internas capazes de evidenciar possíveis falhas de adesão entre as lamelas.

Após o ciclo de imersão e pressurização, os corpos de prova devem ser transferidos diretamente para uma estufa, onde são submetidos a fluxo de ar com velocidade entre 2 m/s e 3 m/s, a uma temperatura de 70 °C e umidade relativa entre 8% e 10%. A secagem deve ser conduzida até que a massa das amostras atinja entre 100% e 110% da massa original. Durante esse processo, os corpos de prova devem ser mantidos espaçados por pelo menos 50 mm para garantir ventilação uniforme e evitar interferência entre as amostras.

Concluída a secagem, recomenda-se que a inspeção visual e a medição da delaminação sejam realizadas em até uma hora, a fim de evitar alterações provocadas pela exposição ao ambiente. A avaliação da delaminação deve ser feita com o auxílio de instrumento de medição com precisão adequada, como paquímetro, mensurando o comprimento total das separações visíveis em todas as linhas de cola das 4 faces laterais dos corpos de prova.

A quantificação da delaminação é com base no comprimento total das linhas de cola delaminados em relação ao comprimento total das linhas de cola do corpo de prova, conforme a Equação (32):

$$Delam_{total} = \frac{l_{tot,delam}}{l_{tot,linhacola}} \cdot 100 \quad (32)$$

onde:

$Delam_{total}$: percentual de delaminação total em relação ao comprimento total das linhas de cola do corpo de prova, em %;

$l_{tot,delam}$: comprimento total das delaminações, expresso em milímetros (mm);

$l_{tot,linhacola}$: soma dos perímetros de todas as linhas de cola do corpo de prova, expressa em milímetros (mm).

Vale mencionar que a ABNT NBR 7190-7 (2022) não estabelece nenhum limite de delaminação para elementos de MLCC a exemplo do que prevê o método de ensaio ABNT NBR 7190-6 (2022) que é referente a elementos de MLC. A análise dos comprimentos colados consideram todas as linhas de cola nas quatro faces dos corpos de prova.

3.9.1.2 Ensaio de cisalhamento da linha de cola

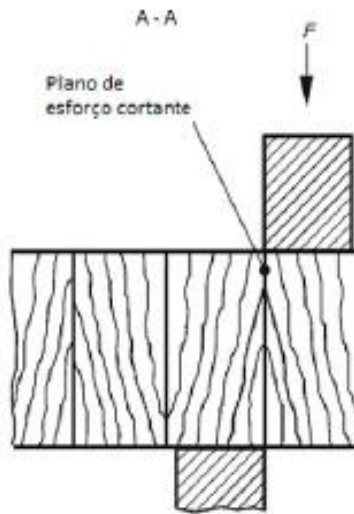
A norma ABNT NBR 7190-7 (2022) estabelece os procedimentos para a caracterização da resistência da colagem em elementos de MLCC, por meio de ensaios de cisalhamento realizados diretamente sobre as linhas de cola. O objetivo do ensaio é determinar a resistência ao cisalhamento na interface adesiva sob carregamento progressivo, até a ocorrência de falha, seja na linha de adesão ou na própria madeira.

Os corpos de prova utilizados devem apresentar formato retangular, com dimensões padronizadas conforme a espessura do painel, com as mesmas configurações do ensaio de delaminação. As superfícies destinadas à aplicação da carga devem ser planas, paralelas e perpendiculares à linha de colagem, a fim de garantir a distribuição uniforme da tensão de cisalhamento. Antes do ensaio, recomenda-se a medição precisa das dimensões da área de cisalhamento com instrumentos adequados, como paquímetro digital, de modo a assegurar a representatividade dos resultados.

Durante o ensaio, o corpo de prova deve ser posicionado em uma máquina universal de ensaios equipada com dispositivo de carregamento projetado para transmitir a força de corte de forma uniforme ao longo da linha de cola. A amostra é disposta de forma que uma das lamelas seja carregada enquanto a outra permanece apoiada, assegurando a aplicação correta da tensão de cisalhamento.

O carregamento deve ser aplicado a uma taxa constante de deformação, suficiente para provocar a ruptura em no mínimo 20 segundos, conforme recomendado pela norma. A Figura 27 ilustra o esquema de solicitação e a montagem experimental do ensaio conforme descrito na norma.

Figura 27 – Esquema da solicitação no plano da linha de cola;



Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190-7.

A força máxima registrada no momento da ruptura é utilizada para o cálculo da resistência ao cisalhamento na linha de cola, considerando a área efetiva previamente medida. A resistência ao cisalhamento da linha de cola foi calculada por meio da Equação (33):

$$f_{v0} = \frac{F_{v0,max}}{b \cdot t} \quad (33)$$

Onde:

f_{v0} : resistência ao cisalhamento da linha de cola, em MPa;

$F_{v0,max}$: força máxima de cisalhamento aplicada na amostra, em N;

b : largura do corpo de prova, em milímetros mm;

t : altura (espessura) do corpo de prova, em milímetros mm.

3.10 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica permitiu uma análise aprofundada sobre a MLCC, evidenciando seu potencial como material estrutural sustentável para a construção civil. Os estudos apontam vantagens como alta estabilidade dimensional, bom desempenho mecânico e eficiência térmica e acústica, além da contribuição ambiental devido à baixa emissão de CO₂ e capacidade de armazenamento de carbono.

A maioria das pesquisas analisadas adota a configuração ortogonal entre as camadas (90°), a qual, embora amplamente utilizada, está sujeita à ocorrência do fenômeno de *rolling shear*, que compromete a rigidez e a resistência dos painéis nas camadas intermediárias. Estratégias como o uso de defasagens angulares, seleção adequada de espécies e controle dos parâmetros de fabricação vêm sendo estudadas para mitigar esse efeito.

Observou-se também a carência de estudos nacionais com espécies de madeira brasileiras e com base nas normas da ABNT NBR 7190, recentemente publicadas para elementos de madeira industrializada. A maior parte dos trabalhos da literatura sobre este assunto utiliza espécies típicas do Hemisfério Norte, como *Picea abies*, *Pinus spp.* e *Populus deltoides*, e adotam normas estrangeiras como a EN 16351. A presente pesquisa se destaca ao investigar painéis de MLCC com espécies produzidas no Brasil para fins industriais, seguindo a ABNT NBR 7190, o que contribuirá para maior aplicabilidade comercial no cenário nacional.

Além disso, foram identificados parâmetros significativos no processo de fabricação, como pressão de colagem e gramatura do adesivo, que influenciam diretamente a qualidade estrutural dos painéis. Neste estudo, adotou-se a metodologia proposta por Silva (2023), que demonstrou maior resistência ao cisalhamento da linha de cola com aplicação de 0,7 MPa de pressão, garantindo reprodutibilidade e qualidade na produção dos corpos de prova.

No contexto do comportamento transversal dos painéis, observou-se na literatura uma grande variação nos valores de rigidez e resistência ao cisalhamento transversal, influenciados diretamente pela espécie de madeira, densidade, método de ensaio e condições de fabricação. Os valores de rigidez ao cisalhamento transversal (G_{vt}) reportados variam, em geral, entre 40 MPa e 500 MPa. Já os valores de resistência ao cisalhamento transversal (f_{vt}) situam-se predominantemente entre 1,0 MPa e 5,7 MPa, sendo os menores associados a espécies de baixa densidade. Também não existe um consenso entre os pesquisadores sobre qual é o melhor método de ensaio e formato de corpo de prova para a obtenção dos parâmetros de resistência e rigidez ao *rolling shear*.

Por fim, ainda que alguns estudos, como os de Buck; Hagman (2018) e Haftkhani; Hematabadi (2022), tenham explorado configurações inclinadas, eles não contemplaram defasagens intermediárias completas de 30° e 45° , tampouco utilizaram madeiras brasileiras ou normas nacionais. Dessa forma, esta pesquisa

contribuirá de forma inédita ao propor a avaliação do MLCC com camadas centrais uniformemente inclinadas, utilizando madeiras nacionais, o que potencializa o conhecimento técnico sobre o comportamento mecânico desses elementos e amplia sua aplicação no contexto da construção sustentável no Brasil.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção, são especificados a madeira e adesivo empregados na fabricação dos painéis de MLCC. Além disso, apresenta-se a metodologia adotada para a avaliação da qualidade da colagem da combinação espécie de madeira/adesivo considerada. Também são detalhados os procedimentos experimentais utilizados para a determinação da resistência (f_{vt}) e da rigidez (G_{vt}) ao *rolling shear*, mediante ensaios de flexão e de cisalhamento direto em copos de prova retos e inclinados, além de uma breve explicação sobre como os resultados foram analisados.

4.1 MATERIAIS

A madeira utilizada neste estudo foi *Pinus elliottii*, proveniente de florestas plantadas no Brasil. A escolha dessa espécie considerou sua representatividade no setor florestal nacional e a necessidade de ampliar o conhecimento sobre seu desempenho estrutural em elementos de MLCC. As coníferas são as espécies mais utilizadas na fabricação de elementos industrializados de madeira como MLC e MLCC.

Para a colagem das lamelas de madeira foi utilizado um adesivo poliuretano bicomponente (AG101), fabricado pela empresa KEHL®. Esse adesivo é composto por dois elementos: o componente A, um isocianato polifuncional de coloração escura e densidade de 1240 kg/m^3 , e o componente B, um poliól derivado de óleos vegetais, líquido colorido com densidade de 1000 kg/m^3 . A proporção de mistura entre os componentes foi de 1:1 (relação ao peso dos componentes), com um tempo estimado de 30 minutos para o início da cura, conforme especificações do fabricante.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA

A caracterização da madeira utilizada na fabricação dos painéis de MLCC foi realizada de acordo com as recomendações da ABNT NBR 7190-2:2022. A caracterização contemplou a determinação da resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}), da resistência à tração paralela às fibras (f_{t0}), resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (f_{v0}) e densidade aparente (ρ_{ap}).

Para cada uma dessas propriedades foram realizadas 06 repetições, totalizando um total de 24 ensaios de caracterização, assegurando a representatividade estatística dos resultados e fornecendo parâmetros de referência para a análise do desempenho estrutural dos elementos de MLCC. O número de corpos de prova de ensaios também foi definido em função da quantidade de madeira disponível no laboratório.

Para a obtenção das dimensões no estado saturado, os corpos de prova foram imersos em água à temperatura ambiente por 72 h, assegurando-se que permanecessem acima do ponto de saturação das fibras. Ao final do período de imersão, as dimensões foram medidas com precisão de 0,01 mm, tomando-se leituras em três pontos por aresta e utilizando-se a média como valor representativo de cada direção. Essas medidas foram registradas como L_s , R_s e T_s , correspondentes às direções longitudinal, radial e tangencial, respectivamente.

Em seguida, as amostras foram secas em estufa a $(103 \pm 2)^\circ\text{C}$ até massa constante, procedimento após o qual foram mantidas em dessecador até atingirem temperatura ambiente e novamente medidas com o mesmo critério metrológico. As dimensões no estado seco foram registradas como L_0 , R_0 e T_0 . Com os pares de medidas saturado–seco, a retração percentual em cada direção foi calculada pelas Equações 34, 35 e 36:

$$\varepsilon_{rL} = \frac{L_s - L_0}{L_s} \times 100 \quad (34)$$

onde:

ε_{rL} : retração linear longitudinal, (%);

L_s : dimensão longitudinal no estado saturado (mm);

L_0 : dimensão longitudinal no estado seco (mm);

$$\varepsilon_{rR} = \frac{R_s - R_0}{R_s} \times 100 \quad (35)$$

onde:

ε_{rR} : retração linear radial, (%);

R_s : dimensão radial no estado saturado (mm);

R_0 : dimensão radial no estado seco (mm);

$$\varepsilon_{rT} = \frac{L_T - L_0}{L_T} \times 100 \quad (36)$$

onde:

ε_{rL} : retração linear tangencial, (%);

L_S : dimensão tangencial no estado saturado (mm);

L_0 : dimensão tangencial no estado seco (mm);

O coeficiente de anisotropia (CA) foi definido como a razão entre a retração tangencial e a retração radial, conforme a Equação 37. Esse índice adimensional é amplamente utilizado para expressar o grau de anisotropia da madeira em relação às suas retrações transversais.

$$CA = \frac{\varepsilon_{rT}}{\varepsilon_{rR}} \quad (37)$$

onde:

CA: coeficiente de retração (adimensional);

Também foi calculado o índice $\Delta\varepsilon$, um parâmetro adimensional utilizado para complementar a interpretação da estabilidade dimensional da madeira. Esse índice expressa a diferença relativa entre as retrações tangencial e radial, normalizada pela retração longitudinal, conforme a Equação 38.

$$\Delta\varepsilon = \frac{\varepsilon_{rT} - \varepsilon_{rR}}{\varepsilon_{rL}} \times 100 \quad (38)$$

onde:

$\Delta\varepsilon_{rL}$: índice de estabilidade dimensional (adimensional).

4.3 FABRICAÇÃO DOS PAINÉIS DE MLCC

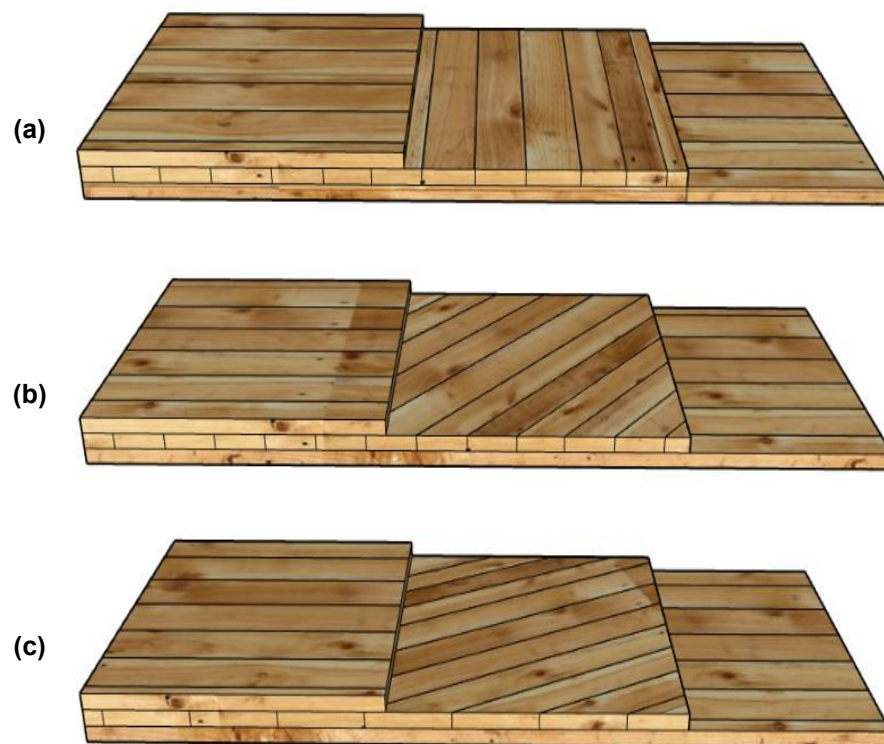
Os painéis de MLCC foram fabricados com três camadas de lamelas com 16 mm de espessura cada camada, sendo a camada central disposta em diferentes angulações em relação às camadas externas para avaliar a influência dessa

configuração na resistência e na rigidez ao *rolling shear*. Foram consideradas 03 variações de defasagem na camada intermediária:

- Painel com camada central a 90°, configuração tradicional do MLCC;
- Painel com camada central a 45°, buscando um alinhamento intermediário entre as direções principais das fibras;
- Painel com camada central a 30°, promovendo um maior desvio em relação ao convencional.

A Figura 28 ilustra as disposições adotadas para a fabricação dos painéis, destacando a variação da orientação das lamelas centrais.

Figura 28 – Painéis de MLCC com camadas centrais alternadas: (a) Camada central em 90°; (b) Camada central em 45°; (c) Camada central em 30°.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Para facilitar a apresentação e análise dos resultados, os painéis fabricados foram identificados com base na angulação da camada central. A nomenclatura adotada seguiu a seguinte lógica:

A primeira letra representou a espécie de madeira utilizada:

- P para *Pinus elliottii*

O número subsequente indicou a angulação da camada central em relação às lamelas externas:

- 90 para camada central a 90°
- 45 para camada central a 45°
- 30 para camada central a 30°

Dessa forma, cada painel foi referenciado conforme apresentado no Quadro 1, permitindo uma identificação clara ao longo do trabalho.

Quadro 1 - Identificação dos painéis de MLCC.

Identificação	Espécie de Madeira	Ângulo da Camada Central
P90	<i>Pinus elliottii</i>	90°
P45	<i>Pinus elliottii</i>	45°
P30	<i>Pinus elliottii</i>	30°

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A fabricação dos painéis de MLCC seguiu um processo estruturado para garantir a qualidade e a resistência dos elementos lamelados. Inicialmente, as lamelas de madeira foram preparadas por meio do aplainamento, utilizando desempenadeira e desengrossadeira (Figura 29), a fim de obter superfícies uniformes e paralelas. Esse procedimento teve como objetivo remover irregularidades naturais e garantir uma melhor aderência do adesivo durante a colagem

Figura 29 – Processo de aplainamento das lamelas de madeira: (a) Utilização de desempenadeira; (b) Utilização de desengrossadeira.



(a)



(b)

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Para garantir a precisão dos cortes, foi desenvolvido um gabarito específico para cada painel, especialmente para os painéis com camadas centrais inclinadas em 45° e 30° . Esse gabarito permitiu que as lamelas fossem cortadas corretamente, assegurando o alinhamento adequado das camadas intermediárias e facilitando o processo de montagem dos painéis.

Nesse processo, as lamelas da primeira camada foram posicionadas sobre uma mesa, servindo como referência para o seccionamento das lamelas da segunda camada. Em seguida, as lamelas da camada central foram cortadas utilizando uma serra circular de topo, ajustada para a angulação do painel (30° ou 45°). Esse seccionamento garantiu que as lamelas centrais mantivessem o alinhamento correto, essencial para a estabilidade estrutural dos painéis. A Figura 30 ilustra o gabarito da camada central de cada painel, evidenciando a metodologia empregada para assegurar a precisão dimensional e o correto encaixe das lamelas.

Após a produção do gabarito (Figura 30), as lamelas da camada central já tinham suas dimensões definidas, possibilitando o seccionamento preciso conforme os requisitos estabelecidos para a confecção dos painéis.

Figura 30 – Gabarito de seccionamento das lamelas da camada central do MLCC para painéis com camada central: (a) 90° ; (b) 45° ; (c) 30° .



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Com as dimensões determinadas, as lamelas foram cortadas e, em seguida, submetidas a um processo de limpeza com ar comprimido, removendo resíduos de poeira e impurezas. Essa etapa foi essencial para garantir a integridade da interface de colagem, favorecendo a adesão eficiente do adesivo durante a montagem dos painéis.

Foram utilizadas lamelas com razão entre a largura e a espessura maior que 3.5, visto que este é o valor mínimo exigido quando não se realiza colagem lateral das camadas (Grandmont; Yeh; Dagenais, 2019). Vale mencionar ainda que o uso de lamelas com razão largura/espessura menores pode gerar os seguintes inconvenientes: formação de lacunas excessivas, surgimento de pontos de concentração de tensão no MLCC e aumento da fluência do material produzido (Silva, 2023).

A colagem dos painéis foi realizada em um período inferior a 24 horas após o aplainamento das lamelas, garantindo que as superfícies estivessem limpas e com alta capacidade de aderência. Esse tempo reduzido entre o aplainamento e a colagem foi essencial para minimizar a influência da variação da umidade da madeira e evitar a contaminação da superfície, fatores que poderiam comprometer a qualidade da adesão.

A aplicação do adesivo poliuretano bicomponente (AG101) foi conduzida manualmente sobre as superfícies de contato das lamelas (Figura 31), garantindo uma distribuição homogênea do adesivo. A colagem foi realizada em linha dupla, sendo aplicada uma gramatura de 200 g/m² em cada linha de cola. Esse procedimento assegurou uma linha de colagem eficiente, proporcionando resistência mecânica adequada aos painéis. Durante a montagem, as lamelas foram alinhadas manualmente, seguindo o posicionamento previamente estabelecido para cada configuração de angulação da camada central (90°, 45° e 30°).

Figura 31 – Aplicação manual do adesivo poliuretano bicomponente (AG101) durante o processo de colagem dos painéis de MLCC.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Para determinar o torque necessário a ser aplicado nos parafusos da prensa, foi adotado o seguinte procedimento, considerando uma pressão desejada de 0,7 MPa (7 kgf/cm²). O valor dessa pressão foi baseado nos resultados de Silva (2023), onde esse nível de pressão apresentou os melhores resultados de colagem em seu estudo. Esse valor de pressão de colagem também é recomendado pela ABNT NBR 7190-1 (2022). A força total foi distribuída entre 5 pares de barras roscadas, e o torque necessário para cada barra foi calculado considerando o coeficiente de atrito da rosca.

A força total necessária para atingir a pressão desejada foi calculada utilizando a Equação 39:

$$P = \frac{F}{A} \quad (39)$$

Onde:

P: pressão aplicada, considerando o valor de 7 kgf/cm² ou 0,7 MPa;

F: força total aplicada na superfície da prensa, em kgf;

A: área da superfície do painel, igual a 7200 cm² (150 cm × 48 cm).

Substituindo os valores na Equação 1, obteve-se uma força total de 50400 kgf. Convertendo esse valor para Newtons, considerando que 1 kgf = 10 N, a força total aplicada na superfície da prensa foi de aproximadamente 504000 N.

A prensa utilizada possuía 5 pares de barras roscadas, portanto, a força em cada par de barras foi determinada dividindo a força total por 5, obtendo uma força F_1 de 100800 N.

Para calcular o torque necessário em cada parafuso, utilizou-se a Equação 40:

$$T = K \cdot F_1 \cdot D_p \quad (40)$$

Onde:

T: torque aplicado em cada porca, em N·mm;

K: coeficiente de atrito da rosca, dado por 0,21 (Budynas ; Nisbett, 2016);

F_1 : força exercida por cada par de porcas na barra roscada, em N;

D_p : diâmetro da porca, dado por 25,4 mm.

Substituindo os valores na Equação 40, obteve-se um torque de aproximadamente 537,67 N.m. Para determinar o torque aplicado em cada barra roscada individualmente, basta dividir esse valor por dois, resultando em um torque final de 268,83 N.m por barra roscada.

Para garantir a aplicação correta da força de prensagem, foi utilizado um torquímetro de estalo, permitindo que o torque previamente calculado fosse aplicado com precisão em cada barra roscada. Esse controle garantiu a uniformidade da pressão ao longo dos painéis, evitando variações que poderiam comprometer a qualidade da colagem.

Após a montagem e aplicação do adesivo, os painéis de MLCC foram prensadas com uso chapas metálicas, posicionadas acima e abaixo dos painéis. Essas chapas tiveram a função de uniformizar a distribuição da pressão aplicada durante a prensagem, além de evitar o contato direto do adesivo com a estrutura da prensa.

Além disso, foram colocadas vigas de madeira sobre os painéis, formando uma camada espessa de madeira, facilitando o processo de prensagem (Figura 32).

O uso dessas vigas permitiu que a rosca das barras roscadas não precisasse ser apertada até a base da prensa, reduzindo o esforço necessário para o aperto e garantindo que a força aplicada fosse distribuída de maneira eficiente.

Figura 32 – Processo de prensagem dos painéis de MLCC, utilizando barras roscadas, chapas metálicas e vigas de madeira para distribuição uniforme da pressão.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A prensagem foi mantida por um período mínimo de 24 horas, garantindo tempo suficiente para a cura inicial do adesivo e proporcionando a resistência necessária para a integridade estrutural dos painéis.

Após o período de prensagem, os painéis de MLCC foram retirados da prensa e submetidos ao processo de esquadrejamento (Figura 33). Essa etapa teve como objetivo garantir o alinhamento das bordas e corrigir possíveis irregularidades resultantes do processo de colagem. O esquadrejamento foi realizado utilizando serra circular, assegurando um acabamento final adequado.

Figura 33 – Processo de esquadrejamento dos painéis de MLCC utilizando serra circular para ajuste dimensional e acabamento final.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Foram produzidos painéis de MLCC com dimensões 1500 mm × 480 mm × 48 mm para a determinação dos parâmetros associados ao *rolling shear*. As dimensões dos elementos de MLCC fabricados foram definidas com base nas limitações dos equipamentos de prensagem e de ensaios. Um total de 06 painéis para cada direção da camada central (90°, 45° e 30°), totalizando 18 painéis de *Pinus elliottii*, foram manufaturados para garantir uma quantidade suficiente de amostras para a análise dos efeitos da variação angular na resistência e rigidez ao *rolling shear* como também para viabilizar os ensaios de qualidade de colagem.

4.4 ENSAIO DE DELAMINAÇÃO

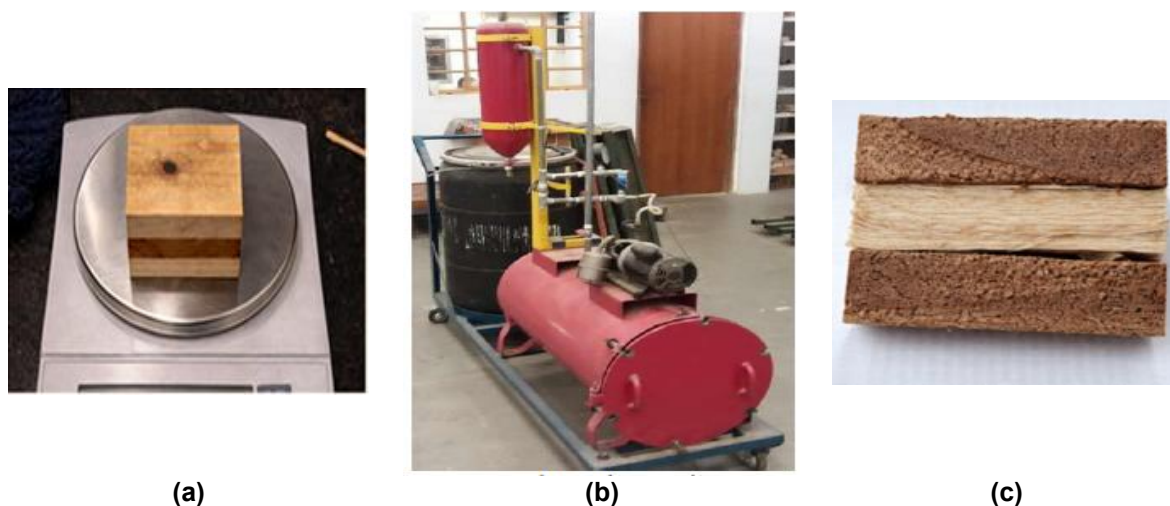
Os ensaios de delaminação foram conduzidos conforme os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 7190-7:2022, utilizando corpos de prova extraídos dos painéis de MLCC produzidos neste estudo. No item 3.9.1.1 deste relatório também se apresenta uma síntese do procedimento adotado para os ensaios de delaminação.

Foram selecionados 20 corpos de prova para cada direção da madeira, totalizando 60 ensaios de delaminação (20 ensaios para cada direção). Cada corpo

de prova possuía formato quadrado, com 100 mm de lado e 48 mm de espessura, mantendo a configuração estrutural original do painel.

Antes do início do ciclo de vácuo e pressão, foram realizadas medições da massa inicial dos corpos de prova, bem como do comprimento total das linhas de cola de cada amostra, utilizando balança de precisão e paquímetro digital, conforme ilustrado na Figura 34(a). Em seguida, os corpos de prova foram submetidos ao ciclo de vácuo e pressurização em autoclave, equipamento utilizado para promover a penetração de umidade nas interfaces coladas (Figura 34(b)). Após a conclusão do ciclo e a retirada dos corpos de prova da autoclave, foram observadas as regiões de abertura nas interfaces coladas, caracterizando os trechos delaminados (Figura 34(c)). As medições das aberturas resultantes da delaminação foram realizadas com o auxílio de paquímetro digital, possibilitando a quantificação precisa dos trechos delaminados. A quantificação da delaminação foi realizada por meio da Equação (32).

Figura 34 – Etapas do ensaio de delaminação: (a) Medição da massa inicial e do comprimento das linhas de cola dos corpos de prova; (b) Autoclave utilizada para aplicação dos ciclos de vácuo e pressão; (c) Corpo de prova após o ciclo de delaminação, evidenciando a abertura nas interfaces coladas.



Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190-7.

4.5 ENSAIO DE CISALHAMENTO DAS LINHAS DE COLA

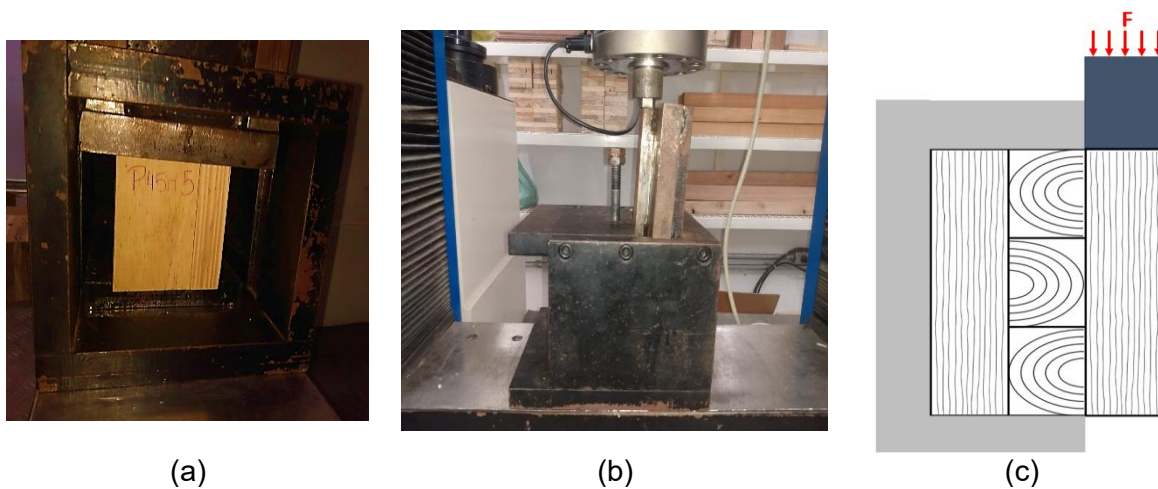
Os ensaios de cisalhamento das linhas de cola foram realizados conforme os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 7190-7:2022, com o intuito de

quantificar a resistência ao cisalhamento das lamelas unidas dos painéis de MLCC. Foram utilizados 60 corpos de prova, sendo 20 para cada direção de colagem, com dimensões de 50 mm × 50 mm na face e 48 mm de espessura, mantendo a configuração original do painel de onde foram extraídos. Cada corpo de prova apresentava quatro faces ensaiadas, contendo três linhas de cola por face, totalizando 12 linhas de cola por corpo de prova e 720 linhas de cola ensaiadas no total. No item 3.9.1.2 deste relatório também se apresenta uma síntese do procedimento adotado para os ensaios de cisalhamento das linhas de cola.

Antes da realização dos ensaios, foram efetuadas medições precisas da área de cisalhamento utilizando paquímetro digital, a fim de garantir a exatidão dos cálculos de tensão. Os corpos de prova apresentavam superfícies paralelas e perpendiculares à linha de cola, conforme os critérios estabelecidos pela norma.

Os ensaios foram executados em uma máquina universal de ensaios EMIC (capacidade de 300 kN), equipada com dispositivos que permitiram a aplicação uniforme da carga ao longo da linha adesiva. Os corpos de prova foram posicionados de modo que apenas uma das lamelas estivesse submetida à força de tração, enquanto a outra permanecia fixa, promovendo a solicitação direta da linha de cola ao cisalhamento (Figura 335).

Figura 35 – Configuração experimental do ensaio de cisalhamento na linha de cola: (a) Vista frontal do corpo de prova no interior do dispositivo; (b) Vista lateral do corpo de prova durante a aplicação de carga na máquina universal de ensaios; (c) Representação esquemática do corpo de prova e da direção da força aplicada.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A aplicação da carga foi feita de maneira contínua e controlada, garantindo que a ruptura ocorresse dentro do intervalo mínimo de tempo recomendado. Os dados de força foram registrados automaticamente pelo sistema da máquina, e os cálculos da resistência ao cisalhamento foram realizados posteriormente, com base na área da seção transversal cisalhada e na força máxima obtida.

O carregamento foi aplicado a uma taxa constante de deformação, de modo que a falha do corpo de prova ocorresse após, no mínimo, 20 segundos. Durante o ensaio, a força máxima de cisalhamento aplicada foi registrada automaticamente pelo software da máquina de ensaio. A resistência ao cisalhamento da linha de cola foi calculada por meio da Equação (41):

$$f_{v0} = \frac{F_{v0,max}}{b \cdot t} \quad (41)$$

Onde:

f_{v0} : resistência ao cisalhamento da linha de cola, em MPa;

$F_{v0,max}$: força máxima obtida no ensaio, em N;

b : largura da área de cisalhamento, em mm;

t : espessura da área cisalhada, em mm.

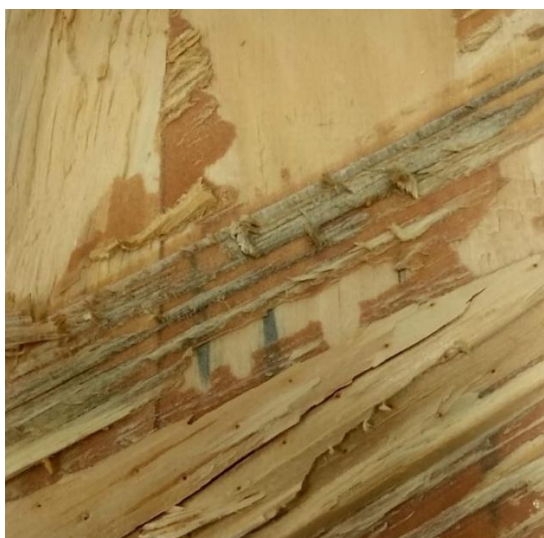
4.5.1 QUANTIFICAÇÃO DAS PORCENTAGENS DE FALHA ADESIVA E COESIVA POR ANÁLISE DE IMAGEM

Inicialmente, foi realizada a calibração da escala da imagem para que as áreas fossem expressas em milímetros quadrados (mm²). Utilizou-se o próprio comprimento do corpo de prova, que é de 50 mm, como base para a calibração. Para isso, aplicou-se a ferramenta de medição de linha para determinar essa distância na imagem. Em seguida, no menu de configuração de escala do ImageJ, essa medida foi informada, convertendo os pixels da imagem para a unidade desejada, garantindo que todas as medições subsequentes fossem realizadas de forma adequada.

Em seguida, a imagem passou por um processo de pré-processamento para garantir uma melhor visualização (Figura 36). Após essa etapa, foi convertida para tons de cinza (Figura 37), o que permitiu uma melhor diferenciação entre as

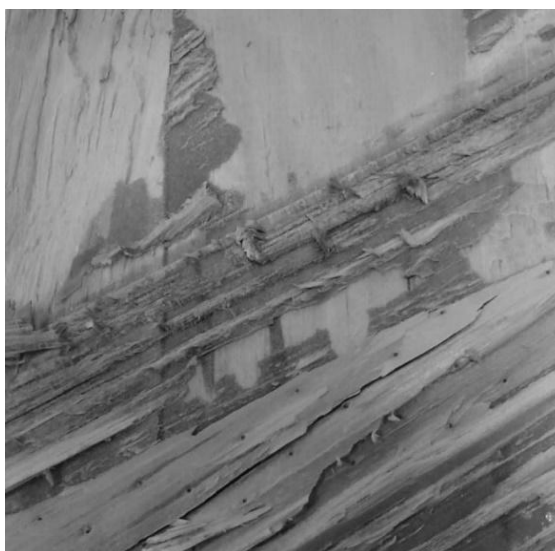
regiões de madeira e adesivo. Esse ajuste foi realizado por meio da conversão da imagem para 8-bit, eliminando possíveis interferências de cores na análise.

Figura 36 – Imagem do corpo de prova após o ensaio de cisalhamento, submetida a pré-processamento para segmentação da linha de cola.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 37 – Imagem do corpo de prova convertida para tons de cinza para segmentação da linha de cola.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Posteriormente, a segmentação da linha de cola foi realizada utilizando a ferramenta *Threshold*, que permitiu realçar as áreas adesivas. Para a definição do

limiar, utilizou-se o método de Otsu, o que garantiu uma segmentação automática e otimizada da região da cola. Esse procedimento possibilitou um contraste adequado, destacando a linha de cola em relação às demais partes da imagem (Figura 38).

Figura 38 – Imagem segmentada da linha de cola após aplicação do Threshold com o método de Otsu.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A partir desse procedimento, foi possível visualizar e distinguir as regiões de ruptura na madeira e na linha de cola em cada corpo de prova. A segmentação obtida permitiu identificar as áreas onde ocorreu falha adesiva, caracterizada pela separação na linha de cola, e as áreas de falha coesiva, onde houve ruptura predominante na madeira. Esse processo foi aplicado a todos os corpos de prova, o que garantiu uma análise abrangente e representativa dos resultados do ensaio de cisalhamento.

Para assegurar que a segmentação fosse fidedigna à realidade de cada amostra, foi adotada uma abordagem individualizada no pré-processamento e na limiarização das imagens. Cada corpo de prova apresentou variações na textura e contraste, exigindo ajustes específicos nos parâmetros de conversão para tons de cinza e na aplicação do *Threshold*. Dessa forma, diferentes métodos de segmentação foram testados e ajustados, sempre buscando garantir que a separação entre madeira e adesivo fosse a mais precisa possível.

4.6 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE *ROLLING SHEAR* PARA A MLCC

A determinação dos parâmetros mecânicos associados ao *rolling shear* nos elementos de MLCC foi realizada por meio de ensaios experimentais de flexão e de cisalhamento direto, realizados em corpos de prova verticais e inclinados. Portanto, foram utilizados três métodos de ensaio, cada um baseado em normativas e metodologias previamente estabelecidas na literatura e em normas técnicas, garantindo uma abordagem abrangente e comparativa. Ao todo, foram ensaiados 180 corpos de prova, correspondentes a 60 corpos de prova por método (20 para cada direção da madeira).

O primeiro método avaliado foi o ensaio de flexão com vão variável, baseado na norma ASTM D198 (2015). Esse ensaio possibilitou a obtenção das propriedades mecânicas da MLCC a partir da variação do vão de apoio.

O segundo ensaio realizado correspondeu ao cisalhamento inclinado, fundamentado na metodologia utilizada por Silva (2023), a qual foi baseada nos estudos de Ehrhart *et al.* (2015). Esse método é derivado do ensaio por pratos colados, conforme descrito na norma ASTM D2718 (2018), que é amplamente empregado para a caracterização da rigidez e da resistência ao *rolling shear*.

Por fim, foi realizado o terceiro método de ensaio de cisalhamento vertical, baseado na norma ABNT NBR 7190-7:2022. Esse ensaio, devido a disponibilidade do equipamento de ensaio, foi conduzido no Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LaMEM) do Departamento de Engenharia de Estruturas (SET) da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP), localizado na cidade de São Carlos-SP.

4.6.1 Ensaio de flexão com vão variável

O ensaio consistiu na aplicação de carregamento em flexão de três pontos sobre um corpo de prova apoiado em dois extremos, sendo submetido a diferentes configurações de vão. A cada nova configuração, variando a distância entre os apoios, foram medidas a força aplicada e o deslocamento resultante no ponto médio da viga. Ao todo, foram ensaiados 60 corpos de prova, distribuídos igualmente entre as três direções da madeira (20 corpos de prova por direção).

A principal vantagem desse ensaio foi a possibilidade de distinguir a influência das deformações devido à flexão e ao cisalhamento. Em vãos curtos, a deformação é dominada pelo cisalhamento, enquanto em vãos maiores, a flexão assume um papel mais significativo. Assim, ao realizar múltiplas medições com diferentes vãos, foi possível obter uma separação mais precisa dessas contribuições, resultando em uma estimativa mais confiável do módulo de cisalhamento do material.

A norma especifica que os corpos de prova utilizados no ensaio de vão variável devem possuir seção transversal retangular e serem preferencialmente retos ou com uma leve curvatura. A escolha do comprimento do corpo de prova deve permitir a realização do ensaio em pelo menos quatro diferentes configurações de vão, mantendo a mesma seção transversal ao longo de cada uma delas.

A Equação 42, é estipulada pela norma ASTM D198 – 15, como critério para a escolha dos vãos utilizados no ensaio de vão variável:

$$0,0025 \leq \left(\frac{d}{l}\right)^2 \leq 0,035 \quad (42)$$

onde:

d: altura do corpo de prova, em mm;

l: comprimento do corpo de prova, em mm.

Para facilitar a aplicação desse critério e padronizar os ensaios, a norma sugere valores fixos de razões vão-altura (l/d) que devem ser utilizados na definição dos vãos do ensaio. Os valores recomendados incluíram 5,5; 6,5; 8,5 e 20,0, garantindo que os ensaios fossem conduzidos dentro da faixa estipulada da Equação 42. Essa padronização permitiu uma distribuição adequada dos vãos testados.

A norma menciona que o deslocamento da viga durante o ensaio deve atender ao critério de $L_0/300$, onde L_0 é o vão entre os apoios. Esse critério foi utilizado para garantir que não fosse ultrapassado o limite elástico do material durante o ensaio.

Foram confeccionados 20 corpos de prova para cada direção, sendo que o corpo de prova utilizado para a realização do ensaio de vão variável possuía dimensões de 1200 mm de comprimento, 110 mm de largura e 48 mm de altura. Essa configuração foi escolhida de modo a atender às exigências normativas, permitindo a

realização do ensaio em pelo menos quatro diferentes configurações de vão. Além disso, essa geometria possibilita a obtenção das razões vão-altura (l/d) recomendadas pela norma, que incluíram os valores de 5,5; 6,5; 8,5 e 20,0. A Tabela 3 mostra os valores das distâncias entre apoios para o ensaio e o deslocamento que a viga irá realizar (flecha).

Tabela 3 – Relação vão/profundidade e deslocamento da viga para o ensaio de vão variável.

Relação Vão/Profundidade (l/d)	Vão (l) [mm]	Deslocamento ($l/300$) [mm]
5,5	264	0,88
6,5	312	1,04
8,5	408	1,36
20	960	3,20

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Na Tabela 3, os vãos utilizados no ensaio de vão variável foram definidos de acordo com as recomendações da norma, que sugeria valores fixos para a relação vão/profundidade (l/d). Com base na altura do corpo de prova, que foi de 48 mm, os vãos foram calculados multiplicando essa altura pela relação correspondente. Assim, os vãos determinados para o ensaio foram 264 mm, 312 mm, 408 mm e 960 mm, respectivamente.

O ensaio foi realizado em uma máquina universal de ensaios, da marca EMIC com capacidade de 300 KN, com aplicação de carga controlada e sistema de medição de deslocamentos. O corpo de prova foi posicionado sobre dois apoios simples, permitindo a rotação livre nas extremidades. No centro do vão, foi aplicada uma carga concentrada, garantindo que a viga estivesse submetida à flexão em três pontos. A força aplicada foi controlada de modo a não ultrapassar o regime elástico do material, garantindo que as deformações registradas não ultrapassassem o regime elástico do material. Para isso, foi utilizado um sensor de deslocamento do tipo LVDT, posicionado no ponto médio do corpo de prova, conforme exigido pela norma. A configuração do ensaio pode ser observada na Figura 39.

Figura 39 – Configuração do ensaio de vão variável para corpo de prova P90.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Inicialmente, o corpo de prova foi submetido ao primeiro vão definido ($l = 264 \text{ mm}$), garantindo que sua posição estivesse devidamente alinhada com os apoios e o dispositivo de aplicação de carga. A carga foi aplicada de forma gradual e contínua, respeitando a taxa de deslocamento estabelecida pela norma, de modo que o tempo médio até a carga máxima fosse de pelo menos 4 minutos para cada corpo de prova. Esse controle na velocidade de carregamento assegurou que as respostas mecânicas do material fossem obtidas de forma precisa, minimizando efeitos de carregamento dinâmico que possam influenciar os resultados.

O valor da carga aplicada foi medido simultaneamente por meio de uma célula de carga acoplada ao atuador da máquina de ensaios. Após a obtenção dos dados para a primeira configuração de vão, a carga foi completamente descarregada e o corpo de prova foi reposicionado para o próximo vão definido pela norma. O mesmo procedimento foi repetido para os vãos subsequentes de 312 mm, 408 mm e 960 mm, respeitando os critérios de carregamento e medição de deslocamentos. O módulo de elasticidade aparente para todos os vãos foi calculado de acordo com a Equação 43.

$$E_{m,app} = \frac{L_0^3 \cdot (F_{0,3\%} - F_{0,15\%})}{48 \cdot I_{eff} \cdot (u_{0,3\%} - u_{0,15\%})} \quad (43)$$

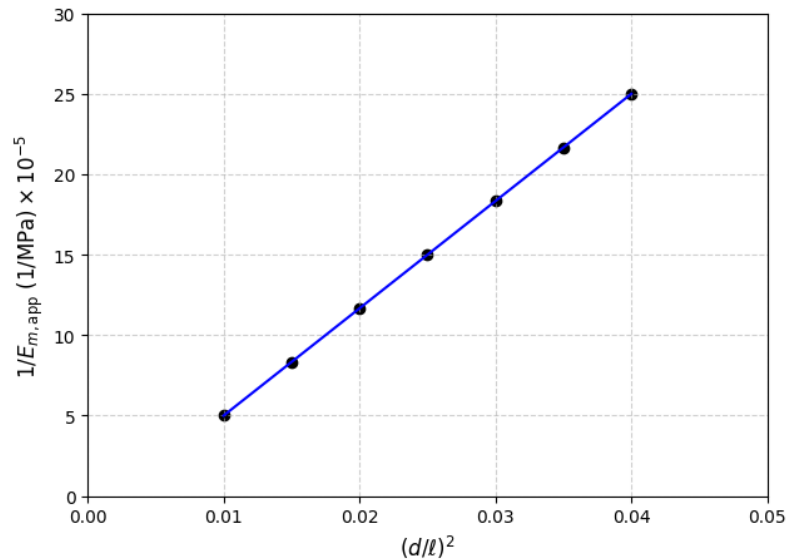
Onde:

$E_{m,app}$: módulo de elasticidade aparente do corpo de prova, em MPa;

$F_{0,3\%}$: força no meio do vão com flecha igual a 30% do vão livre, em N;
 $F_{0,15\%}$: força no meio do vão com flecha igual a 15% do vão livre, em N;
 I_{eff} : momento de inércia do elemento de MLCC, em mm^4 ;
 $u_{0,3\%}$: flecha no meio do vão devido a aplicação de $F_{0,3\%}$, em mm;
 $u_{0,15\%}$: flecha no meio do vão devido a aplicação de $F_{0,15\%}$, em mm.

A determinação do módulo de cisalhamento (G_{vt}) no ensaio de vão variável foi realizada a partir da relação entre o módulo de elasticidade aparente ($E_{m,app}$) e a razão geométrica $(d/l)^2$. Para isso, inicialmente, calculou-se $E_{m,app}$ para cada configuração de vão testada, e em seguida, foi obtido o valor de $1/E_{m,app}$. Paralelamente, a razão $(d/l)^2$ foi determinada para cada configuração de vão, considerando a altura do corpo de prova (d) e o respectivo vão (l). Com esses valores, construiu-se um gráfico onde $1/E_{m,app}$ foi plotado no eixo Y e $(d/l)^2$ no eixo X, conforme Figura 40. A partir dos pontos obtidos, ajustou-se uma reta de regressão linear, cuja inclinação é denominada K_1 .

Figura 40 – Gráfico de $1/E_{m,app}$ vs. $(d/l)^2$ para Determinação de K_1



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Para seções transversais retangulares, a norma estabelece que o módulo de cisalhamento G_{vt} pode ser determinado pela Equação 44.

$$G_{vt} = \frac{6}{5 \cdot K_1} \quad (44)$$

Onde:

Gvt: rigidez ao *rolling shear*, em MPa;

K₁: inclinação da reta de regressão linear no gráfico de $1/E_{m,app}$ versus $(d/l)^2$, em 1/MPa.

A resistência ao *rolling shear* (f_{vt}) foi determinada a partir da aplicação de um carregamento sobre uma viga de MLCC até sua ruptura, seguindo um único ciclo de carregamento. O ensaio foi conduzido com um vão de 288 mm, adotado conforme a recomendação de que o vão seja equivalente a seis vezes a altura da peça. Essa escolha foi pela facilidade de obtenção da resistência durante o ensaio dentro da capacidade da máquina de ensaios.

A resistência ao *rolling shear* foi determinada utilizando a Equação 45, conforme descrita por Santos (2016). Essa equação estabelece a relação entre a carga máxima suportada pela viga e a área resistente ao cisalhamento, possibilitando a obtenção do valor de f_{vt} . Dessa forma, o ensaio permitiu a quantificação da capacidade da MLCC de resistir às tensões de cisalhamento, contribuindo para a caracterização do comportamento estrutural desse material em aplicações práticas.

$$f_{vt} = \frac{3 \cdot F_{max}}{4 \cdot w \cdot h} \quad (45)$$

Onde:

f_{vt} : resistência ao *rolling shear*, expressa em MPa;

F_{max} : carga máxima aplicada até a ruptura da viga de MLCC, em N;

w: largura da viga, em mm;

h: altura da viga, em mm.

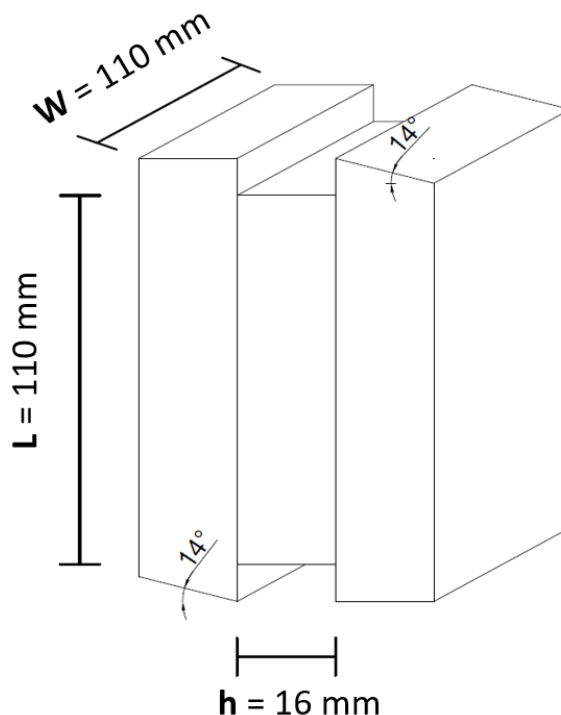
4.6.2 Ensaio de cisalhamento inclinado

A metodologia inicial empregada no ensaio de cisalhamento inclinado foi baseada no modelo de corpo de prova descrito por Ehrhart *et al.* (2015). No entanto, Silva (2023) realizou adaptações no modelo, uma vez que os ensaios preliminares indicaram falhas nas lamelas externas alongadas, que sofreram ruptura antes da

ocorrência do *rolling shear* na camada interna. A configuração do corpo de prova foi ajustada, encurtando-se as lamelas externas, de modo a evitar falhas prematuras e garantir uma análise mais precisa da resistência e rigidez ao *rolling shear*.

Para o ensaio de cisalhamento inclinado, foi utilizado o modelo de corpo de prova baseado em Silva (2023), desenvolvido a partir de adaptações no modelo inicial descrito por Ehrhart *et al.* (2015), ilustrado na Figura 20. A lamela central do corpo de prova apresentava dimensões de 110 mm de largura (w) e 110 mm de altura (L), com espessura de 16 mm (h_2), conforme ilustrado na Figura 41, cujos detalhes de ensaio estão apresentados na Figura 42. Para possibilitar a aplicação da carga de forma inclinada, foi realizado um corte nas extremidades do corpo de prova, formando um ângulo de 14° em relação à base, permitindo que a amostra ficasse inclinada no dispositivo de ensaio. Ao todo, foram ensaiados 60 corpos de prova, distribuídos igualmente entre as três direções da madeira (20 corpos de prova por direção).

Figura 41 – Dimensões adotadas para o corpo de prova de cisalhamento inclinado



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O ensaio foi realizado em uma máquina de ensaio universal EMIC disponível da UNESP de Itapeva, onde foram aplicadas forças na direção inclinada do corpo de prova. Para medir o deslocamento relativo entre as lamelas, foram utilizados relógios comparadores (um em cada lado do corpo de prova), que foi fixado na

primeira lamela, onde não foi aplicada carga. A medição ocorreu a partir do deslocamento entre o relógio comparador e uma haste metálica, que estava fixada na lamela onde a carga foi aplicada, permitindo um monitoramento preciso do movimento relativo entre as camadas do corpo de prova, conforme ilustrado na Figura 42.

Figura 42 – Configuração do ensaio de cisalhamento inclinado



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Os corpos de prova de cisalhamento inclinados foram carregados até 50% da carga máxima prevista, baseado na força máxima determinada na ruptura de um corpo de prova gêmeo. A rigidez ao *rolling shear* foi calculada pela Equação 46 considerando-se a média dos deslocamentos obtidos pelos dois relógios comparadores.

$$G_{vt} = \frac{(F_{50\%} - F_{25\%}) \cdot h_2 \cdot \cos(14^\circ)}{(u_{50\%} - u_{25\%}) \cdot w \cdot L} \quad (46)$$

Onde:

G_{vt} : rigidez ao *rolling shear*, em MPa;

$F_{50\%}$: força equivalente a 50% da carga de ruptura estimada, em N;

$F_{25\%}$: força equivalente a 25% da carga de ruptura estimada, em N;

h_2 : altura da camada interna, que sofre o *rolling shear*, em mm;

$u_{50\%}$: flecha no meio do vão devido à aplicação de $F_{0,3\%}$, em mm;

$u_{25\%}$: flecha no meio do vão devido à aplicação de $F_{0,15\%}$, em mm;

w : é a largura do elemento de MLCC, em mm;

L : é o comprimento do elemento de MLCC, em mm.

Posteriormente aos ensaios de determinação da rigidez ao *rolling shear*, foram removidos os relógios comparadores e os corpos de prova foram carregados até a ruptura. A resistência ao *rolling shear* (f_{vt}) foi determinada por uso da Equação 47.

$$f_{vt} = \frac{F_{max} \cdot \cos 14^\circ}{w \cdot L} \quad (47)$$

Onde:

f_{vt} : resistência ao *rolling shear*, em MPa;

F_{max} : carga máxima aplicada até a ruptura da viga de MLCC, em N;

w : largura do corpo de prova, em mm;

L : altura do corpo de prova, em mm.

4.6.3 Ensaio de cisalhamento vertical

O ensaio de cisalhamento foi baseado no método alternativo descrito na ABNT NBR 7190-7:2022, em seu item 6.3. Esse método permite a avaliação direta do comportamento das camadas ortogonais do painel quando submetidas a esforços predominantes de cisalhamento, constituindo uma alternativa aos ensaios baseados em flexão. Ao todo, foram ensaiados 60 corpos de prova, distribuídos igualmente entre as três direções da madeira (20 corpos de prova por direção).

No presente estudo, a largura do corpo de prova foi definida pela espessura total do painel de MLCC, composta por três camadas de lamelas com espessura

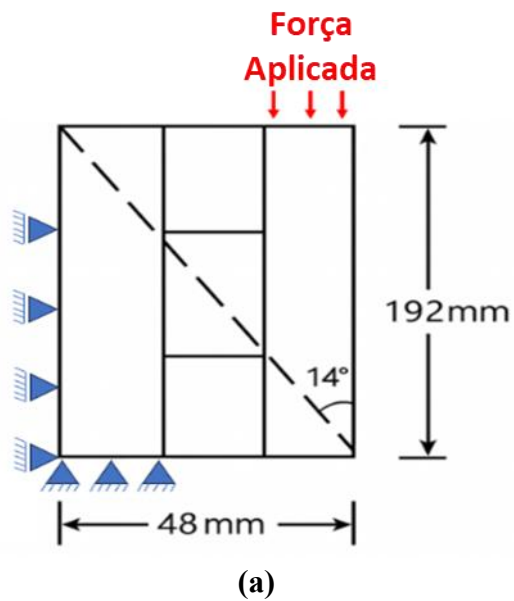
individual de 16 mm, resultando em uma espessura total de 48 mm, de modo que a interface colada tivesse a mesma área usada para o corpo de prova de cisalhamento inclinado. A partir dessa dimensão, a altura do corpo de prova foi determinada de modo a atender à exigência geométrica do ângulo de 14° , conforme recomendado pela ABNT NBR 7190-7:2022. Dessa forma, adotou-se uma altura de 192 mm, correspondente a quatro vezes a espessura do painel, garantindo a correta inclinação do corpo de prova no dispositivo de ensaio e a adequada transferência dos esforços de cisalhamento para a camada transversal.

Na Figura 43 é possível observar a geometria, as dimensões e o arranjo experimental do ensaio de cisalhamento vertical. Conforme ilustrado na Figura 43(a), a carga foi aplicada de forma distribuída na lamela superior, induzindo esforços predominantemente de cisalhamento transversal (*rolling shear*) na camada ortogonal. A base do corpo de prova foi travada verticalmente, enquanto os deslocamentos horizontais foram restringidos, permitindo apenas o deslizamento vertical.

Para a medição do deslocamento relativo entre as lamelas, foram parafusadas hastes de madeira às lamelas externas, possibilitando o acoplamento de dois transdutores de deslocamento linear do tipo LVDT, sendo um em cada lado do corpo de prova, com percurso máximo de 25 mm, conforme ilustrado na Figura 43(b). Esse arranjo experimental permitiu que a leitura do transdutor correspondesse diretamente ao movimento relativo entre as camadas do painel, reduzindo a influência de deformações globais do corpo de prova e assegurando maior representatividade das medições associadas ao cisalhamento transversal.

O ensaio foi conduzido em máquina universal de ensaios da marca AMSLER com capacidade de 250 t, com aplicação de carregamento monotônico crescente, garantindo condições de carregamento quase estático durante todo o procedimento experimental. As Figuras 43(c) e 43(d) apresentam a instrumentação adotada e o arranjo experimental final do corpo de prova posicionado na máquina de ensaios.

Figura 43 – Configurações do ensaio de cisalhamento vertical: (a) Geometria e dimensões do corpo de prova; (b) Hastes de madeira parafusadas às lamelas externas; (c) Instrumentação do ensaio, com transdutores de deslocamento apoiados nas hastes e fixados lateralmente; (d) Arranjo experimental do corpo de prova na máquina de ensaios



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A rigidez ao *rolling shear* (G_{vt}) foi determinada no regime elástico a partir da inclinação da curva força–deslocamento, considerando-se os deslocamentos de 0,75 mm e 1,00 mm, sendo calculada por meio da Equação (48).

$$G_{vt} = \frac{(F_2 - F_1) \cdot t_{cam} \cdot \cos(14^\circ)}{(d_2 - d_1) \cdot b \cdot c} \quad (48)$$

Onde:

G_{vt} : rigidez ao *rolling shear*, em MPa;

F_2 : força equivalente a 40% da carga de ruptura estimada, em N;

F_1 : força equivalente a 10% da carga de ruptura estimada, em N;

h_{cam} : espessura da camada, em mm;

d_2 : deslocamento correspondentes a 40 % da força máxima em mm;

d_1 : deslocamento correspondentes a 10 % da força máxima em mm;

b : largura do elemento de MLCC, em mm;

c : comprimento do elemento de MLCC, em mm.

Em seguida, os corpos de prova foram carregados até a ruptura, e a resistência ao *rolling shear* (f_{vt}) foi obtida a partir da carga máxima registrada no ensaio, conforme a Equação (49).

$$f_{vt} = \frac{F_{max}}{w \cdot L} \quad (49)$$

Onde:

f_{vt} : resistência ao *rolling shear*, em MPa;

F_{max} : carga máxima aplicada até a ruptura da viga de MLCC, em N;

w : largura do corpo de prova, em mm;

L : altura do corpo de prova, em mm.

4.7 AVALIAÇÃO ANALÍTICA DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DO PAINEL MLCC ENSAIADO COM BASE NO MÉTODO GAMA

Com o objetivo de complementar os resultados experimentais, realizou-se uma verificação analítica do comportamento estrutural dos painéis de MLCC na flexão por meio do Método Gama. Foram avaliadas as verificações nos Estados Limites Últimos (ELU), incluindo tensões de compressão paralela às fibras na lamela superior, tração paralela às fibras na lamela inferior e cisalhamento na camada transversal, bem como no Estado Limite de Serviço (ELS), por meio da flecha no meio do vão. Os valores analíticos obtidos foram comparados aos resultados experimentais do painel ensaiado, permitindo avaliar a coerência do modelo na representação do

comportamento estrutural dos painéis com diferentes defasagens angulares da camada central, como também avaliar se o modelo representou corretamente os modos de ruptura obtidos na fase experimental.

4.7.1.1 Determinação dos parâmetros do Método Gama

Nesta subseção apresenta-se como foram determinados os parâmetros necessários para a aplicação do Método Gama à configuração P90. Foram adotados os seguintes valores de entrada: largura da seção transversal $w = 110$ mm; espessuras das camadas superior, intermediária e inferior $h_1 = h_2 = h_3 = 16$ mm; vão entre apoios $L_0 = 288$ mm; módulo de elasticidade das camadas longitudinais superior e inferior $E_1 = E_3 = 6252$ MPa, determinado a partir da caracterização experimental da madeira de *Pinus elliottii*; módulo de elasticidade da camada transversal $E_2 = E_{c90} = 312,6$ MPa, adotando-se a relação $E_{c90} = E_{c0}/20$ conforme estabelecido na ABNT NBR 7190-3; e rigidez ao *rolling shear* G_v MPa, correspondente ao valor experimental obtido para o corpo de prova considerado na análise, determinado a partir do respectivo método de ensaio realizado.

Inicialmente, procedeu-se à determinação das áreas das seções transversais das camadas longitudinais superior e inferior. De acordo com as Equações (3) e (4), obteve-se as áreas A_1 e A_3 , ambas iguais, em função da largura da viga e da espessura das respectivas camadas.

Na sequência, determinou-se os coeficientes redutores de rigidez do Método Gama. Considerando a simetria geométrica e mecânica das camadas longitudinais superior e inferior, adotou-se $\gamma_3 = 1$, conforme a Equação (6). O coeficiente γ_1 , associado à camada superior, foi calculado por meio da Equação (5), na qual se considera explicitamente a rigidez ao *rolling shear* da camada transversal, o vão entre apoios e as propriedades geométricas e mecânicas das camadas longitudinais.

Em seguida, foram determinadas as distâncias entre os centroides das camadas longitudinais e a linha neutra da seção composta. Inicialmente, foi calculada a distância entre o centroide da camada inferior e a linha neutra da seção, a_3 , por meio da Equação (2). Em seguida, determinou-se a distância entre o centroide da camada superior e a linha neutra da seção, a_1 , conforme a Equação (1).

Na sequência, foram calculados os momentos de inércia das camadas longitudinais superior e inferior em relação aos seus respectivos centroides, conforme as Equações (7) e (8). Como as camadas superior e inferior possuem as mesmas dimensões geométricas, os momentos de inércia resultaram iguais, sendo representados por $I_1 = I_3$.

Por fim, foi determinada a rigidez efetiva à flexão do elemento, E_{eff} , por meio da Equação (9).

4.7.1.2 Verificação de ELU

Antes das verificações dos Estados Limites Últimos, foram determinados os parâmetros necessários à análise estrutural do elemento de MLCC, incluindo o momento fletor máximo e a força cortante. Para um elemento biapoiado submetido a um carregamento concentrado aplicado no meio do vão, o momento fletor máximo (M) foi calculado conforme a Equação (10), enquanto a força cortante (V) foi determinada de acordo com a Equação (14). Como valor de carregamento, adotou-se a carga de ruptura obtida experimentalmente para o corpo de prova analisado, considerando o respectivo método de ensaio.

As resistências à compressão paralela às fibras (f_{c0}) e à tração paralela às fibras (f_{t0}) foram obtidas a partir dos resultados experimentais dos ensaios realizados na madeira, conforme apresentado na Tabela 2. Já a resistência ao *rolling shear* da camada transversal (f_{vt}) foi determinada a partir dos resultados experimentais dos diferentes métodos de ensaio aplicados aos painéis de MLCC, sendo os valores adotados nas análises analíticas apresentados na Tabela 4.

As avaliações associadas aos Estados Limites Últimos (ELU) foram realizadas por meio do cálculo da tensão de compressão na lamela superior ($\sigma_{c0,1}$), da tensão de tração na lamela inferior ($\sigma_{t0,3}$) e da tensão de cisalhamento por *rolling shear* na camada transversal (τ_{vt}), conforme expressões apresentadas nas Equações (11), (12) e (13), respectivamente.

4.7.1.3 Verificação de ELS

A verificação do Estado Limite de Serviço (ELS) foi realizada por meio do cálculo da flecha vertical no meio do vão do painel de MLCC submetido a uma carga

concentrada aplicada no centro do vão. O deslocamento vertical no meio do vão (δy) foi determinado considerando comportamento elástico linear (para uma carga equivalente a 38,4% da carga de ruptura, equivalente ao deslocamento limite teórico $L_0/300$ que foi igual a 0,96 mm) e a rigidez efetiva à flexão (E_{eff}), conforme a Equação (15).

4.7.2 Parâmetros experimentais utilizados na aplicação do Método Gama Avaliação do Método Gama para os painéis P45 e P30

Nesta seção são apresentados os demais dados de entrada considerados para o Método Gama para as configurações P90, P45 e P30, considerando os diferentes ensaios realizados.

A geometria da viga e as propriedades elásticas das camadas longitudinais e transversais foram mantidas constantes, variando-se apenas a carga de ruptura (P_{rup}) e os parâmetros experimentais associados ao comportamento ao *rolling shear* da camada transversal, representados pela rigidez G_{vt} e pela resistência f_{vt} , obtidos a partir dos respectivos ensaios. Esses valores podem ser observados na Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros experimentais associados ao *rolling shear* e às cargas experimentais utilizados nas análises pelo Método Gama.

Método de ensaio	Configuração	P_{rup} (N)	P_{flecha} (N)	G_{vt} (MPa)	f_{vt} (MPa)
Vão variável	P90	17260,35	9012,74	208,42	2,01
	P45	19110,62	11245,88	312,57	2,08
	P30	23548,91	11873,26	338,16	2,19
Cisalhamento inclinado	P90	15194,63	8684,41	121,73	1,88
	P45	18076,54	9362,18	149,88	1,95
	P30	18810,77	10140,92	207,56	1,98
Cisalhamento vertical	P90	13134,75	9425,63	189,47	1,93
	P45	18954,18	10892,56	195,84	2,04
	P30	20572,66	11945,37	204,21	2,05

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Posteriormente, os resultados obtidos foram comparados com os modos de ruptura observados experimentalmente, com o objetivo de verificar se o modelo foi capaz de prever o mecanismo de falha ocorrido nos ensaios.

Para a comparação entre os resultados analíticos obtidos pelo Método Gama e os mecanismos de ruptura observados experimentalmente, foi selecionado um corpo de prova representativo para cada combinação entre método de ensaio e configuração do painel. A seleção priorizou amostras que apresentaram ruptura claramente caracterizada por *rolling shear* na camada transversal, permitindo avaliar diretamente se o modelo analítico foi capaz de prever esse mecanismo de falha predominante. Dessa forma, os corpos de prova escolhidos corresponderam àqueles que melhor evidenciaram o comportamento típico de ruptura associado ao *rolling shear* nos painéis de MLCC analisados.

Para a avaliação da capacidade preditiva do Método Gama, foram analisadas as relações entre as tensões analíticas obtidas pelo modelo e as resistências experimentais determinadas para as lamelas do painel. Essas relações foram expressas na forma de índices de verificação estrutural, definidos pela razão entre a sollicitação analítica e a respectiva resistência experimental do material. Assim, foram calculadas as relações correspondentes à compressão paralela às fibras (σ_{c01}/f_{c0}), à tração paralela às fibras (σ_{t03}/f_{t0}) e ao cisalhamento por *rolling shear* (τ_{vt}/f_{vt}).

A interpretação desses índices foi realizada com base no critério usual de verificação estrutural. Valores inferiores à unidade indicaram que a tensão analítica prevista pelo modelo permaneceu abaixo da resistência experimental correspondente, não caracterizando condição de ruptura segundo o modelo analítico. Por outro lado, valores superiores à unidade indicaram que a sollicitação analítica ultrapassou a resistência experimental, sendo interpretados como indicação de ruptura prevista pelo modelo para o respectivo mecanismo resistente.

Nos casos em que mais de um mecanismo apresentou valor superior à unidade, foi considerado como mecanismo de ruptura previsto pelo modelo aquele associado ao maior índice sollicitação/resistência, por representar a condição mais crítica dentre as verificações realizadas. Esse procedimento permitiu comparar diretamente o mecanismo de ruptura indicado pelo modelo analítico com aquele observado experimentalmente nos corpos de prova selecionados.

Os cálculos necessários para a aplicação do Método Gama às diferentes configurações e métodos de ensaio foram automatizados por meio de um *script*

desenvolvido em linguagem *Python*. Esse procedimento permitiu a determinação sistemática das tensões associadas aos Estados Limites Últimos e dos deslocamentos associados aos Estados Limites de Serviço para cada configuração analisada, garantindo consistência, rastreabilidade e repetibilidade dos resultados. O código completo utilizado nas análises é apresentado no Apêndice A.

4.8 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS OBTIDOS

A análise estatística dos valores de rigidez ao *rolling shear* (G_{vt}) foi realizada de forma independente para cada método de ensaio, considerando as três configurações de defasagem angular da camada central (P90, P45 e P30). Inicialmente, a normalidade dos dados foi avaliada por meio do teste de Shapiro–Wilk. Em seguida, a homogeneidade das variâncias foi verificada pelo teste de Bartlett. Atendidos os pressupostos de normalidade ($p > 0,05$), procedeu-se à aplicação da análise de variância (ANOVA) para verificar a existência de diferenças estatisticamente significativas entre os grupos. Quando identificada significância estatística ($p < 0,05$), foi empregado o teste de comparações múltiplas de Tukey, ao nível de 5% de significância, para identificação dos pares de médias que diferiram entre si. Todas as análises estatísticas foram realizadas com o auxílio da linguagem de programação Python, empregando bibliotecas específicas para tratamento e análise de dados estatísticos.

5 RESULTADOS

Nesta seção, são apresentados e discutidos os resultados obtidos nesta pesquisa. Os resultados apresentados são referentes à caracterização da madeira utilizada, à qualidade de colagem, aos testes de flexão com vão variável e de cisalhamento direto em corpos de prova inclinados e vertical, bem como as verificações analíticas do comportamento dos painéis MLCC segundo método gama.

5.1 RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA

A Tabela 5 apresenta os valores da caracterização física e mecânica para a madeira de *Pinus elliottii*. Além disso, são fornecidos os valores médios e o desvio padrão, permitindo uma análise estatística da dispersão dos dados.

Tabela 5 – Resultados da caracterização física e mecânica da madeira de *Pinus elliottii* (U=12%)

Corpo de Prova	ρ_{12} [kg/m ³]	f_{c012m} [MPa]	E_{c012m} [MPa]	f_{t012m} [MPa]	f_{v012m} [MPa]
CP1	337,42	26,82	5723	36,83	4,17
CP2	356,24	23,01	6213	28,55	4,82
CP3	383,38	27,73	6351	31,01	4,04
CP4	368,57	32,98	6972	41,44	4,24
CP5	355,31	22,43	5582	31,14	4,73
CP6	349,62	21,45	6667	28,94	2,16
Média	358,42	25,74	6252	32,99	4,03
Desvio Padrão	14,48	3,97	488,32	4,65	0,88

ρ_{12} = densidade aparente a 12% de umidade; f_{c012m} = resistência à compressão paralela às fibras a 12% de umidade; E_{c012m} = módulo de elasticidade na compressão a 12% de umidade; f_{t012m} = resistência à compressão paralela às fibras a 12% de umidade; f_{v012m} = resistência ao cisalhamento paralelo às fibras a 12% de umidade

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Os valores obtidos para os corpos de prova variaram de 337,42 kg/m³ a 383,38 kg/m³, com uma média de 358,42 kg/m³ e um desvio padrão de 14,48 kg/m³.

Essa variação já era esperada, pois a madeira é um material natural com características anisotrópicas, sendo influenciada por fatores como a espécie utilizada, a idade da árvore, as condições de crescimento e a disposição dos anéis de crescimento.

No Brasil, a ABNT NBR 7190-1 (2022) sugere que devam ser empregadas lamelas de madeira com densidade aparente a 12% entre 400 kg/m³ e 750 kg/m³. Madeiras com densidades menores, em comparação com os valores médios da respectiva espécie, indicam que as árvores foram abatidas com menor tempo de crescimento (Melo *et al.*, 2013).

Em relação à resistência à compressão, os valores variaram entre 21,45 MPa e 32,98 MPa, com uma média de 25,74 MPa e desvio padrão de 3,97 MPa. O módulo de elasticidade médio foi de 6.252 MPa, com valores variando de 5.523 MPa a 6.697 MPa, e desvio padrão de 488,32 MPa. Quanto à resistência ao cisalhamento, os valores oscilaram entre 2,16 MPa e 4,82 MPa, com média de 4,03 MPa e desvio padrão de 0,88 MPa. Com base nos valores de resistência obtidos, a madeira utilizada nessa pesquisa se enquadra na classe de resistência C18, segundo ABNT NBR 7190-1 (2022).

5.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE DELAMINAÇÃO

A Tabela 6 apresenta os valores médios de delaminação total observados, para 20 corpos de prova, assim como os respectivos desvios padrão e coeficiente de variação, considerando P90 para MLCC em pinus com camadas orientadas à 90°, bem como P45 à 45° e P30 à 30°, respectivamente.

Tabela 6 – Resultados médios de delaminação total, em porcentagem.

Identificação	Delaminação média (%)	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação (%)
P90	3,98	2,04	51,26
P45	3,55	1,67	47,04
P30	3,02	1,53	50,66

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Ao analisar os resultados da Tabela 3, observou-se que os valores médios de delaminação variaram de 3,02% (P30) a 3,98% (P90), indicando uma leve diminuição da delaminação conforme o ângulo de defasagem da camada central se afasta de 90°.

Destaca-se que os valores obtidos se encontram dentro dos limites usualmente reportados na literatura para painéis de madeira de pinus, indicando adequada resistência da colagem e ausência de falhas significativas nas interfaces adesivas. As variações observadas entre as diferentes configurações foram de pequena magnitude, não comprometendo a interpretação geral dos resultados, a qual evidencia comportamento semelhante entre os painéis avaliados.

Os resultados obtidos neste estudo podem ser comparados com aqueles reportados por Silva (2023), que investigou painéis de MLCC produzidos com madeira de pinus sob condições semelhantes. O autor observou porcentagens de delaminação total inferiores a 10% para painéis confeccionados com *Pinus elliottii*, enquanto valores mais elevados, da ordem de 20% a 34%, foram registrados para outras espécies (cedro indiano e cedro australiano). Em comparação, os valores médios obtidos no presente trabalho, entre 3,02% e 3,98%, mostraram-se consideravelmente inferiores, indicando bom desempenho das linhas de cola para a combinação espécie/adesivo considerada.

Ao comparar os valores médios de delaminação entre os painéis, observou-se que o painel P90 apresentou uma delaminação cerca de 31,8% maior em relação ao P30, e 12,1% maior em relação ao P45. Já o painel P45 apresentou uma delaminação aproximadamente 17,6% superior em relação ao P30.

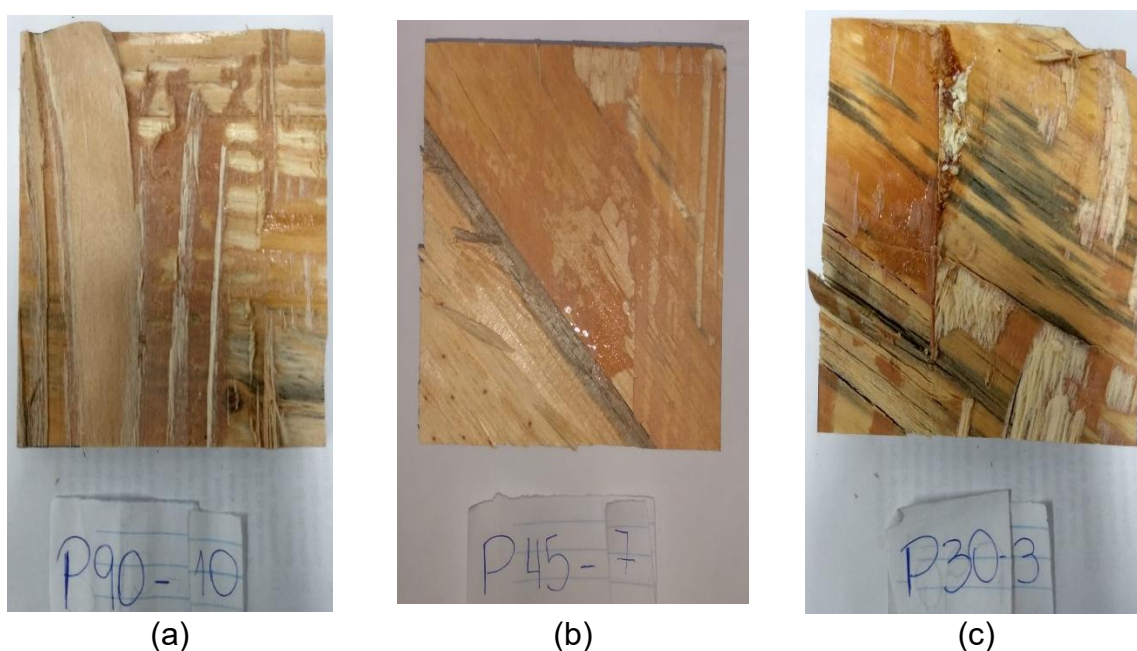
Esses dados reforçam a tendência de que a redução do ângulo de defasagem da camada central contribuiu para a diminuição da delaminação total, indicando que configurações com camadas centrais inclinadas em 30° e 45° favoreceram a integridade da colagem frente às variações de umidade impostas no ensaio. No entanto, cabe ressaltar que é necessário o aprofundamento de estudos a partir de expressivos graus de repetição, incluindo diferentes variedades de madeira de pinus e outros adesivos estruturais, para que a orientação das camadas centrais seja plausível e possível para qualquer configuração de manufatura do MLCC.

É importante destacar que não há um valor limite de delaminação estabelecido especificamente para MLCC na norma brasileira. A ABNT NBR 7190-7:2022 descreve os procedimentos para realização do ensaio, mas não define critérios

quantitativos de aceitação. No entanto, por analogia, na ausência de recomendações mais precisas, foram considerados os limites indicados na ABNT NBR 7190-6:2022, que trata da madeira lamelada colada (MLC). De acordo com essa norma, os valores máximos de delaminação total permitidos variam entre 4% e 10%, dependendo do tipo de madeira e da classe de exposição.

A Figura 44 mostra as aberturas observadas nas linhas de cola dos painéis P90, P45 e P30 após o ciclo de vácuo e pressão. As imagens evidenciam a ocorrência de delaminação nas diferentes faces dos corpos de prova, permitindo visualizar qualitativamente a extensão e a localização das falhas adesivas em função da orientação das camadas.

Figura 44 – Exemplos de delaminação nas linhas de cola observadas em diferentes faces dos corpos de prova após o ensaio de delaminação: (a) Painel P90 (90°); (b) Painel P45 (45°); (c) Painel P30 (30°).



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

5.3 RESULTADOS DO CISALHAMENTO NA LINHA DE COLA

Pela Tabela 7, apresentam-se os valores médios das resistências ao cisalhamento das linhas de cola, obtidos a partir de 20 corpos de prova para cada configuração, bem como os respectivos desvios padrão e coeficientes de variação.

Tabela 7 – Resultados médios da resistência média ao cisalhamento das linhas de cola.

Identificação	Resistência ao cisalhamento das linhas de cola [MPa]	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)
P90	4,04	0,85	21,04
P45	4,98	1,12	22,49
P30	4,91	1,06	21,59

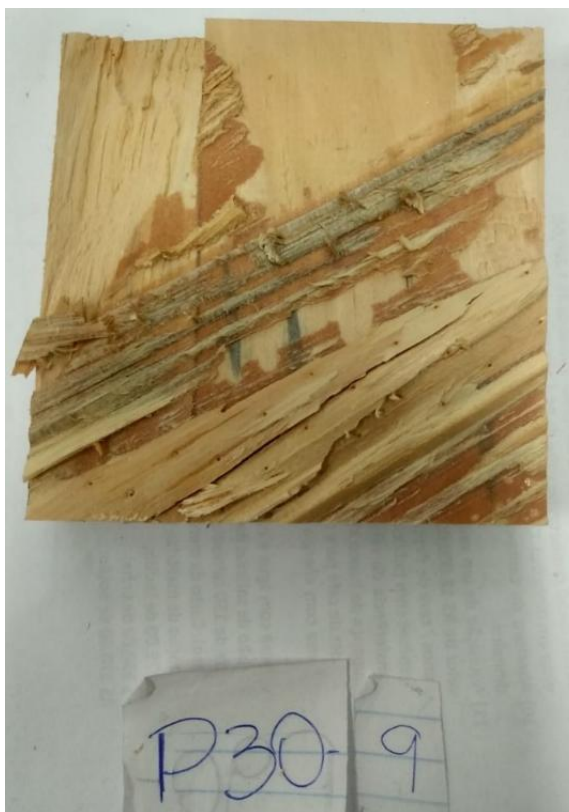
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Ao analisar os resultados, observou-se que os valores de resistência ao cisalhamento variaram entre 4,04 MPa (P90) e 4,98 MPa (P45). A menor média foi observada nos painéis com camada central a 90°, o que pode estar relacionado à orientação perpendicular das fibras centrais em relação às adjacentes. Já as configurações com defasagens angulares (45° e 30°) apresentaram maiores valores médios, indicando um desempenho superior das colagens sob essas condições estruturais. Os desvios padrão variaram de 0,85 MPa a 1,12 MPa, demonstrando uma dispersão moderada nos resultados.

Ao comparar os valores médios apresentados, observou-se que o painel P45 apresentou uma resistência ao cisalhamento cerca de 23,3% maior do que o painel P90, enquanto o painel P30 teve uma resistência aproximadamente 21,5% superior ao P90. A diferença entre os painéis P45 e P30 foi pequena, com o P45 apresentando uma resistência 1,4% maior que o P30. Esses resultados indicaram que a alteração angular da camada central contribuiu positivamente para o desempenho das colagens, reduzindo a concentração de tensões localizadas na linha de cola e promovendo uma distribuição mais equilibrada dos esforços ao longo da seção transversal dos painéis.

Na Figura 45 é apresentado um exemplo de corpo de prova após a ruptura no ensaio de cisalhamento da linha de cola, evidenciando as regiões onde ocorreram falhas na madeira e na adesão.

Figura 45 – Exemplo de corpo de prova P30 após a ruptura no ensaio de cisalhamento da linha de cola.

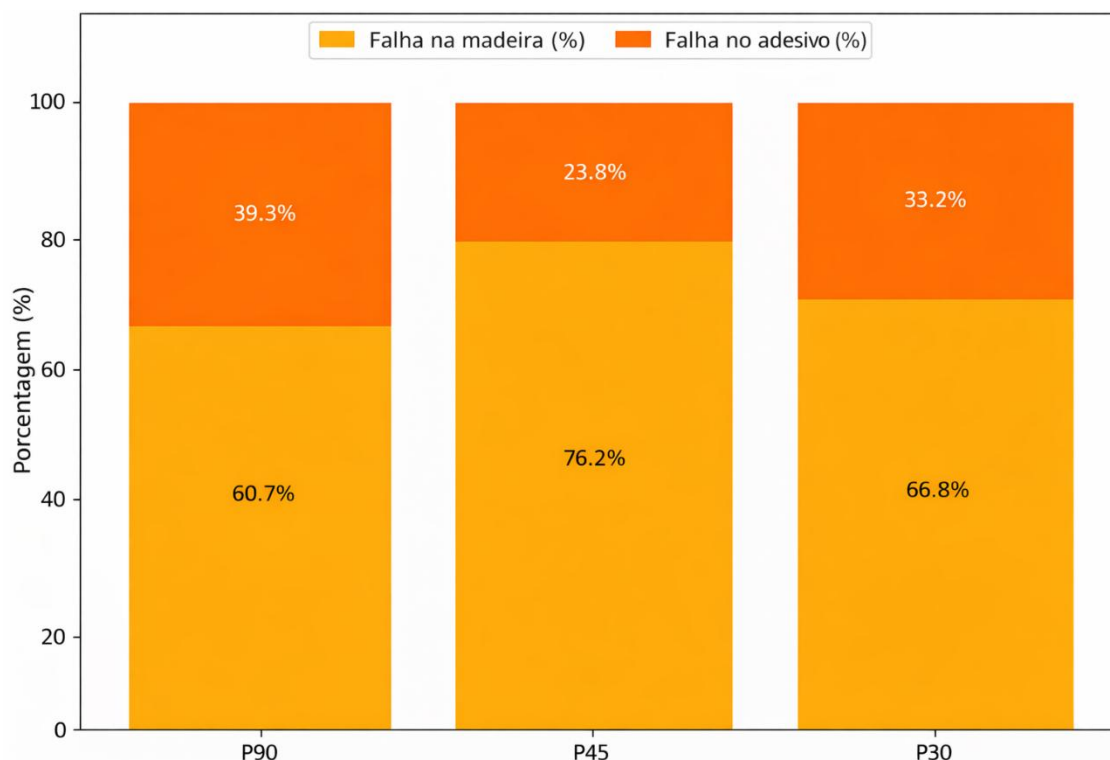


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Para a quantificação da área da linha de cola no ensaio de cisalhamento, foi utilizada a metodologia descrita na Seção 4.5.1. Como exemplo ilustrativo, apresenta-se o corpo de prova da Figura 44, cuja superfície de ruptura após o ensaio evidenciou regiões de falha na madeira e na adesão, permitindo a distinção e quantificação das áreas correspondentes.

Apresenta-se na Figura 46 os resultados da porcentagem de falha na madeira e na cola para os três tipos de painéis analisados: P90, P45 e P30.

Figura 46 – Porcentagem de falha na madeira e na linha de adesivo após ruptura –
Avaliação por ImageJ



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Além disso, a partir da análise das superfícies de ruptura realizadas no *software ImageJ*, foi possível observar uma relação direta entre a resistência ao cisalhamento na linha de cola e a porcentagem de área de madeira presente na interface de colagem após a ruptura dos corpos de prova. Ao observar os dados apresentados, notou-se que os painéis com camada central defasada (P45 e P30) apresentaram maior proporção de falha na madeira, com 76,2% para P45 e 66,8% para P30, em comparação a 60,7% para P90. Consequentemente, os valores de falha na linha de adesivo foram menores nessas configurações, indicando que a colagem foi mais eficaz nas amostras com defasagem angular.

Do ponto de vista técnico, essa predominância da falha na madeira é desejável, pois indica que a linha de adesivo resistiu satisfatoriamente aos esforços de cisalhamento, transferindo as tensões de forma eficiente entre as lamelas. Embora a ABNT NBR 7190-7:2022 não estabeleça valores mínimos de falha na madeira como critério de aceitação, normas internacionais, como a EN 16351, consideram percentuais superiores a 60% como indicativos de colagem adequada.

Além disso, segundo a EN 16351 (2015), a resistência ao cisalhamento da linha de cola entre lamelas ortogonais da MLCC será considerada suficiente, se o valor característico de resistência ao cisalhamento da linha de cola f_{vic} obtido no ensaio, for maior ou igual a $1,25 \text{ N/mm}^2$. Se a linha de cola ensaiada obtiver resistência de cisalhamento menor que $1,0 \text{ N/mm}^2$, a porcentagem de falha nesta linha de cola deverá ser considerada como sendo de 100%. Nesse caso, o método para MLCC não especifica claramente como deve ser quantificada a porcentagem de ruptura na madeira e no adesivo.

Embora tenham sido observadas variações nos valores médios de resistência ao cisalhamento das linhas de cola em função da inclinação da camada central, as diferenças obtidas foram de pequena magnitude e não alteram substancialmente a qualidade da colagem entre as lamelas. Nesse contexto, considerando a maior complexidade de fabricação associada às configurações com camadas inclinadas, os resultados indicaram que os benefícios observados na resistência das linhas de cola podem não justificar, do ponto de vista prático e produtivo, a adoção dessas alternativas em relação à configuração convencional a 90° . Assim, a orientação tradicional com 90° das camadas permanece uma solução tecnicamente adequada e mais viável para aplicações correntes.

5.4 RESULTADOS DOS PARÂMETROS DE *ROLLING SHEAR* PARA A MLCC

Nos itens seguintes são apresentados os resultados a resistência e a rigidez ao *rolling shear* a partir dos três métodos de ensaios considerados.

5.4.1 Resultados da rigidez associada ao efeito de *rolling shear*

Na Tabela 8, são apresentados os valores médios de rigidez ao *rolling shear* (G_{vt}), expressos em MPa, para as três configurações de defasagem angular da camada central (P90, P45 e P30), obtidos por meio dos ensaios de flexão com método do vão variável, cisalhamento inclinado e cisalhamento vertical. Além dos valores médios, são apresentados o desvio padrão, o coeficiente de variação e os resultados da análise estatística pelo teste de Tukey.

Tabela 8 – Resultados de rigidez G_{vt} da MLCC associada ao *rolling shear*.

Método de ensaio	Configuração	G_{vt} médio [MPa]	Desvio Padrão [MPa]	Coefficiente de Variação (%)	Tukey
Vão Variável	P90	301,13	17,32	5,75	c
	P45	345,45	20,74	6,00	b
	P30	396,63	15,41	3,89	a
Cisalhamento Inclinado	P90	125,36	31,51	25,13	c
	P45	158,65	47,25	29,77	b
	P30	181,69	24,10	13,26	a
Cisalhamento Vertical	P90	243,44	87,33	35,87	b
	P45	268,22	85,03	31,70	a
	P30	277,62	81,15	29,23	a

Médias seguidas pela mesma letra, dentro de cada método de ensaio, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

De modo geral, os resultados evidenciaram que os valores de G_{vt} foram fortemente influenciados pelo método de ensaio adotado, bem como pela defasagem angular da camada central. Nos três métodos, observou-se um aumento progressivo da rigidez com a redução do ângulo da camada central.

A análise da dispersão dos resultados indicou que o método do vão variável apresentou os menores coeficientes de variação, sugerindo maior consistência e repetibilidade dos ensaios. Em contraste, o cisalhamento inclinado apresentou maiores dispersões, especialmente para as configurações P90 e P45, enquanto o cisalhamento vertical exibiu coeficientes de variação intermediários, compatíveis com a variabilidade típica associada às propriedades de cisalhamento em painéis de MLCC.

A comparação estatística entre as configurações, observada na Tabela 7 por meio das letras indicativas do teste de Tukey, confirmou as diferenças observadas nos valores médios de G_{vt} . No método do vão variável, as três configurações diferiram estatisticamente entre si ($P30a > P45b > P90c$), evidenciando um incremento

estatisticamente significativo da rigidez à medida que o ângulo da camada central se afasta de 90°.

No ensaio de cisalhamento inclinado, também foi verificado um incremento da rigidez com a redução do ângulo, sendo a configuração P30 estatisticamente superior às demais, seguida por P45 e, por último, P90. Esse comportamento confirmou que as configurações com camadas inclinadas apresentaram desempenho superior ao painel convencional, ainda que com dispersões mais elevadas dos resultados.

Observou-se que o método do vão variável resultou, de forma consistente, nos maiores valores de rigidez, com incrementos da ordem de 15% para a configuração P45 e de aproximadamente 32% para a configuração P30 em relação ao painel convencional (P90). No ensaio de cisalhamento inclinado, também foram verificados aumentos expressivos da rigidez com a redução do ângulo da camada central, com incrementos de cerca de 27% para a configuração P45 e de aproximadamente 45% para a configuração P30 em relação ao P90. Por sua vez, o cisalhamento vertical apresentou comportamento intermediário, com ganhos de rigidez da ordem de 10% a 14% em relação ao painel P90, evidenciando um efeito positivo da defasagem angular, ainda que com incrementos mais discretos entre as configurações P45 e P30.

Observou-se que os resultados de G_{vt} obtidos pelo método do vão variável foram significativamente superiores em relação aos resultados obtidos pelos métodos de cisalhamento inclinado e cisalhamento vertical, em todas as configurações analisadas. Esse comportamento evidenciou que o ensaio de vão variável, em função de sua natureza de carregamento e da influência conjunta de flexão e cisalhamento, resultou em valores mais elevados da rigidez associada ao *rolling shear*. Ainda assim, os valores obtidos encontram-se dentro da faixa de variação reportada na literatura, que, conforme discutido na revisão bibliográfica, pode variar amplamente em função da espécie de madeira, densidade e método de ensaio, situando-se geralmente entre 40 MPa e 500 MPa, com alguns casos específicos ultrapassando esse intervalo.

Da mesma forma, os valores obtidos pelo método do vão variável se aproximaram do módulo de cisalhamento transversal da madeira (G_0) segundo a ABNT NBR 7190-1 (2022) a partir da relação $E_0/16$, ou seja, aproximadamente 332 MPa, sendo $E_0 = 0,85 E_{c0}$ o módulo de elasticidade na flexão que foi obtido em função do módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras.

Por outro lado, os valores de G_{vt} obtidos através do ensaio de corpos de prova inclinados sofreram menor influência do atrito nos dispositivos de ensaio, o que contribuiu para resultados mais condizentes com aqueles reportados na literatura para painéis de madeira engenheirada. Além disso, o ensaio a partir deste modelo de corpo de prova apresenta facilidade de execução do ensaio.

O ensaio de cisalhamento vertical apresentou um comportamento intermediário, refletindo um estado de tensões mais diretamente associado ao cisalhamento transversal da camada ortogonal.

A comparação com os resultados reportados por Criado *et al.* (2025) reforça as tendências observadas neste estudo. Os autores verificaram que o ensaio de cisalhamento vertical resultou em valores de rigidez ao *rolling shear* superiores aos obtidos pelo cisalhamento inclinado, evidenciando a influência do procedimento experimental na determinação de G_{vt} . No presente trabalho, comportamento semelhante foi observado para todas as configurações analisadas, com valores de rigidez obtidos pelo cisalhamento vertical sistematicamente superiores aos determinados pelo cisalhamento inclinado. Esses resultados corroboram que métodos de ensaio que promovem um estado de tensões mais diretamente associado ao cisalhamento transversal tendem a conduzir a valores mais elevados de rigidez ao *rolling shear*, reforçando a importância da escolha do procedimento experimental na caracterização mecânica de painéis de MLCC.

5.4.2 Resultados da resistência associada ao efeito de *rolling shear*

Na Tabela 9, são apresentados os valores médios de resistência ao *rolling shear* (f_{vt}), expressos em MPa, para as três configurações de defasagem angular da camada central (P90, P45 e P30), obtidos por meio dos ensaios de vão variável, cisalhamento inclinado e cisalhamento vertical. A tabela inclui, além dos valores médios, os desvios padrão, os coeficientes de variação e os resultados da análise estatística pelo teste de Tukey.

Tabela 9 – Resultados da resistência f_{vt} da MLCC associada ao *rolling shear*.

Método de ensaio	Configuração	f_{vt} médio (MPa)	Desvio padrão (MPa)	CV (%)	Tukey
Vão variável	P90 (90°)	2,22	0,22	9,9	b
	P45 (45°)	2,36	0,23	9,7	b
	P30 (30°)	2,56	0,18	7,0	a
Cisalhamento inclinado	P90 (90°)	1,82	0,43	23,6	a
	P45 (45°)	1,92	0,44	22,9	a
	P30 (30°)	1,93	0,42	21,8	a
Cisalhamento vertical	P90 (90°)	2,02	0,65	32,2	a
	P45 (45°)	2,22	0,60	27,0	a
	P30 (30°)	2,32	0,69	29,7	a

Médias seguidas pela mesma letra, dentro de cada método de ensaio, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

De modo geral, os resultados indicaram que os valores de f_{vt} apresentam variações entre as configurações analisadas, cuja magnitude depende do método de ensaio adotado e do ângulo da camada central. No método do vão variável, observou-se um aumento progressivo da resistência com a redução do ângulo da camada central, enquanto nos ensaios de cisalhamento inclinado e cisalhamento vertical as diferenças entre as configurações foram mais discretas.

A análise da dispersão dos resultados evidenciou que o método do vão variável apresentou os menores coeficientes de variação, indicando maior consistência e repetibilidade dos ensaios. Por outro lado, os ensaios de cisalhamento inclinado e de cisalhamento vertical apresentaram maior dispersão, compatível com a variabilidade normalmente associada a ensaios de cisalhamento direto em materiais anisotrópicos e à influência de heterogeneidades do material e da linha de colagem.

A comparação estatística entre as configurações, observada na Tabela 8 por meio das letras indicativas do teste de Tukey, permitiu avaliar a influência da defasagem angular da camada central sobre a resistência ao *rolling shear*. No método do vão variável, a configuração P30 apresentou resistência estatisticamente superior às configurações P45 e P90, que não diferiram entre si, indicando que a redução do

ângulo da camada central promoveu ganho estatisticamente significativo de resistência apenas nessa condição de ensaio. Além disso, nos ensaios de cisalhamento inclinado e cisalhamento vertical, não foram identificadas diferenças estatisticamente significativas entre as configurações P90, P45 e P30, apesar das variações observadas nos valores médios.

Observou-se ainda que o método do vão variável resultou nos maiores valores de resistência, seguido pelo cisalhamento vertical, enquanto o cisalhamento inclinado apresentou os menores valores. Essa hierarquia entre os métodos está associada às diferenças no estado de tensões imposto aos corpos de prova, sendo mais pronunciada no método do vão variável.

A comparação com os resultados reportados por Criado *et al.* (2025) revelou comportamento semelhante, no qual os valores de resistência ao *rolling shear* determinados pelo cisalhamento vertical foram superiores aos obtidos pelo cisalhamento inclinado, evidenciando a influência do procedimento experimental na determinação de f_{vt} . Assim, tanto no presente estudo quanto na literatura, verificou-se que o método de ensaio exerceu papel determinante nos valores de resistência obtidos.

Outro aspecto importante a ser considerado é a diferença no comportamento dos valores de G_{vt} e f_{vt} em relação à variabilidade dos resultados. A literatura aponta que os valores de G_{vt} costumam apresentar maior dispersão, sendo mais sensíveis ao método de ensaio, à geometria do painel e às características do material (Wang *et al.*, 2018; Kumar *et al.*, 2023). Já os valores de f_{vt} , independentemente do método utilizado, costumam apresentar valores mais constantes entre si.

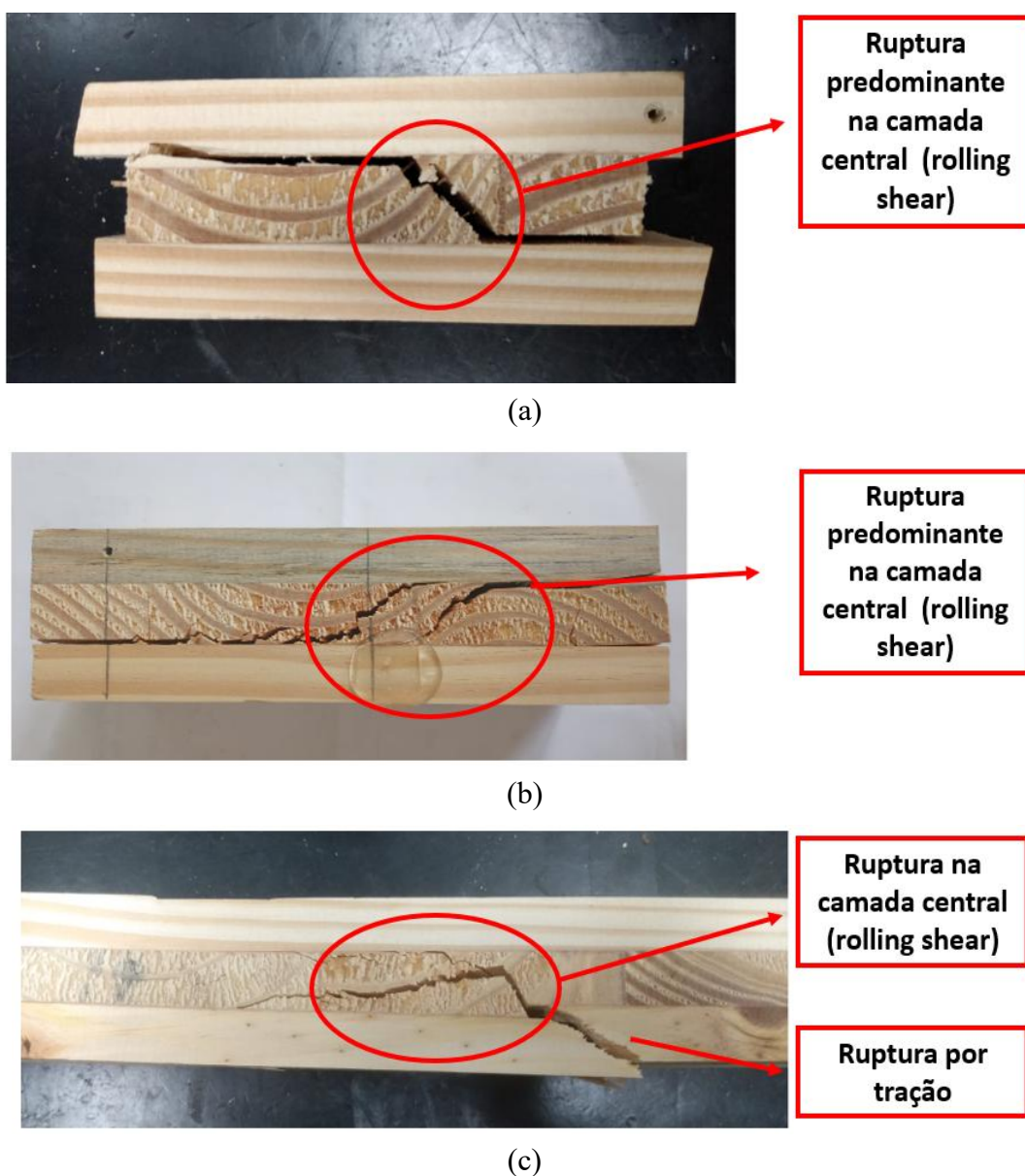
Por fim, os resultados estatísticos indicaram que as defasagens angulares das camadas centrais exerceram influência estatisticamente significativa sobre a resistência ao *rolling shear* apenas quando avaliada pelo método do vão variável para a configuração P30.

Nos ensaios de cisalhamento inclinado e cisalhamento vertical, as diferenças observadas nos valores médios não se mostraram estatisticamente significativas, sugerindo que, para esses métodos, a resistência ao *rolling shear* apresentou menor sensibilidade às alterações geométricas da camada central. Esse comportamento contrastou com o observado para a rigidez ao *rolling shear*,

reforçando que rigidez e resistência respondem de maneira distinta às variações geométricas do painel e ao método experimental.

Na Figura 47 são apresentados exemplos representativos dos corpos de prova após a ruptura, obtidos nos diferentes métodos de ensaio, com destaque para os modos de falha associados ao *rolling shear* na camada central dos painéis de CLT.

Figura 47 – Modos de ruptura associados ao *rolling shear* em painéis de MLCC para diferentes métodos de ensaio: (a) Cisalhamento inclinado, (b) Cisalhamento vertical, (c) Flexão com vão variável.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Os modos de ruptura observados nos diferentes métodos de ensaio e configurações dos painéis de MLCC estão observados na Tabela 10. Para cada condição analisada foram considerados 20 corpos de prova, sendo identificados os mecanismos de ruptura predominantes associados ao *rolling shear* na camada transversal, à tração paralela às fibras e à compressão na lamela superior

Tabela 10 – Modos de ruptura predominantes em números observados nos ensaios experimentais para as diferentes configurações dos painéis de MLCC.

Ensaio	Configuração	<i>Rolling shear</i>	Tração	Compressão	Total
Vão variável	P90	11	6	3	20
	P45	11	7	2	20
	P30	13	5	2	20
Cisalhamento vertical	P90	15	0	5	20
	P45	16	0	4	20
	P30	16	0	4	20
Cisalhamento inclinado	P90	20	0	0	20
	P45	20	0	0	20
	P30	20	0	0	20

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

No ensaio de flexão com vão variável foi observada predominância do mecanismo de *rolling shear*, embora com maior diversidade de modos de ruptura. Para a configuração P90, 55% dos corpos de prova apresentaram ruptura por *rolling shear*, enquanto 30% apresentaram ruptura associada à tração paralela às fibras na lamela inferior e 15% apresentaram ruptura associada à compressão na lamela superior. Para a configuração P45, 55% dos corpos de prova apresentaram ruptura por *rolling shear*, enquanto 35% apresentaram ruptura por tração e 10% apresentaram ruptura por compressão. Já para a configuração P30, 65% dos corpos de prova apresentaram ruptura por *rolling shear*, enquanto 25% apresentaram ruptura por tração e 10% apresentaram ruptura por compressão. Esse comportamento pode ser explicado pela interação entre esforços de flexão e cisalhamento nesse tipo de ensaio, que pode levar à ocorrência de diferentes mecanismos de ruptura ao longo da seção transversal do elemento estrutural.

No ensaio de cisalhamento vertical, observou-se predominância do mecanismo de ruptura associado ao *rolling shear* na camada transversal dos painéis. Para a configuração P90, 75% dos corpos de prova apresentaram ruptura governada por *rolling shear*, enquanto 25% apresentaram ruptura associada ao esmagamento por compressão na lamela superior, na região de aplicação da carga. Para a configuração P45, 80% dos corpos de prova apresentaram ruptura por *rolling shear*, enquanto 20% apresentaram ruptura por compressão. Comportamento semelhante foi observado na configuração P30, na qual 80% dos corpos de prova romperam por *rolling shear* e 20% apresentaram ruptura associada à compressão. Esses resultados indicam que, embora o *rolling shear* seja o mecanismo dominante nesse tipo de ensaio, a concentração de tensões compressivas na região de aplicação da carga pode levar à ocorrência localizada de esmagamento da madeira. Além disso, o arranjo experimental desse método pode favorecer a ocorrência de forças de atrito entre o corpo de prova e os dispositivos de fixação utilizados na máquina de ensaio, o que pode influenciar o estado de tensões desenvolvido durante o carregamento e contribuir para a ocorrência localizada de compressão na região de contato.

No ensaio de cisalhamento inclinado, todos os corpos de prova analisados apresentaram ruptura exclusivamente por *rolling shear* na camada transversal, independentemente da orientação da camada central do painel. Para as configurações P90, P45 e P30, observou-se ocorrência de *rolling shear* em 100% dos casos. Esse resultado evidencia que a configuração geométrica desse método de ensaio favorece a mobilização direta das tensões de cisalhamento na camada transversal, conduzindo de forma predominante à falha por *rolling shear*.

5.4.3 Comparação entre os resultados experimentais e analíticos

Na Tabela 11, são apresentadas as comparações entre os resultados analíticos obtidos pelo Método Gama e os valores experimentais correspondentes para as configurações P90, P45 e P30, considerando os diferentes métodos de ensaio. São apresentados os valores das tensões de compressão na lamela superior ($\sigma_{c0,1}$), de tração na lamela inferior ($\sigma_{t0,3}$) e de cisalhamento por *rolling shear* na camada transversal (τ_{vt}), associados às verificações dos Estados Limites Últimos (ELU), bem como a flecha vertical no meio do vão (δ_y), referente ao Estado Limite de Serviço (ELS). Para cada caso analisado, a Tabela 11 reúne os valores analíticos e

as respectivas diferenças percentuais em relação aos resultados experimentais de referência. Valores percentuais negativos indicaram que a resposta analítica subestimou os resultados experimentais, enquanto valores positivos indicaram superestimação, permitindo avaliar a concordância e o grau de conservadorismo do modelo analítico em relação ao comportamento observado nos ensaios.

Tabela 11 – Comparação entre os resultados analíticos obtidos pelo Método Gama e os resultados experimentais correspondentes para os Estados Limites Últimos (ELU) e de Serviço (ELS).

Ensaio		ELU						ELS	
		σ_{c01} (MPa)	f_{c0} (MPa)	σ_{t03} (MPa)	f_{t0} (MPa)	T_{vt} (MPa)	f_{vt} (MPa)	δ_y (mm)	δ_{lim} (mm)
Vão Variável	P90	27,17	25,74	34,01	32,99	2,27	2,01	1,03	0,96
		5,54%		3,09%		12,73%		7,74%	
	P45	30,97	25,74	36,41	32,99	2,53	2,08	1,17	0,96
		20,31%		10,37%		21,55%		21,77%	
	P30	38,35	25,74	44,63	32,99	3,12	2,19	1,21	0,96
		48,99%		35,28%		42,42%		26,51%	
Inclinado	P90	22,79	25,74	31,99	32,99	1,96	1,88	1,19	0,96
		-11,46%		-3,05%		4,41%		24,00%	
	P45	27,66	25,74	36,97	32,99	2,35	1,95	1,19	0,96
		7,46%		12,06%		20,62%		23,98%	
	P30	29,60	25,74	37,08	32,99	2,47	1,98	1,17	0,96
		14,98%		12,40%		24,71%		21,37%	
Vertical	P90	20,76	25,74	25,75	32,99	1,73	2,03	1,07	0,96
		-19,36%		-21,94%		-14,96%		11,09%	
	P45	30,6	25,74	36,25	32,99	2,51	2,24	1,15	0,96
		18,89%		9,89%		11,85%		19,34%	
	P30	33,35	25,74	39,18	32,99	2,72	2,35	1,24	0,96
		29,56%		18,77%		15,82%		29,20%	

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

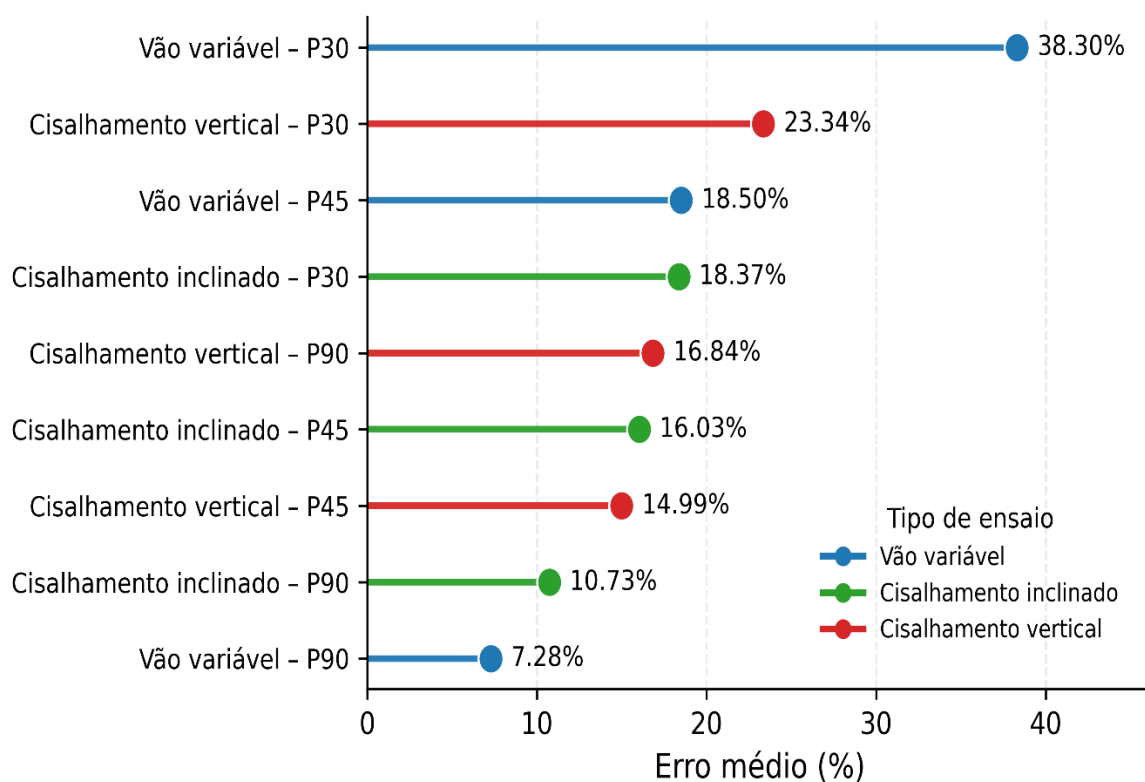
De modo geral, foram observadas discrepâncias entre os resultados analíticos e experimentais, tanto nas verificações associadas ao ELU quanto ao ELS.

No ELS, as flechas analíticas superaram o limite de serviço adotado ($L/300$) para todas as combinações entre ensaio e configuração analisadas. Esse resultado indicou que o Método Gama previu uma deformabilidade global maior do que aquela

observada experimentalmente, ou seja, o modelo analítico resultou em um painel estrutural mais flexível. Esse comportamento pôde ser associado à consideração da deformação por *rolling shear* na camada transversal do painel, a qual apresenta menor rigidez quando comparada às lamelas orientadas paralelamente às fibras.

Os valores das diferenças percentuais médias absolutas entre os resultados analíticos e experimentais para cada combinação entre método de ensaio e orientação da camada central do painel (P90, P45 e P30) estão ilustrados na Figura 48. Esses valores foram organizados em ordem crescente, permitindo visualizar de forma mais clara as condições em que o Método Gama apresentou maior ou menor concordância com os resultados experimentais.

Figura 48 – Ordenação crescente das diferenças percentuais médias absolutas entre resultados analíticos do Método Gama e resultados experimentais.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A análise dos resultados evidenciou variação significativa nas diferenças percentuais médias absolutas entre os resultados analíticos obtidos pelo Método Gama e os resultados experimentais, dependendo do tipo de ensaio e da orientação da camada central do painel. As menores discrepâncias foram observadas para a

configuração P90 no ensaio de vão variável (7,28%) e no ensaio de cisalhamento inclinado (10,73%), indicando maior proximidade entre as previsões analíticas e os resultados experimentais nessas condições. Por outro lado, as maiores diferenças foram verificadas para a configuração P30, especialmente no ensaio de vão variável (38,30%) e no ensaio de cisalhamento vertical (23,34%), evidenciando maior afastamento entre os resultados analíticos e experimentais nessas situações.

De maneira geral, observou-se tendência de aumento das diferenças percentuais com a redução do ângulo da camada central do painel, passando da configuração P90 para P45 e, posteriormente, para P30. Esse comportamento indicou que a concordância entre os resultados analíticos e experimentais foi maior para a configuração convencional do painel, enquanto as configurações com defasagem angular da camada central apresentaram maiores discrepâncias. Tal resultado sugere que a orientação das lamelas na camada transversal influencia a capacidade do Método Gama em representar o comportamento estrutural dos painéis analisados.

Além disso, verificou-se que a magnitude das discrepâncias também variou em função do tipo de ensaio considerado. As médias foram de 15,04% para cisalhamento inclinado, 18,39% para o cisalhamento vertical e 21,36% para o vão variável. Esses resultados indicaram que o desempenho do modelo analítico depende não apenas da orientação das lamelas na camada central, mas também do estado de tensões predominante associado a cada método de ensaio.

Conforme descrito na metodologia, foram selecionados corpos de prova representativos de cada configuração, priorizando aqueles que apresentaram ruptura por *rolling shear*. A Tabela 12 ilustra, para cada caso analisado, as razões entre as solicitações analíticas obtidas pelo Método Gama e as resistências experimentais correspondentes, bem como o modo de ruptura previsto pelo modelo e sua compatibilidade com o mecanismo de ruptura observado experimentalmente.

Tabela 12 – Comparação entre as razões analítico/experimental das verificações de compressão, tração e *rolling shear* obtidas pelo Método Gama e os modos de ruptura observados experimentalmente para os diferentes métodos de ensaio.

Ensaio	Corpo de prova	σ_{c01}/f_{c0}	σ_{t03}/f_{t0}	τ_{vt}/f_{vt}	Ruptura prevista	Ruptura Compatível?
Vão variável	P90 CP-02	1,06	1,03	1,13	<i>Rolling shear</i>	Sim
	P45 CP-03	1,20	1,10	1,18	Compressão	Não
	P30 CP-15	1,49	1,35	1,42	Compressão	Não
Cisalhamento inclinado	P90 CP-02	0,89	0,97	1,04	<i>Rolling shear</i>	Sim
	P45 CP-10	1,08	1,12	1,21	<i>Rolling shear</i>	Sim
	P30 CP-16	1,15	1,12	1,25	<i>Rolling shear</i>	Sim
Cisalhamento vertical	P90 CP-07	0,81	0,78	0,85	Não indicou ruptura	Não
	P45 CP-12	1,19	1,10	1,12	Compressão	Não
	P30 CP-19	1,30	1,19	1,16	Compressão	Não

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Observou-se que o Método Gama indicou corretamente o mecanismo de ruptura em quatro das nove configurações analisadas. Os melhores resultados foram obtidos no ensaio de cisalhamento inclinado, no qual o modelo previu corretamente o mecanismo de ruptura para todas as direções analisadas. Esse comportamento pode estar relacionado às condições impostas por esse tipo de ensaio, que favorecem a ocorrência de cisalhamento na camada transversal do painel.

No ensaio de vão variável, o modelo indicou corretamente o mecanismo de ruptura apenas na configuração P90, enquanto nas demais direções verificaram-se divergências entre as previsões analíticas e os resultados experimentais. Esse comportamento pode estar associado às condições desse tipo de ensaio, no qual o

corpo de prova pode estar sujeito simultaneamente a esforços de flexão e cisalhamento.

Já no ensaio de cisalhamento vertical observaram-se maiores discrepâncias entre as previsões analíticas e os resultados experimentais. Esse comportamento pode estar relacionado às condições do arranjo experimental, nas quais o contato entre o corpo de prova e o dispositivo de fixação da máquina de ensaio pode gerar forças de atrito adicionais durante o carregamento, influenciando o comportamento mecânico observado.

Ressalta-se que as resistências utilizadas nas verificações analíticas foram estimadas a partir da caracterização mecânica da madeira, não tendo sido obtidas diretamente durante os ensaios por meio de instrumentação local, como extensômetros. Dessa forma, as tensões efetivamente desenvolvidas nas lamelas podem não ter sido representadas com total precisão, o que pode ter influenciado as diferenças observadas entre os resultados analíticos e experimentais.

Analisando os resultados em função da orientação da camada central do painel, observou-se que o Método Gama apresentou melhor concordância com os resultados experimentais na configuração P90, na qual o modelo indicou corretamente o mecanismo de ruptura em dois dos três casos analisados. Para as configurações com defasagem angular da camada central (P45 e P30), essa concordância foi menor, com apenas um caso corretamente previsto em cada direção. Esses resultados indicaram que o Método Gama apresentou maior dificuldade em prever o mecanismo de ruptura em painéis com camadas orientadas em ângulos diferentes de 90°.

Huang et al. (2023) destacam que o Método Gama é amplamente utilizado para estimar a rigidez global em flexão de painéis de MLCC, porém outros modelos, como o *shear analogy method*, podem representar de forma mais adequada determinados efeitos de cisalhamento nas camadas transversais. De forma semelhante, Das et al. (2025) verificaram que o Método Gama apresentou melhor desempenho na previsão da rigidez global em flexão, enquanto o método *shear analogy* (Método Kreuzinger) apresentou maior precisão na avaliação de efeitos associados ao cisalhamento e ao *rolling shear*. Esses resultados indicam que diferentes abordagens analíticas podem apresentar níveis distintos de precisão dependendo do tipo de resposta estrutural analisada. No presente estudo, o Método Gama indicou corretamente o mecanismo de ruptura em quatro das nove configurações analisadas. Esse resultado sugere que, embora o modelo possa

representar adequadamente determinados comportamentos estruturais, outras abordagens analíticas podem apresentar maior capacidade de representar mecanismos de ruptura associados ao cisalhamento em painéis de MLCC.

6 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos permitiram concluir que a defasagem angular da camada central influenciou significativamente o comportamento estrutural dos painéis de MLCC, sobretudo no que se refere à rigidez ao *rolling shear* e à resposta em serviço dos elementos. No ensaio de flexão com vão variável, a rigidez média ao *rolling shear* aumentou de aproximadamente 301,13 MPa na configuração convencional (90°) para cerca de 396,63 MPa na configuração com defasagem de 30°, correspondendo a um incremento da ordem de 31,7%, enquanto a configuração de 45° apresentou valor intermediário de aproximadamente 345,45 MPa.

Por outro lado, a resistência última ao *rolling shear* apresentou variações menos expressivas entre as configurações, situando-se, no ensaio de vão variável, entre aproximadamente 2,22 MPa e 2,56 MPa, sem diferenças estatisticamente significativas entre as médias. Resultados semelhantes foram observados nos ensaios de cisalhamento direto com corpos de prova inclinados e verticais, indicando que a alteração do ângulo da camada central influenciou predominantemente a rigidez do sistema, sem promover aumento consistente da resistência última associada ao fenômeno de *rolling shear*.

Quanto à qualidade das ligações coladas, verificou-se redução dos índices médios de delaminação com a diminuição do ângulo da camada central, passando de aproximadamente 3,98% na configuração de 90° para cerca de 3,55% na configuração de 45° e 3,02% na configuração de 30°, representando uma redução da ordem de 24,1% entre as configurações extremas. No ensaio de cisalhamento na linha de cola, a configuração de 45° apresentou a maior resistência média, aproximadamente 4,98 MPa, valor cerca de 23,3% superior ao observado para a configuração convencional de 90° (4,04 MPa), indicando melhoria na transferência de tensões entre madeira e adesivo.

Em relação à avaliação analítica por meio do Método Gama, observaram-se diferenças percentuais entre os resultados analíticos e experimentais variando aproximadamente de 7,28% a 38,30%, dependendo do método de ensaio e da orientação da camada central do painel. Para as verificações associadas ao Estado Limite de Serviço, as flechas analíticas superaram o limite adotado ($L/300$) em todas as configurações analisadas, com diferenças variando aproximadamente entre 7% e 26%, indicando comportamento mais conservador do modelo analítico em relação à deformabilidade global dos painéis. De modo geral, verificou-se que o método

apresentou capacidade limitada em prever corretamente o mecanismo de ruptura observado experimentalmente nos painéis de MLCC. Das nove configurações analisadas, o modelo indicou corretamente o modo de falha em quatro casos, correspondentes à configuração P90 no ensaio de vão variável e às três configurações avaliadas no ensaio de cisalhamento inclinado. Nos demais casos, o modelo indicou ruptura associada principalmente à compressão paralela às fibras, enquanto experimentalmente a falha ocorreu predominantemente por *rolling shear* na camada transversal.

De modo geral, concluiu-se que a defasagem angular da camada central constitui um parâmetro relevante para o controle da rigidez e da deformabilidade dos painéis de MLCC, contribuindo para a melhoria do desempenho em serviço dos elementos estruturais. Entretanto, à exceção dos ganhos obtidos na rigidez ao *rolling shear* (G_{vt}), as demais propriedades avaliadas apresentaram variações relativamente modestas, não evidenciando benefícios suficientes para justificar alterações substanciais nos processos convencionais de fabricação dos painéis. Diante das dificuldades técnicas e operacionais inerentes à produção de painéis com camadas defasadas, recomenda-se que a adoção dessas configurações seja considerada com cautela e restrita a aplicações específicas em que o aumento de rigidez em serviço seja prioritário, não se configurando, no presente estágio, como alternativa generalizada à orientação tradicional de 90° .

Como método de ensaio para a obtenção dos valores de resistência e de rigidez ao *rolling shear*, recomenda-se a utilização do ensaio de cisalhamento inclinado, devido à sua facilidade de execução e à capacidade de promover um estado de tensões que favorece a mobilização do cisalhamento na camada transversal do painel. Entre os métodos avaliados, esse ensaio apresentou a maior ocorrência de rupturas governadas por *rolling shear*, com 100% dos corpos de prova rompendo por esse mecanismo. Além disso, foi o método que apresentou melhor correspondência entre as previsões analíticas do Método Gama e os resultados experimentais, indicando maior compatibilidade entre o estado de tensões gerado no ensaio e as hipóteses adotadas no modelo analítico.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugerem-se para trabalhos futuros os seguintes temas:

- Avaliar painéis de MLCC com maior número de camadas e diferentes relações entre espessuras das camadas longitudinais e transversais, verificando a influência da defasagem angular em sistemas estruturais mais complexos.
- Investigar outras espécies de madeira e combinações híbridas, de modo a analisar a generalidade dos efeitos da defasagem angular sobre a rigidez e a resistência ao *rolling shear*.
- Desenvolver e avaliar metodologias experimentais e geometrias alternativas de corpos de prova que representem de forma mais fiel o estado de tensões em painéis de MLCC submetidos à flexão.
- Empregar técnicas avançadas de instrumentação, como correlação digital de imagens (DIC), para análise mais detalhada da distribuição de deformações associadas ao *rolling shear*.
- Investigar outros métodos analíticos para a avaliação do comportamento estrutural de painéis de MLCC com defasagens angulares diferentes da configuração convencional

REFERÊNCIAS

- AICHER, S.; CHRISTIAN, Z.; HIRSCH, M. Rolling shear modulus and strength of beech wood laminations. **Holzforschung**, Berlin, v. 70, n. 8, p. 773–781, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1515/hf-2015-0229>. Acesso em: 30 ago. 2026.
- AJAYI, S. O. *et al.* Optimising material procurement for construction waste minimization: an exploration of success factors. **Sustainable Materials and Technologies**, Amsterdam, v. 11, p. 38–46, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2017.01.001>. Acesso em: 30 ago. 2026.
- ALMEIDA, D. H. *et al.* Determination of density, shear and compression parallel to the grain strengths of Pariri (*Pouteria* sp.), Brazilian native wood specie. **International Journal of Materials Engineering**, Rosemead, CA, v. 5, n. 5, p. 109–112, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.5923/j.ijme.20150505.01>. Acesso em: 30 ago. 2026.
- AMORIM, S. T. A.; MANTILLA, J. N. R.; CARRASCO, E. V. M. A madeira lamelada cruzada: aspectos tecnológicos, construtivos e de dimensionamento. **Matéria (Rio de Janeiro)**, Rio de Janeiro, v. 22, supl. 1, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620170005.0273>. Acesso em: 30 ago. 2026.
- ANTUNES, L. A. Empregos setoriais nas microrregiões do Brasil entre os anos de 2002 a 2018: uma análise com ênfase na construção civil. **Economia & Região**, Londrina, v. 9, n. 2, p. 55, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.5433/2317-627X.2021v9n2p55>. Acesso em: 30 ago. 2026.
- ARAUJO, V. A. *et al.* Difficulties of wooden housing production sector in Brazil. **Wood Material Science & Engineering**, Abingdon, v. 15, n. 2, p. 87–96, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/17480272.2018.1484513>. Acesso em: 30 ago. 2026.
- BAHMANZAD, A. *et al.* Shear properties of Eastern Hemlock with respect to fiber orientation for use in cross laminated timber. **Journal of Materials in Civil Engineering**, Reston, VA, v. 32, n. 7, 2020. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003232](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003232). Acesso em: 30 ago. 2026.
- BAÑO, V. *et al.* Characterization and structural performance in bending of CLT panels made from small-diameter logs of Loblolly/Slash Pine. **Materials**, Basel, v. 11, n. 12, p. 2436, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma11122436>. Acesso em: 30 ago. 2026.
- BLANKENDAAL, T.; SCHUUR, P.; VOORDIJK, H. Reducing the environmental impact of concrete and asphalt: a scenario approach. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 66, p. 27–36, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.10.012>. Acesso em: 30 ago. 2026.
- BLOCK, I. **Mjøstårnet in Norway becomes world's tallest timber tower**. Dezeen, 2019. Disponível em: <https://www.dezeen.com/2019/03/19/mjostarne-worlds-tallest-timber-tower-voll-arkitekter-norway/>. Acesso em: 30 ago. 2026.

BRANDNER, R. *et al.* Cross laminated timber (CLT): overview and development. **European Journal of Wood and Wood Products**, Berlin, v. 74, n. 3, p. 331–351, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00107-015-0999-5>. Acesso em: 30 ago. 2026.

BRANDT, K. *et al.* Techno-economic analysis for manufacturing cross-laminated timber. **BioResources**, Raleigh, NC, v. 14, n. 4, p. 7790–7804, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.15376/biores.14.4.7790-7804>. Acesso em: 30 ago. 2026.

BUCK, D.; HAGMAN, O. Production and in-plane compression mechanics of alternatively angled layered cross-laminated timber. **BioResources**, Raleigh, NC, v. 13, n. 2, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.15376/biores.13.2.4029-4045>. Acesso em: 30 ago. 2026.

BUKAUSKAS, A. *et al.* Whole timber construction: a state of the art review. **Construction and Building Materials**, Oxford, v. 213, p. 748–769, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.043>. Acesso em: 30 ago. 2026.

BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. **Elementos de máquinas de Shigley**. Porto Alegre: AMGH Editora, 2016.

CABEZA, L. F. *et al.* Affordable construction towards sustainable buildings: review on embodied energy in building materials. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, Amsterdam, v. 5, n. 2, p. 229–236, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.05.005>. Acesso em: 30 ago. 2026.

CAO, Y. *et al.* Evaluation of the effect of knots on rolling shear strength of cross laminated timber (CLT). **Construction and Building Materials**, Oxford, v. 222, p. 579–587, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.165>. Acesso em: 30 ago. 2026.

CHEN, Y. **Structural performance of box based cross laminated timber system used in floor applications**. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – University of British Columbia, Vancouver, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.14288/1.0071796>. Acesso em: 30 ago. 2026.

CHRISTOVASILIS, I. P. *et al.* Evaluation of the mechanical properties of cross laminated timber with elementary beam theories. **Construction and Building Materials**, Oxford, v. 122, p. 202–213, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.082>. Acesso em: 30 ago. 2026.

CONTO, V.; OLIVEIRA, M. L.; RUPPENTHAL, J. E. Certificações ambientais: contribuição à sustentabilidade na construção civil no Brasil. **Revista Gestão da Produção Operações e Sistemas**, Bauru, v. 12, n. 4, p. 100, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.15675/gepros.v12i4.1749>. Acesso em: 30 ago. 2026.

COSTA, A. A. P. **Construção de edifícios com cross laminated timber (CLT)**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Porto, Porto, 2013.

CRIADO, T. C.; DIAS, A. A.; MOLINA, J. C. **Estudo da resistência e da rigidez ao cisalhamento transversal (rolling shear) em elementos de madeira lamelada colada cruzada**. Curitiba: Editora Científica Digital, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.37885/978-65-5360-598-5>. Acesso em: 30 ago. 2026.

DAS, S. *et al.* Comparative analysis of bending and rolling shear performance of poplar and hybrid maple–poplar cross-laminated timber (CLT). **Journal of Composites Science**, Basel, v. 9, n. 3, p. 134, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/jcs9030134>. Acesso em: 30 ago. 2026.

DUGMORE, M. *et al.* Bonding quality of cross-laminated timber: evaluation of test methods on Eucalyptus grandis panels. **Construction and Building Materials**, Oxford, v. 211, p. 217–227, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.240>. Acesso em: 30 ago. 2026.

EBNER, G. **CLT production is expected to double until 2020**. Timber Online, 2017. Disponível em: https://www.timber-online.net/wood_products/2017/06/brettsperholz-produktion-in-europa---20162020.html. Acesso em: 30 ago. 2026.

EHRHART, T.; BRANDNER, R. Rolling shear: test configurations and properties of some European soft- and hardwood species. **Engineering Structures**, Oxford, v. 172, p. 554–572, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.05.118>. Acesso em: 30 ago. 2026.

FLORES, E. I. S. *et al.* Multi-scale modelling of rolling shear failure in cross-laminated timber structures by homogenisation and cohesive zone models. **International Journal of Solids and Structures**, Oxford, v. 81, p. 219–232, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2015.11.027>. Acesso em: 30 ago. 2026.

FORTUNA, B. *et al.* Tension strength capacity of finger joined beech lamellas. **European Journal of Wood and Wood Products**, Berlin, v. 78, n. 5, p. 985–994, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01588-9>. Acesso em: 30 ago. 2026.

GARDNER, C. *et al.* The effect of edge gaps on shear strength and rolling shear modulus of cross laminated timber panels. **Construction and Building Materials**, Oxford, v. 259, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119710>. Acesso em: 30 ago. 2026.

GHISELLINI, P. *et al.* Evaluating the transition towards cleaner production in the construction and demolition sector of China: a review. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 195, p. 418–434, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.084>. Acesso em: 30 ago. 2026.

GIMENEZ, M. H. D.; CECCHINI JÚNIOR, V. Comparação de métodos de cálculo para elementos de madeira lamelada cruzada (CLT) submetidos à flexão. **RECIMA21 - Revista Científica Multidisciplinar**, Jundiaí, v. 4, n. 1, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.47820/recima21.v4i1.2667>. Acesso em: 30 ago. 2026.

GLASNER, D. *et al.* Rolling shear strength of cross laminated timber (CLT) – testing, evaluation, and design. **Buildings**, Basel, v. 13, n. 11, p. 2831, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/buildings13112831>. Acesso em: 30 ago. 2026.

GSELL, D. *et al.* Cross-laminated timber plates: evaluation and verification of homogenized elastic properties. **Journal of Structural Engineering**, Reston, VA, v. 133, n. 1, p. 132–138, 2007. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2007\)133:1\(132\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2007)133:1(132)). Acesso em: 30 ago. 2026.

GUSTAVSSON, L.; SATHRE, R. Variability in energy and carbon dioxide balances of wood and concrete building materials. **Building and Environment**, Oxford, v. 41, n. 7, p. 940–951, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.04.008>. Acesso em: 30 ago. 2026.

HAO, J. *et al.* Quantifying construction waste reduction through the application of prefabrication: a case study in Anhui, China. **Environmental Science and Pollution Research**, Berlin, v. 28, n. 19, p. 24499–24510, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09026-2>. Acesso em: 30 ago. 2026.

HILDEBRANDT, J.; HAGEMANN, N.; THRÄN, D. The contribution of wood-based construction materials for leveraging a low carbon building sector in Europe. **Sustainable Cities and Society**, Amsterdam, v. 34, p. 405–418, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.06.013>. Acesso em: 30 ago. 2026.

HOXHA, E. *et al.* Influence of construction material uncertainties on residential building LCA reliability. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 144, p. 33–47, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.068>. Acesso em: 30 ago. 2026.

HUANG, L. *et al.* Carbon emission of global construction sector. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 81, p. 1906–1916, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.001>. Acesso em: 30 ago. 2026.

HUANG, Z. *et al.* The appropriacy of the analytical models for calculating the shear capacity of cross-laminated timber (CLT) under out-of-plane bending. **Journal of Wood Science**, Tokyo, v. 69, n. 14, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s10086-023-02089-y>. Acesso em: 30 ago. 2026.

HUBER, C.; DEIX, K. Comparison of calculation methods of elastic bonding: limits of the gamma method using an example of a wood–concrete composite floor with single loads. **Materials**, Basel, v. 14, n. 23, p. 7211, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma14237211>. Acesso em: 30 ago. 2026.

HUBER, J. A. J. *et al.* Structural robustness and timber buildings – a review. **Wood Material Science & Engineering**, Abingdon, v. 14, n. 2, p. 107–128, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/17480272.2018.1446052>. Acesso em: 30 ago. 2026.

JAILLON, L.; POON, C. S.; CHIANG, Y. H. Quantifying the waste reduction potential of using prefabrication in building construction in Hong Kong. **Waste Management**, Oxford, v. 29, n. 1, p. 309–320, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.02.015>. Acesso em: 30 ago. 2026.

JONES, K. *et al.* Adoption of unconventional approaches in construction: the case of cross-laminated timber. **Construction and Building Materials**, Oxford, v. 125, p. 690–702, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.088>. Acesso em: 30 ago. 2026.

KARACABEYLI, EROL; GAGNON, SYLVAIN (ed.). **Canadian CLT handbook**. 2019 edition. v. 1. Pointe-Claire, QC: FPInnovations, 2019.

KERN, A. P. *et al.* Factors influencing temporary wood waste generation in high-rise building construction. **Waste Management**, Oxford, v. 78, p. 446–455, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.05.057>. Acesso em: 30 ago. 2026.

KIM, K.-H. Influence of layer arrangement on bonding and bending performances of cross-laminated timber using two different species. **BioResources**, Raleigh, NC, v. 15, n. 3, p. 5328–5341, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.15376/biores.15.3.5328-5341>. Acesso em: 30 ago. 2026.

KNIGHT, K. A.; CUNNINGHAM, P. R.; MILLER, S. A. Optimizing supplementary cementitious material replacement to minimize the environmental impacts of concrete. **Cement and Concrete Composites**, Oxford, v. 139, p. 105049, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105049>. Acesso em: 30 ago. 2026.

KNORZ, M.; TORNO, S.; VAN DE KUILEN, J.-W. Bonding quality of industrially produced cross-laminated timber (CLT) as determined in delamination tests. **Construction and Building Materials**, Oxford, v. 133, p. 219–225, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.057>. Acesso em: 30 ago. 2026.

KODONGO, O.; OJAH, K. Does infrastructure really explain economic growth in Sub-Saharan Africa? **Review of Development Finance**, Johannesburg, v. 6, n. 2, p. 105–125, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rdf.2016.12.001>. Acesso em: 30 ago. 2026.

KREMER, P. D.; SYMMONS, M. A. Mass timber construction as an alternative to concrete and steel in the Australia building industry: a PESTEL evaluation of the potential. **International Wood Products Journal**, Abingdon, v. 6, n. 3, p. 138–147, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1179/2042645315Y.0000000010>. Acesso em: 30 ago. 2026.

KUILEN, J. W. G. VAN DE *et al.* Very tall wooden buildings with cross laminated timber. **Procedia Engineering**, Amsterdam, v. 14, p. 1621–1628, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.204>. Acesso em: 30 ago. 2026.

KUMAR, C. *et al.* A review of factors influencing rolling shear in CLT and test methodology. **Journal of Testing and Evaluation**, West Conshohocken, PA, v. 50, n. 3, p. 1634–1656, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1520/JTE20210160>. Acesso em: 30 ago. 2026.

LACHIMPADI, S. K. *et al.* Construction waste minimisation comparing conventional and precast construction (mixed system and IBS) methods in high-rise buildings: a Malaysia case study. **Resources, Conservation and Recycling**, Amsterdam, v. 68, p. 96–103, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.08.011>. Acesso em: 30 ago. 2026.

LASSIO, J. *et al.* Case study: LCA methodology applied to materials management in a Brazilian residential construction site. **Journal of Engineering**, London, v. 2016, p. 1–9, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2016/8513293>. Acesso em: 30 ago. 2026.

LEITE, I. C. A. *et al.* Gestão de resíduos na construção civil: um estudo em Belo Horizonte e região metropolitana. **REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, Goiânia, v. 14, n. 1, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.5216/reec.v14i1.44439>. Acesso em: 30 ago. 2026.

LI, J. *et al.* A model for estimating construction waste generation index for building project in China. **Resources, Conservation and Recycling**, Amsterdam, v. 74, p. 20–26, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.02.015>. Acesso em: 30 ago. 2026.

LI, M. Evaluating rolling shear strength properties of cross-laminated timber by short-span bending tests and modified planar shear tests. **Journal of Wood Science**, Tokyo, v. 63, n. 4, p. 331–337, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10086-017-1631-6>. Acesso em: 30 ago. 2026.

LI, M.; DONG, W.; LIM, H. Influence of lamination aspect ratios and test methods on rolling shear strength evaluation of cross-laminated timber. **Journal of Materials in Civil Engineering**, Reston, VA, v. 31, n. 12, 2019. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002977](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002977). Acesso em: 30 ago. 2026.

LI, Y. **Duration-of-load and size effects on the rolling shear strength of cross laminated timber**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – University of British Columbia, Vancouver, 2015. Disponível em: <https://open.library.ubc.ca/collections/24/items/1.0135686>. Acesso em: 30 ago. 2026.

LIAO, Y. *et al.* Feasibility of manufacturing cross-laminated timber using fast-grown small diameter eucalyptus lumbers. **Construction and Building Materials**, Oxford, v. 132, p. 508–515, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.027>. Acesso em: 30 ago. 2026.

LU, H. R.; EL HANANDEH, A.; GILBERT, B. P. A comparative life cycle study of alternative materials for Australian multi-storey apartment building frame constructions: environmental and economic perspective. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 166, p. 458–473, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.065>. Acesso em: 30 ago. 2026.

LUM, W. C. *et al.* Overview on bending and rolling shear properties of cross-laminated timber (CLT) as engineered sustainable construction materials. In: **Green Infrastructure**. Singapore: Springer, 2022. p. 93–111. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-981-16-6383-3_7. Acesso em: 30 ago. 2026.

MARQUES, C. T.; GOMES, B. M. F.; BRANDLI, L. L. Consumo de água e energia em canteiros de obra: um estudo de caso do diagnóstico a ações visando à sustentabilidade. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 4, p. 79–90, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212017000400186>. Acesso em: 30 ago. 2026.

MILLER, S. A.; HORVATH, A.; MONTEIRO, P. J. M. Impacts of booming concrete production on water resources worldwide. **Nature Sustainability**, London, v. 1, n. 1, p. 69–76, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41893-017-0009-5>. Acesso em: 30 ago. 2026.

MILNER, H. R.; WOODARD, A. C. Sustainability of engineered wood products. *In*: **Sustainability of Construction Materials**. Amsterdam: Elsevier, 2016. p. 159–180. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100370-1.00008-1>. Acesso em: 30 ago. 2026.

NIE, X. **Failure mechanism of rolling shear failure in cross-laminated timber**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – University of British Columbia, Vancouver, 2015.

O'CEALLAIGH, C.; SIKORA, K.; HARTE, A. M. The influence of panel lay-up on the characteristic bending and rolling shear strength of CLT. **Buildings**, Basel, v. 8, n. 9, p. 114, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/buildings8090114>. Acesso em: 30 ago. 2026.

OLIVEIRA, C. G. *et al.* Consumo de madeira para fins provisórios em obras em concreto armado moldado in loco. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 24, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212024000100714>. Acesso em: 30 ago. 2026.

OLIVEIRA, G. L. **Cross laminated timber (CLT) no Brasil: processo construtivo e desempenho: recomendações para o processo do projeto arquitetônico**. 2019. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/D.16.2019.tde-09012019-144057>. Acesso em: 30 ago. 2026.

ORLOWSKI, K. Automated manufacturing for timber-based panelised wall systems. **Automation in Construction**, Amsterdam, v. 109, p. 102988, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102988>. Acesso em: 30 ago. 2026.

PASSARELLI, R. N. **Cross laminated timber: diretrizes para projeto de painel maciço em madeira no Estado de São Paulo**. 2013. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/D.102.2013.tde-06052014-145836>. Acesso em: 30 ago. 2026.

PENFIELD, P. *et al.* Assessing the adoption of cross laminated timber by architects and structural engineers within the United States. **Journal of Green Building**, Washington, DC, v. 17, n. 1, p. 127–147, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3992/jgb.17.1.127>. Acesso em: 30 ago. 2026.

PEREIRA, M. C. M. **Metodologia para estudo da caracterização estrutural de painéis de madeira lamelada colada cruzada**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/D.18.2015.tde-07052015-084252>. Acesso em: 30 ago. 2026.

PEREIRA, M. C. M.; CALIL JUNIOR, C. Strength and stiffness of cross laminated timber (CLT) panels produced with Pinus and Eucalyptus: experimental and analytical comparisons. **Matéria (Rio de Janeiro)**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 4, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1517-707620190004.0844>. Acesso em: 30 ago. 2026.

PUNHAGUI, K. R. G. **Potencial de redução das emissões de CO₂ e da energia incorporada na construção de moradias no Brasil mediante o incremento do uso de madeira**. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/T.3.2014.tde-29042015-164644>. Acesso em: 30 ago. 2026.

PURBA, C. Y. C. *et al.* Assessment of bonding durability of CLT and glulam made from oak and mixed poplar-oak according to bonding pressure and glue type. **Construction and Building Materials**, Oxford, v. 335, p. 127345, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127345>. Acesso em: 30 ago. 2026.

RAHMAN, M. T. *et al.* Assessment of shear analogy and Timoshenko method for analyzing hybrid CLT under out-of-plane loading. **Proceedings of International Structural Engineering and Construction**, Fargo, ND, v. 7, n. 2, 2020. Disponível em: [https://doi.org/10.14455/ISEC.2020.7\(2\).MAT-17](https://doi.org/10.14455/ISEC.2020.7(2).MAT-17). Acesso em: 30 ago. 2026.

REN, H. *et al.* A state-of-the-art review on connection systems, rolling shear performance, and sustainability assessment of cross-laminated timber. **Engineering Structures**, Oxford, v. 317, p. 118552, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118552>. Acesso em: 30 ago. 2026.

SANDOLI, A.; CALDERONI, B. The rolling shear influence on the out-of-plane behavior of CLT panels: a comparative analysis. **Buildings**, Basel, v. 10, n. 3, p. 42, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/buildings10030042>. Acesso em: 30 ago. 2026.

SANTOS, L. F. **Estruturas mistas de cross laminated timber (CLT) e concreto: análise experimental de conectores semirrígidos**. 2021. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2021.

SANTOS, P.; CARDOSO, L.; DIAS, A. M. P. G. Alternated cross-laminated timber (aCLT) panels: development and mechanical characterization. **European Journal of Wood and Wood Products**, Berlin, v. 82, n. 6, p. 2065–2083, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00107-024-02142-7>. Acesso em: 30 ago. 2026.

SANTOS, S. *et al.* Madeira engenheirada como tecnologia alternativa na arquitetura: análise do panorama global das discussões do MLC, CLT e LVL. **Impact Projects**, São Paulo, v. 3, n. 2, p. 71–84, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.59279/impact.v3i2.2881>. Acesso em: 30 ago. 2026.

SCIOMENTA, M.; BEDON, C.; FRAGIACOMO, M. Experimental and numerical column buckling analysis of hardwood cross-laminated timber (CLT) panels.

Research Square, Durham, NC, 2022. Disponível em:

<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2398284/v1>. Acesso em: 30 ago. 2026.

SHAHNEWAZ, M. *et al.* Experimental research on point-supported CLT panels: phase 1: rolling shear strength. *In: WORLD CONFERENCE ON TIMBER*

ENGINEERING, 2023, Oslo. **Proceedings [...]**. Oslo: WCTE, 2023. p. 352–357.

Disponível em: <https://doi.org/10.52202/069179-0048>. Acesso em: 30 ago. 2026.

SHIGUE, E. K. **Difusão da construção em madeira no Brasil: agentes, ações e produtos**. 2018. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018. Disponível em:

<https://doi.org/10.11606/D.102.2018.tde-03092018-094051>. Acesso em: 30 ago. 2026.

SIKORA, K. S.; MCPOLIN, D. O.; HARTE, A. M. Shear strength and durability testing of adhesive bonds in cross-laminated timber. **The Journal of Adhesion**, Abingdon, v. 92, n. 7–9, p. 758–777, 2016. Disponível em:

<https://doi.org/10.1080/00218464.2015.1094391>. Acesso em: 30 ago. 2026.

SILVA, J. V. F. **Estudo numérico-experimental da resistência e rigidez ao rolling shear de elementos de MLCC (madeira lamelada colada cruzada)**. 2023. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Universidade Estadual Paulista (Unesp), Itapeva, 2023.

SKULLESTAD, J. L.; BOHNE, R. A.; LOHNE, J. High-rise timber buildings as a climate change mitigation measure – a comparative LCA of structural system alternatives.

Energy Procedia, Amsterdam, v. 96, p. 112–123, 2016. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.09.112>. Acesso em: 30 ago. 2026.

SNEED, A. Wood is the new steel. **Scientific American**, New York, v. 317, n. 3, p. 19, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/scientificamerican0917-19>. Acesso em: 30 ago. 2026.

SONG, J. *et al.* Processing bulk natural wood into a high-performance structural material. **Nature**, London, v. 554, n. 7691, p. 224–228, 2018. Disponível em:

<https://doi.org/10.1038/nature25476>. Acesso em: 30 ago. 2026.

SOUSA, R. M. L. **Avaliação experimental da estabilidade dimensional de elementos em pinho bravo e madeira tratada termicamente**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Minho, Guimarães, 2012.

SOUST-VERDAGUER, B.; LLATAS, C.; GARCÍA-MARTÍNEZ, A. Critical review of BIM-based LCA method to buildings. **Energy and Buildings**, Lausanne, v. 136, p. 110–120, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.009>. Acesso em: 30 ago. 2026.

STEFFENS, F.; STEFFENS, H.; OLIVEIRA, F. R. Applications of natural fibers on architecture. **Procedia Engineering**, Amsterdam, v. 200, p. 317–324, 2017.

Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.07.045>. Acesso em: 30 ago. 2026.

SUN, X.; HE, M.; LI, Z. Experimental investigation on the influence of lamination aspect ratios on rolling shear strength of cross-laminated timber. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, London, v. 22, n. 1, p. 22, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s43452-021-00345-w>. Acesso em: 30 ago. 2026.

TOPPINEN, A. *et al.* The future of wooden multistory construction in the forest bioeconomy – a Delphi study from Finland and Sweden. **Journal of Forest Economics**, Amsterdam, v. 31, p. 3–10, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jfe.2017.05.001>. Acesso em: 30 ago. 2026.

UKYO, S.; SHINDO, K.; MIYATAKE, A. Evaluation of rolling shear modulus and strength of Japanese cedar cross-laminated timber (CLT) laminae. **Journal of Wood Science**, Tokyo, v. 65, n. 1, p. 31, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s10086-019-1810-8>. Acesso em: 30 ago. 2026.

VILELA, R. **Desempenho estrutural de placas de cross laminated timber submetidas à flexão**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2020.

WANG, L.; TOPPINEN, A.; JUSLIN, H. Use of wood in green building: a study of expert perspectives from the UK. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 65, p. 350–361, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.08.023>. Acesso em: 30 ago. 2026.

WANG, R. *et al.* Rolling shear performance of cross-laminated bamboo-balsa timber panels. **Construction and Building Materials**, Oxford, v. 299, p. 123973, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123973>. Acesso em: 30 ago. 2026.

WANG, Z.; YIN, T. Cross-laminated timber: a review on its characteristics and an introduction to Chinese practices. *In*: **Engineered Wood Products for Construction**. London: IntechOpen, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.5772/intechopen.98956>. Acesso em: 30 ago. 2026.

WANG, Z. *et al.* Influence of technical characteristics on the rolling shear properties of cross laminated timber by modified planar shear tests. **Maderas. Ciencia y tecnología**, Concepción, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2018005031601>. Acesso em: 30 ago. 2026.

WOODARD, A. C.; MILNER, H. R. Sustainability of timber and wood in construction. *In*: **Sustainability of Construction Materials**. Amsterdam: Elsevier, 2016. p. 129–157. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100370-1.00007-X>. Acesso em: 30 ago. 2026.

WU, G.; ZHONG, Y.; REN, H. Effects of grain pattern on the rolling shear properties of wood in cross-laminated timber. **Forests**, Basel, v. 12, n. 6, p. 668, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/f12060668>. Acesso em: 30 ago. 2026.

XIA, B. *et al.* Perceived obstacles to multi-storey timber-frame construction: an Australian study. **Architectural Science Review**, Abingdon, v. 57, n. 3, p. 169–176, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00038628.2014.912198>. Acesso em: 30 ago. 2026.

ZELINKA, S. L. *et al.* Small scale tests on the performance of adhesives used in cross laminated timber (CLT) at elevated temperatures. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, Oxford, v. 95, p. 102436, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2019.102436>. Acesso em: 30 ago. 2026.

ZHOU, Q. *et al.* Measurement of rolling shear modulus and strength of cross laminated timber fabricated with black spruce. **Construction and Building Materials**, Oxford, v. 64, p. 379–386, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.039>. Acesso em: 30 ago. 2026.

ZUBIZARRETA, M. *et al.* Modeling the environmental sustainability of timber structures: a case study. **Environmental Impact Assessment Review**, Oxford, v. 78, p. 106286, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2019.106286>. Acesso em: 30 ago. 2026.

ANEXO A – Script para determinação do Método Gama desenvolvido em *python*

```

import math

# --- Identificação do caso analisado
ensaio = "Vão variável" # Vão variável ou Cisalhamento inclinado ou Cisalhamento
vertical
configuracao = "P90" # P90 ou P45 ou P30

print("=====")
print(f"Ensaio: {ensaio} | Configuração: {configuracao}")
print("=====\\n")

# =====
# ENTRADAS — Método Gama
# Unidades:
# - mm para dimensões
# - MPa para módulos (E, Gvt, resistências)
# - N para carga P
# =====

# --- Geometria (mm)
w = 110.0 # largura da seção
h1 = 16.0 # camada superior
h2 = 16.0 # camada intermediária (transversal)
h3 = 16.0 # camada inferior

# --- Vão (mm)
L0 = 288.0 # distância entre apoios

# --- Propriedades mecânicas (MPa)
E1 = 6252.0 # camada superior (longitudinal)
E3 = 6252.0 # camada inferior (longitudinal)
E2 = 312.6 # camada transversal (Ec90 = Ec0/20)
Gvt = 301.13 # rolling shear (médio experimental do ensaio)

```

```

# --- Coeficientes gama
# gamma1 será calculado pela Eq.(5)
gamma3 = 1.0 # Eq.(6)

# --- Ações (N) -----
P = 15628.8 # carga concentrada no meio do vão (N)
Pflecha = 9625.5 # carga para verificação da flecha

# --- Resistências (MPa) — para checagens de ELU
fc0 = 25.74 # compressão paralela às fibras (camada superior)
ft0 = 32.99 # tração paralela às fibras (camada inferior)
fvt = 2.22 # rolling shear (camada transversal)

# =====
# 1) Áreas das camadas longitudinais (Eq. 3 e Eq. 4)
# =====

A1 = round(w * h1, 4)
A3 = round(w * h3, 4)

print(f"A1 = {A1:.4f} mm²")
print(f"A3 = {A3:.4f} mm²")
print("\n")

# =====
# 2) Coeficiente gama da camada superior (Eq. 5)
# =====

gamma1 = 1 / (1 + (math.pi**2 * E1 * A1 * h2) / (Gvt * (L0**2) * w))
gamma1 = round(gamma1, 4)

print(f"gamma1 = {gamma1:.4f}")
print(f"gamma3 = {gamma3:.4f}")

```

```
print("\n")
```

```
# =====
```

```
# 3) Distâncias dos centroides à linha neutra (Eq. 2 e Eq. 1)
```

```
# =====
```

```
a3 = (gamma1 * E1 * A1 * (h1/2 + h2 + h3/2)) / (gamma1 * E1 * A1 + gamma3 * E3 * A3)
```

```
a3 = round(a3, 4)
```

```
a1 = (h1/2 + h2 + h3/2) - a3
```

```
a1 = round(a1, 4)
```

```
print(f"a3 = {a3:.4f} mm")
```

```
print(f"a1 = {a1:.4f} mm")
```

```
print("\n")
```

```
# =====
```

```
# 4) Momentos de inércia das camadas longitudinais (Eq. 7 e Eq. 8)
```

```
# =====
```

```
I1 = round(w * (h1**3) / 12, 4)
```

```
I3 = round(w * (h3**3) / 12, 4)
```

```
print(f"I1 = {I1:.4f} mm^4")
```

```
print(f"I3 = {I3:.4f} mm^4")
```

```
print("\n")
```

```
# =====
```

```
# 5) Rigidez efetiva à flexão (Eq. 9)
```

```
# =====
```

```
Eeff = (
```

```
    E1 * I1
```

```

+ gamma1 * E1 * A1 * (a1**2)
+ E3 * I3
+ gamma3 * E3 * A3 * (a3**2)
)

```

```
Eeff = round(Eeff, 4)
```

```

print(f"Eeff = {Eeff:.4f} N·mm²")
print("\n")

```

```

# =====
# 6) Momento fletor máximo e força cortante (Eq. 10 e Eq. 14)
# =====

```

```
# Momento fletor máximo (Eq. 10)
```

```
M = (P * L0) / 4
```

```
M = round(M, 4)
```

```
# Força cortante (Eq. 14)
```

```
V = P / 2
```

```
V = round(V, 4)
```

```
print(f"M = {M:.4f} N·mm")
```

```
print(f"V = {V:.4f} N")
```

```
print("\n")
```

```

# =====
# 7) Verificações de ELU (Eq. 11, 12 e 13)
# =====

```

```
# Eq. (11) – Tensão de compressão na lamela superior (MPa)
```

```
sigma_c01 = (E1 * M * gamma1 * (a1 + 0.5 * h1)) / Eeff
```

```
sigma_c01 = round(sigma_c01, 4)
```

Eq. (12) – Tensão de tração na lamela inferior (MPa)

$\sigma_{t03} = (E3 * M * \gamma3 * (a3 + 0.5 * h3)) / E_{eff}$

$\sigma_{t03} = \text{round}(\sigma_{t03}, 4)$

Eq. (13) – Tensão de cisalhamento na camada transversal (*rolling shear*) (MPa)

$\tau_{vt} = ((\gamma1 * E1 * A1 * a1 + 0.5 * E2 * w * (h2**2)) * V) / (w * E_{eff})$

$\tau_{vt} = \text{round}(\tau_{vt}, 4)$

print("=== Verificações ELU ===")

print(f"sigma_c01 = {sigma_c01:.4f} MPa <= fc0 = {fc0:.2f} MPa")

print(f"sigma_t03 = {sigma_t03:.4f} MPa <= ft0 = {ft0:.2f} MPa")

print(f"tau_vt = {tau_vt:.4f} MPa <= fvt = {fvt:.2f} MPa")

print("\n")

print("ELU compressão:", "ATENDE" if sigma_c01 <= fc0 else "NÃO ATENDE")

print("ELU tração: ", "ATENDE" if sigma_t03 <= ft0 else "NÃO ATENDE")

print("ELU cisalhamento: ", "ATENDE" if tau_vt <= fvt else "NÃO ATENDE")

print("\n")

=====

8) Verificação de ELS – Flecha no meio do vão (Eq. 15)

=====

Eq. (15) – Flecha no meio do vão para carga concentrada

$\delta_y = (P_{flecha} * (L0**3)) / (48 * E_{eff})$

$\delta_y = \text{round}(\delta_y, 4)$

Limite de flecha (critério usual)

$\delta_{lim} = L0 / 300$

$\delta_{lim} = \text{round}(\delta_{lim}, 4)$

print("=== Verificação ELS ===")

print(f"delta_y = {delta_y:.4f} mm")

print(f"delta_lim = {delta_lim:.4f} mm")

```
print("\n")
```

```
print("ELS flecha:", "ATENDE" if delta_y <= delta_lim else "NÃO ATENDE")
```

```
print("\n")
```

DADOS CURRICULARES

IDENTIFICAÇÃO	
	AMAURO DA SILVA RIBAS JUNIOR 21/09/1993
Nacionalidade	brasileira
Nome em citações bibliográficas:	RIBAS JUNIOR, Amauri da Silva RIBAS JUNIOR, A. S.
Currículo Lattes	http://lattes.cnpq.br/1479664814157638
ORCID	https://orcid.org/0000-0002-1047-9698
outro identificador	URL
FORMAÇÃO ACADÊMICA	
2019/2021	Mestrado em Engenharia Mecânica — Mestre em Engenharia Mecânica Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP)
2013/2017	Graduação em Engenharia Industrial Madeireira — Engenheiro Industrial Madeireiro Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP)
PRODUÇÃO BIBLIOGRÁFICA	
RIBAS JUNIOR, A. S.; CRIADO, T. C.; SOUZA, A. J. D.; MOLINA, J. C. Simulação numérica ortotrópica não linear para monitoramento de ensaios de embutimento de madeira de acordo com a norma europeia BS EN 383 (2007). Matéria, Rio de Janeiro, v. 29, e20240544, 2024. CRIADO, T. C.; RIBAS JUNIOR, A. S.; MOLINA, J. C. Low-cost timber bridges for rural areas: a field survey and recommendations of interest. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v. 44, e20240544, 2024. ARAÚJO, P. L. S.; SOUZA, A. J. D.; RIBAS JUNIOR, A. S.; BÔAS, D. V.; LEITE, M. A. V.; MOLINA, J. C. Estudo numérico e experimental de elementos estruturais de madeira sujeitos à tração normal às fibras segundo as normas ABNT NBR 7190-3:2022 e ISO 13910:2005. Foco, v. 16, e3102, 2023. MOLINA, J. C.; CHRISTOFORO, A. L.; RIBAS JUNIOR, A. S. Embedding strength	

of Brazilian woods and recommendation for the Brazilian standard. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Structures and Buildings**, v. 173, p. 948–955, 2020.

RIBAS JUNIOR, A. S.; MOLINA, J. C. Wooden bridges with deck of sawn board and round beams: main orientations. **Australian Journal of Structural Engineering**, v. 21, p. 1–9, 2020.

PARTICIPAÇÃO EM BANCAS E ORIENTAÇÕES

Bancas de trabalhos de conclusão

SOUZA, A. J. D.; BÔAS, D. V.; RIBAS JUNIOR, A. S. Participação em banca de Mateus Carvalho Novaes de Macedo. **Fabricação de chips de banana verde**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Industrial Madeireira) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Itapeva, 2023.

LUNA, C. M. R.; CAMPOS, C. I.; RIBAS JUNIOR, A. S. Participação em banca de Tiago Marques Gregório. **Produção de filamento para impressão 3D à base da mistura de polímero ABS reciclado e biochar**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Itapeva, 2023.

Orientações

PARTICIPAÇÃO EM EVENTOS CIENTÍFICOS

WORKSHOP DA PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA, 7., 2023, Guaratinguetá. Avaliação da resistência e da rigidez de elementos de MLCC com defasagens da camada central em 90°, 45° e 30°. 2023. Apresentação de trabalho.

WORKSHOP DA PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA, 6., 2022, Guaratinguetá. Resistência ao embutimento conforme ABNT NBR 7190:1997 e ABNT NBR 7190:2022. 2022. Apresentação de trabalho.

CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNESP, 29., 2017, Bauru. Software para dimensionamento de superestruturas de pontes de madeira com tabuleiro serrado. 2017. Apresentação de trabalho.

