



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E
TERRITÓRIO (ILATIT)**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA CIVIL (PPGECI)**

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA E DA RIGIDEZ AO CISALHAMENTO ROLANTE DE PAINÉIS
MLCC PRODUZIDOS COM *PINUS SPP* E *EUCALYPTUS SPP***

OTÁVIO AUGUSTO SARTOR BODANESE

Foz do Iguaçu
2026

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA E DA RIGIDEZ AO CISALHAMENTO ROLANTE DE PAINÉIS MLCC
PRODUZIDOS COM *PINUS SPP* E *EUCALYPTUS SPP***

OTÁVIO AUGUSTO SARTOR BODANESE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Savaris.

Co - Orientador: Prof. Dr. André Jacomel Torii.

OTÁVIO AUGUSTO SARTOR BODANESE

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA E DA RIGIDEZ AO CISALHAMENTO ROLANTE DE PAINÉIS MLCC
PRODUZIDOS COM *PINUS SPP* E *EUCALYPTUS SPP***

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Savaris
UTFPR

Co – Orientador Prof. Dr. André Jacomel Torii
(UNILA)

Prof. Dr. Aref Kalilo Lima Kzam
UNILA

Prof. Dr. Rodrigo Scoczynski Ribeiro
UTFPR

Prof. Dr. Rodrigo Figueiredo Terezo
UDESC

Foz do Iguaçu, 20 de outubro de 2026.

Catalogação elaborada pelo Setor de Tratamento da Informação
Catalogação de Publicação na Fonte. UNILA - BIBLIOTECA LATINO-AMERICANA - CENTRAL

B666a

Bodanese, Otavio Augusto Sartor.

Avaliação da resistência e da rigidez ao cisalhamento rolante de painéis MLCC produzidos com pinus SPP e eucalyptus SPP / Otavio Augusto Sartor Bodanese. - Foz do Iguaçu, 2026.

137 fls.: il.

Universidade Federal da Integração Latino-Americana, ILATIT, PPGEI.

Orientador: Savaris, Gustavo.

Coorientador: Torii, André Jacomel.

1. Cisalhamento. 2. Estruturas de madeira (Construção civil). 3. Eucalipto. 4. Madeira de compressão. 5. Análise estrutural (Engenharia). I. Savaris, Gustavo. II. Torii, André Jacomel. III. Título.

CDU 624.011.1

RESUMO

O cisalhamento rolante das lamelas transversais é um mecanismo crítico no dimensionamento de painéis de Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC), pois afeta a resistência e a deformabilidade de elementos submetidos a ações paralelas e perpendiculares ao plano dos painéis. Esta pesquisa avaliou a resistência ao cisalhamento rolante (f_{vt}) e o módulo de cisalhamento rolante (G_{vt}) de painéis homogêneos de MLCC com três camadas, produzidos com lamelas de *Eucalyptus* spp. e *Pinus* spp. coladas com adesivo poliuretano monocomponente. Os painéis, constituídos por lamelas externas de 30 mm e lamela central de 22 mm, foram submetidos a ensaios de cisalhamento rolante por compressão, conforme a ABNT NBR 7190-7, e a ensaios de flexão de três pontos de pequeno vão (*short-span*) nas configurações transversal e longitudinal. A investigação compreendeu a caracterização das madeiras, a avaliação dos modos de ruptura, testes de normalidade, comparações pelo teste U de Mann–Whitney, análise de concordância de Bland–Altman e comparação entre resultados experimentais e as previsões dos métodos Gamma, K e da Analogia de Cisalhamento. A configuração de ensaio apresentou grande influência sobre a magnitude das propriedades medidas. No ensaio por compressão, o *Eucalyptus* spp. apresentou médias de f_{vt} e G_{vt} de 3,20 MPa e 56,67 MPa, respectivamente, superiores às do *Pinus* spp. (2,55 MPa e 43,64 MPa). Na flexão transversal, as espécies não apresentaram diferença estatisticamente significativa quanto à resistência ou à rigidez: os módulos de rigidez foram de 333,66 MPa para *Eucalyptus* spp. e 326,65 MPa para *Pinus* spp., enquanto as resistências foram de 4,17 MPa e 4,04 MPa, respectivamente. A flexão longitudinal forneceu as menores resistências, 0,96 MPa para *Eucalyptus* spp. e 0,47 MPa para *Pinus* spp., e valores de G_{vt} de 50,29 MPa e 32,78 MPa, respectivamente. Como a ruptura na configuração longitudinal foi predominantemente por flexão, o ensaio não se mostrou adequado para a caracterização direta do cisalhamento rolante. A análise de Bland–Altman confirmou que os métodos não são intercambiáveis: a flexão transversal superestimou a rigidez em até onze vezes em comparação com o ensaio por compressão, em razão da ação composta das lamelas externas. Os métodos K e da Analogia de Cisalhamento produziram estimativas conservadoras e próximas aos resultados de flexão, enquanto o Método Gamma foi demasiadamente conservador. Conclui-se que o *Eucalyptus* spp. apresenta potencial para aplicação em painéis estruturais de MLCC, especialmente quando a camada transversal é solicitada de forma mais direta, e que o método de ensaio deve ser escolhido de acordo com a condição estrutural simulada e a propriedade que se pretende representar.

Palavras-chave: Cisalhamento rolante. Cisalhamento por compressão. Flexão. Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC). Métodos analíticos.

ABSTRACT

Rolling shear in transverse lamellae is a critical design mechanism for cross-laminated timber (CLT) panels because it affects the strength and deformability of elements subjected to in-plane and, particularly, out-of-plane loading. This study evaluated rolling shear strength (f_{vt}) and rolling shear modulus (G_{vt}) in homogeneous three-layer CLT panels manufactured from *Eucalyptus* spp. and *Pinus* spp. lamellae bonded with one-component polyurethane adhesive. The panels comprised 30 mm outer lamellae and a 22 mm core lamella. They were tested by compression shear, in accordance with ABNT NBR 7190-7, and by short-span three-point bending in transverse and longitudinal configurations. The investigation included timber characterization, failure-mode assessment, normality testing, Mann–Whitney U comparisons, Bland–Altman agreement analysis, and comparison of the experimental results with predictions from the Gamma Method, K-Method, and Shear Analogy. The test configuration determined the measured properties. In compression shear, *Eucalyptus* spp. achieved mean f_{vt} and G_{vt} values of 3.20 MPa and 56.67 MPa, respectively, exceeding those of *Pinus* spp. (2.55 MPa and 43.64 MPa). In transverse bending, the species did not differ significantly in either strength or stiffness: apparent moduli were 333.66 MPa for *Eucalyptus* spp. and 326.65 MPa for *Pinus* spp., while strength values were 4.17 MPa and 4.04 MPa, respectively. Longitudinal bending yielded the lowest strength values, 0.96 MPa for *Eucalyptus* spp. and 0.47 MPa for *Pinus* spp., and G_{vt} values of 50.29 MPa and 32.78 MPa, respectively. Because failure in this configuration was predominantly flexural, the test was not suitable for direct rolling-shear characterization. Bland–Altman analysis confirmed that the methods are not interchangeable: transverse bending overestimated stiffness by up to elevenfold relative to compression shear because of the composite action of the outer lamellae. The K-Method and Shear Analogy produced conservative estimates close to the bending results, whereas the Gamma Method was overly conservative. *Eucalyptus* spp. therefore shows potential for structural CLT panels, particularly when the transverse layer is more directly stressed; the test method, however, must be selected according to the simulated structural condition and the property to be represented.

Key words: Analytical Models. Bending. CLT. Compression-Shear. Rolling Shear.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Exemplo de um painel MLCC.....	14
Figura 1.2: Mecanismo de ruptura causado pelo cisalhamento rolante	15
Figura 2.1: Representação dos 3 eixos ortogonais de uma peça de madeira	21
Figura 2.2: Exemplos da espécie <i>Pinus</i> : A) <i>Pinus Elliottii</i> ; B) <i>Pinus Taeda</i>	25
Figura 2.3: Exemplo de uma peça de MLC produzida com madeira de <i>Albizia Procera</i>	29
Figura 2.4: Esquemática ilustrativa de um painel MLCC	30
Figura 2.5: Painéis de MLCC A) carregamento perpendicular ao plano do painel; B) Carregamento paralelo ao plano do painel.	32
Figura 2.6: Deformação causada pelo <i>cisalhamento rolante</i>	34
Figura 2.7: Demonstração dos esforços causadores do efeito cisalhamento rolante.....	35
Figura 2.8: Ensaio de flexão de 4 pontos.	38
Figura 2.9: Ensaio de cisalhamento por compressão normativo	39
Figura 2.10: Seção transversal do painel de MLCC A) real, B) equivalente.	43
Figura 3.1: Fachada da XLAM BRASIL/Pisosul	47
Figura 3.2: Corpo de prova utilizado no ensaio de umidade	49
Figura 3.3: Modelo de corpo de prova utilizado no ensaio de cisalhamento	51
Figura 3.4: Diagrama de carregamento para determinação do módulo de elasticidade longitudinal	52
Figura 3.5: Painéis MLCC produzidos e doados pela Pisosul/XLAM do Brasil	54
Figura 3.6: Início do processo de cortes dos corpos de prova.	55
Figura 3.7: Corpos de prova aferidos, marcados e classificados.	55
Figura 3.8: Ensaio de flexão de 3 pontos - lamela central paralela ao comprimento (Configuração longitudinal).....	56
Figura 3.9: Ensaio de flexão de 3 pontos – lamela central com orientação perpendicular (Configuração transversal)	57
Figura 3.10: Aparato metálico utilizado no ensaio de cisalhamento por compressão.....	59
Figura 3.11: Ensaio de cisalhamento por compressão	60
Figura 4.1: Gráfico Força - Deslocamento, obtido nos ensaios de cisalhamento por compressão para a espécie de <i>Eucalyptus spp.</i>	73
Figura 4.2: Gráfico Força – Deslocamento, obtido nos ensaios de cisalhamento por compressão para a madeira de <i>Pinus spp.</i>	75
Figura 4.3: a) Corpo de prova do ensaio de flexão transversal (direção de maior desempenho); b) Corpo de prova do ensaio de flexão longitudinal (direção de menor desempenho).	78
Figura 4.4: Gráfico Força – Deslocamento, obtido nos ensaios de flexão transversal para a madeira de <i>Pinus spp.</i>	82
Figura 4.5: Gráfico Força – Deslocamento, obtido nos ensaios de flexão longitudinal para a madeira de <i>Pinus spp.</i>	85
Figura 4.6: Gráfico Força – Deslocamento, obtido nos ensaios de flexão transversal para a madeira de <i>Eucalyptus spp.</i>	87
Figura 4.7: Gráfico Força – Deslocamento, obtido nos ensaios de flexão longitudinal para a madeira de <i>Eucalyptus spp.</i>	89
Figura 4.8: Modos de falha considerados na análise: A) Cisalhamento rolante + delaminação; B) Flexão + delaminação; C) Cisalhamento rolante puro (flexão); D) Cisalhamento rolante + delaminação; E) Cisalhamento rolante puro (compressão); F) Cisalhamento rolante + delaminação.	91
Figura 4.9: Análise de concordância de Bland-Altman para o <i>Eucalyptus spp.</i>	

comparando os resultados de resistência (f_{vt}) dos métodos de compressão e flexão transversal.....	110
Figura 4.10: Análise de concordância de Bland-Altman para o <i>Eucalyptus spp.</i> comparando os resultados do módulo de cisalhamento (G_{vt}) dos métodos de compressão e flexão transversal.....	111
Figura 4.11: Análise de concordância de Bland-Altman para o <i>Pinus spp.</i> comparando os resultados de resistência (f_{vt}) dos métodos de compressão e flexão transversal.....	112
Figura 4.12: Análise de concordância de Bland-Altman para o <i>Pinus spp.</i> comparando os resultados de módulo de cisalhamento (G_{vt}) dos métodos de compressão e flexão.	113
Figura 4.13: Comparação gráfica dos resultados médios de resistência ao cisalhamento rolante (f_{vt}) entre os métodos analíticos e os resultados experimentais	118
Figura 4.14: Comparação gráfica pelo erro percentual médio dos métodos analíticos com os resultados experimentais	119

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANSI/APA	<i>American National Standards Institute/ APA – The Engineered Wood Association</i>
ANOVA	<i>Analysis of Variance</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BSI	<i>British Standards Institution</i>
CLT	<i>Cross Laminated Timber</i>
CP	Corpo de Prova
CV	Coeficiente de variação
ELS	Estado Limite de Serviço
ELU	Estado Limite Último
EN	<i>European Norm</i>
EUS	<i>European Spruce</i>
EWP	<i>Engineered Wood Products</i>
GLULAM	<i>Glued Laminated Timber</i>
IBÁ	Indústria Brasileira de Árvores
ILATT	Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformer</i> (transdutor diferencial variável linear)
MLC	Madeira Lamelada Colada
MLCC	Madeira Lamelada Colada Cruzada
NBR	Norma Brasileira
PPGECI	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
SPF	<i>Spruce Pine Fir</i>
UNEP	<i>United Nations Environment Programme</i>
UNILA	Universidade Federal da Integração Latino-Americana
USDA	<i>United States Department of Agriculture</i>
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LISTA DE SÍMBOLOS

Direções, propriedades e grandezas mecânicas

- L — Direção longitudinal, paralela às fibras.
 R — Direção radial da madeira.
 T — Direção tangencial da madeira.
 E_0 — Módulo de elasticidade paralelo às fibras.
 E_{90} — Módulo de elasticidade perpendicular às fibras.
 E_R — Módulo de elasticidade na direção radial.
 E_T — Módulo de elasticidade na direção tangencial.
 E_i — Módulo de elasticidade da i -ésima lamela.
 E_j — Módulo de elasticidade da j -ésima lamela.
 $E_{0,med}$ — Módulo de elasticidade longitudinal médio.
 $E_{m,app}$ — Módulo de elasticidade transversal aparente.
 G_{vt} — Módulo de cisalhamento rolante ou rigidez ao cisalhamento rolante.
 G_{rj} — Módulo de cisalhamento rolante da j -ésima lamela transversal.
 G_{LR} — Módulo de cisalhamento no plano longitudinal-radial.
 G_{LT} — Módulo de cisalhamento no plano longitudinal-tangencial.
 G_{TR} — Módulo de cisalhamento no plano tangencial-radial.
 f_{vt} — Resistência ao cisalhamento rolante.
 f_{v0} — Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras.
 f_{c0} — Resistência à compressão paralela às fibras.
 τ — Tensão de cisalhamento rolante.
 $\sigma_{10\%}$ — Tensão de compressão correspondente a 10% de f_{c0} .
 $\sigma_{50\%}$ — Tensão de compressão correspondente a 50% de f_{c0} .
 $\varepsilon_{10\%}$ — Deformação específica correspondente a $\sigma_{10\%}$.
 $\varepsilon_{50\%}$ — Deformação específica correspondente a $\sigma_{50\%}$.
 ν_{LR} — Coeficiente de Poisson no plano longitudinal-radial.
 ν_{LT} — Coeficiente de Poisson no plano longitudinal-tangencial.
 ν_{RT} — Coeficiente de Poisson no plano radial-tangencial.

Geometria, forças e rigidez à flexão

- A — Área da seção transversal do corpo de prova.
 A_i — Área da seção transversal da i -ésima lamela.
 A_j — Área da seção transversal da j -ésima lamela.
 A_{v0} — Área inicial da seção crítica no ensaio de cisalhamento paralelo às fibras.
 b — Largura do corpo de prova ou da seção transversal.
 b_i — Largura da i -ésima lamela longitudinal.
 b_j — Largura da j -ésima lamela transversal.
 c — Comprimento do corpo de prova.
 h — Espessura da lamela longitudinal.
 h_i — Espessura/altura da i -ésima lamela longitudinal.
 h_j — Espessura da j -ésima lamela transversal.
 t — Espessura da lamela transversal.
 t_{cam} — Espessura da camada transversal central.

L_0 — Vão livre do ensaio de flexão.
 L_{eff} — Comprimento efetivo da viga.
 I_i — Momento de inércia da i -ésima lamela.
 I_{eq} — Momento de inércia equivalente da seção.
 S — Momento estático de área.
 $S_{1,3-lamelas}$ — Momento estático de área do corpo de prova de três lamelas.
 Z_i — Distância entre o centroide da i -ésima lamela e a linha neutra do painel.
 Z_j — Distância entre o centro geométrico da j -ésima lamela e a linha neutra do painel.
 $(EI)_{eff}$ — Rigidez efetiva à flexão da seção.
 $(EI)_A$ — Rigidez à flexão da viga virtual A.
 $(EI)_B$ — Rigidez à flexão da viga virtual B.
 EQ — Momento estático de área ponderado pelo módulo de elasticidade.

Carregamento, medições e parâmetros de ensaio

F — Força aplicada no ensaio de flexão.
 F_{max} — Força máxima de ruptura.
 $F_{v0,max}$ — Força última de cisalhamento paralelo às fibras.
 $F_{c0,max}$ — Força última de compressão paralela às fibras.
 $F_{0,15\%}$ — Força correspondente ao deslocamento de 0,15% do vão.
 $F_{0,30\%}$ — Força correspondente ao deslocamento de 0,30% do vão.
 $F_{0,75}$ — Força que produz o deslocamento de 0,75 mm.
 $F_{1,00}$ — Força que produz o deslocamento de 1,00 mm.
 $u_{0,15\%}$ — Deslocamento no meio do vão associado a $F_{0,15\%}$.
 $u_{0,30\%}$ — Deslocamento no meio do vão associado a $F_{0,30\%}$.
 V — Força cortante.
 V_B — Força cortante suportada pela viga virtual B.
 W_i — Massa inicial da madeira no ensaio de umidade.
 W_s — Massa seca da madeira.
 V_s — Volume saturado da madeira.

Índices, estatística e coeficientes

i — Índice da lamela/camada considerada.
 j — Índice da lamela transversal considerada.
 n — Número de lamelas/camadas na somatória.
 Y_i ou γ_i — Fator de eficiência da conexão da i -ésima camada.
 γ_1 — Fator de eficiência da conexão da camada transversal no painel de três camadas.
 K — Coeficiente de cisalhamento, adimensional.
 $E\%$ — Erro percentual médio entre valor teórico e experimental.
 $\bar{d}$ — Diferença média entre dois métodos.
 s — Desvio-padrão.
 H_0 — Hipótese nula.
 H_1 — Hipótese alternativa.
 p — P-valor.
 W — Estatística do teste de Shapiro–Wilk.

CV — Coeficiente de variação.

Unidades, dimensões e símbolos físicos

% — Porcentagem.
 ° — Grau angular ou grau Celsius, conforme o contexto.
 ± — Mais ou menos.
 π — Constante pi.
 cos — Função cosseno.
cm — Centímetro.
 cm^2 — Centímetro quadrado.
 cm^3 — Centímetro cúbico.
g — Grama.
 g/m^2 — Grama por metro quadrado.
ha — Hectare.
kg — Quilograma.
 kg/m^3 — Quilograma por metro cúbico.
kN — Quilo newton.
kWh — Quilowatt-hora.
m — Metro.
 m^2 — Metro quadrado.
 m^3 — Metro cúbico.
 $m^3/ha/ano$ — Metro cúbico por hectare por ano.
min — Minuto.
mm — Milímetro.
 mm^2 — Milímetro quadrado.
 mm^3 — Milímetro cúbico.
 mm^4 — Milímetro à quarta potência.
mm/min — Milímetro por minuto.
mm/s — Milímetro por segundo.
MPa — Mega Pascal.
MPa/min — Mega Pascal por minuto.
GPa — Giga Pascal.
N — Newton.
 N/mm^2 — Newton por milímetro quadrado.
N · mm — Newton-milímetro.
 $N · mm^2$ — Newton-milímetro quadrado.
 CO_2 — Dióxido de carbono.

Operadores e relações que aparecem nas equações

+ — Adição.
 – — Subtração.
 × ou * — Multiplicação.
 / ou fração — Divisão.
 = — Igualdade.
 < e > — Menor e maior que.
 ≤ e ≥ — Menor ou igual e maior ou igual.
 Σ — Somatório.

SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS	9
1 INTRODUÇÃO.....	14
1.1 JUSTIFICATIVA	16
1.2 OBJETIVO GERAL.....	17
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1 PAPEL DA MADEIRA NA CONSTRUÇÃO	19
2.1.1 <i>Propriedades físicas e mecânicas da madeira</i>	20
2.1.2 <i>Vantagens do uso de madeira e seus produtos</i>	21
2.1.3 <i>Madeiras de florestas plantadas</i>	23
2.1.4 <i>Produtos de madeira engenheirada para construção civil</i>	29
2.1.5 <i>Propriedades mecânicas dos painéis de MLCC</i>	31
2.2 CISALHAMENTO ROLANTE (<i>ROLLING SHEAR</i>) EM PAINÉIS DE MLCC.....	34
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	47
3.1 MATERIAIS UTILIZADOS	47
3.2 CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DA MADEIRA	48
3.2.1 <i>Teor de Umidade</i>	48
3.2.2 <i>Densidade básica</i>	50
3.2.3 <i>Resistência ao cisalhamento</i>	50
3.2.4 <i>Propriedades elásticas</i>	51
3.2.5 <i>Resistência à compressão paralela às fibras (f_{co})</i>	53
3.3 ENSAIOS EM MLCC.....	53
3.3.1 <i>Ensaio de Flexão de três pontos</i>	56
3.3.2 <i>Ensaio de cisalhamento por compressão</i>	59
3.4 ANÁLISE VISUAL DE FALHA.....	61
3.5 AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS	62
3.5.1 <i>Parâmetros descritivos</i>	63
3.5.2 <i>Testes de normalidade</i>	63
3.5.3 <i>Testes de hipótese</i>	64
3.5.4 <i>Verificação da concordância</i>	65
3.6 MODELOS TEÓRICOS DE CÁLCULO	66
3.6.1 <i>Premissas constitutivas e parâmetros de entrada</i>	66
3.6.2 <i>Matriz de comparação e métricas de acurácia</i>	67
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	69
4.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS E FÍSICAS DAS MADEIRAS UTILIZADAS	69
4.2 ENSAIO DE CISALHAMENTO ROLANTE POR COMPRESSÃO	69
4.3 ENSAIO DE FLEXÃO A 3 PONTOS	77
4.4 ANÁLISE VISUAL DE FALHA	91
4.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	95
4.5.1 <i>Testes de normalidade de Shapiro-Wilk</i>	96
4.5.2 <i>Testes de hipótese U de Mann-Whitney</i>	97
4.5.3 <i>Análise de concordância de Bland – Altman</i>	109
4.6 MÉTODOS ANALÍTICOS.....	115
5 CONCLUSÃO.....	122
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	126
REFERÊNCIAS.....	128

1 INTRODUÇÃO

Diante da necessidade de reduzir as emissões de carbono na indústria da construção civil, nos últimos anos tornou-se prioritária a substituição de materiais convencionais poluidores por opções mais sustentáveis. Dentre esses materiais de menor pegada de carbono, os produtos engenheirados confeccionados com madeira de florestas plantadas se destacam por seu aproveitamento mais eficiente da matéria-prima e pelo potencial de reutilização.

Por isso, observou-se a ascensão de pesquisas relacionadas ao uso de madeira na construção civil, o que levou à criação e aperfeiçoamento de técnicas de construção em madeira, e dentre elas destaca-se o *Cross Laminated Timber* (CLT), cuja tradução dada pela norma brasileira NBR 7190 (ABNT, 2022) é Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC).

O MLCC é um produto tecnológico de madeira com função estrutural, composto por camadas de lamelas de madeira maciça coladas perpendicularmente entre si, utilizando adesivo de desempenho estrutural. A disposição cruzada das lamelas confere ao painel elevada resistência e estabilidade dimensional. A Figura 1.1 mostra um exemplo de painel MLCC.

Figura 1.1: Exemplo de um painel MLCC



Fonte: Urbem, 2025.

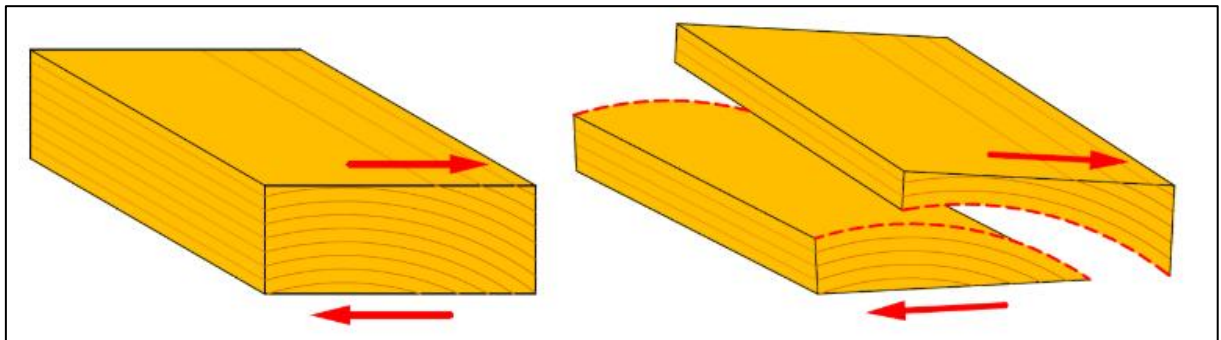
A construção em MLCC apresenta diversas vantagens em relação às estruturas convencionais de concreto e alvenaria, dentre elas, destacam-se: excelente

relação resistência-peso, potencial de pré-fabricação de elementos estruturais e de vedação, o que reduz significativamente o tempo de construção, menor necessidade de mão de obra e a baixa geração de resíduos.

Devido à sua estrutura peculiar, o MLCC possui um comportamento mecânico próprio e, para que sua aplicação seja otimizada e amplamente adotada, é necessário que se entenda o seu comportamento estrutural e suas propriedades mecânicas.

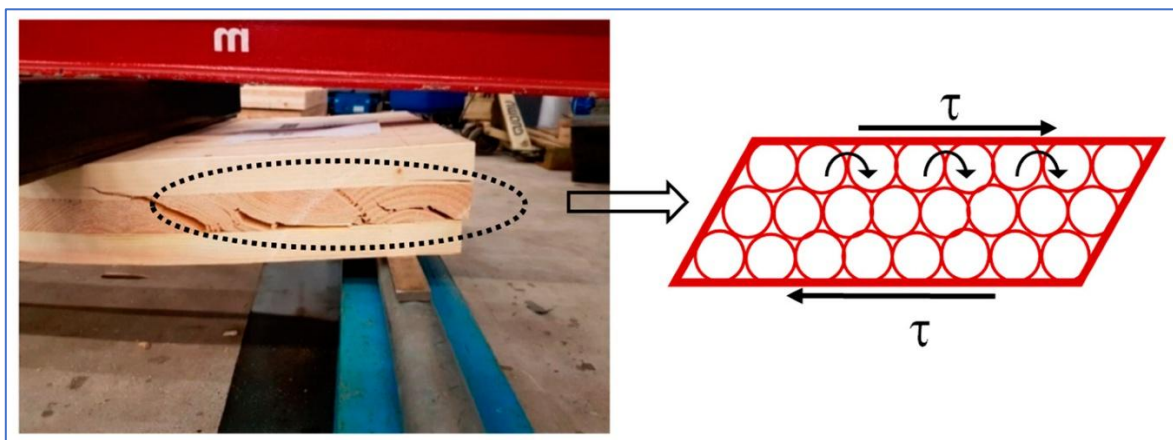
Dentre os fenômenos críticos no dimensionamento de painéis MLCC, destaca-se o cisalhamento rolante, que consiste na falha por cisalhamento das lamelas transversais dos painéis MLCC, quando submetidos a esforços de flexão ou esforços transversais. O cisalhamento rolante ocorre de forma característica pelo cisalhamento tangencial (paralelo aos anéis de crescimento) da madeira, que faz as fibras “rolarem” entre as demais, como apresentado nas Figuras 1.2 e 1.3.

Figura 1.2: Mecanismo de ruptura causado pelo cisalhamento rolante



Fonte: Junior, 2020.

Figura 1.3: Fenomenologia de falha do cisalhamento rolante em um painel MLCC



Fonte: Sandoli, Calderoni, 2020.

A norma ABNT NBR 7190-7 (ABNT, 2022), propõe duas metodologias específicas para os ensaios de caracterização da resistência ao cisalhamento rolante, baseadas em ensaios de flexão e compressão, que apresentam diferenças significativas entre seus resultados e, portanto, requerem validação e comparação com outras abordagens presentes na literatura. Adicionalmente, a normatização e padronização dos métodos de ensaio são cruciais para a obtenção de resultados consistentes e comparáveis.

As metodologias de produção, ensaios e dimensionamento de painéis de MLCC foram adequadas, especializadas e aperfeiçoadas para painéis produzidos com madeiras de coníferas (*Softwoods*). Há também a possibilidade de uso de madeiras de folhosas (*Hardwoods*) na produção de MLCC, o que é interessante devido à maior densidade, resistência e possível disponibilidade local de algumas dessas espécies. Portanto, o uso de folhosas na produção de MLCC deve ter sua eficácia verificada, e o uso das metodologias de ensaio e modelos teóricos de cálculo deve ser adaptado às suas características.

Nesse sentido, este trabalho visa aprofundar o conhecimento acerca do desempenho de painéis MLCC ao cisalhamento rolante, bem como avaliar as diferenças entre as espécies utilizadas, os tipos de ensaios e métodos analíticos de cálculo recomendados na literatura. Espera-se contribuir para o avanço das técnicas de construção sustentável, promovendo a adoção de materiais ecológicos e de alto desempenho na indústria da construção civil.

1.1 JUSTIFICATIVA

O MLCC tem se mostrado um material de engenharia inovador, combinando alta resistência mecânica, flexibilidade arquitetônica e elevado potencial de pré-fabricação com uma pegada de carbono reduzida. No entanto, para que sua aplicação seja otimizada e amplamente adotada, é imprescindível um entendimento aprofundado de suas propriedades e comportamento estrutural, especialmente em relação à resistência e a rigidez ao cisalhamento rolante, que são parâmetros críticos que influenciam o desempenho à flexão e à segurança das construções em MLCC.

A resistência e a rigidez ao cisalhamento rolante são influenciadas por diversos fatores, incluindo a espécie e densidade da madeira utilizada, a geometria

dos painéis e a direção de aplicação dos carregamentos. Estudos preliminares sugerem que madeiras de coníferas apresentam comportamentos distintos dos de folhosas no seu desempenho ao cisalhamento rolante, os quais necessitam ser rigorosamente avaliados para garantir a confiabilidade no dimensionamento dos painéis de MLCC.

Paralelamente, a normatização e padronização dos métodos de ensaio são cruciais para a obtenção de resultados consistentes e comparáveis. A norma ABNT NBR 7190-7 (ABNT, 2022), por exemplo, propõe duas metodologias específicas para os ensaios de cisalhamento rolante, baseados em ensaios de flexão e compressão, que, de acordo com Silva et al. (2023), apresentam diferenças significativas entre seus resultados e, portanto, requerem validação e comparação com outras abordagens presentes na literatura.

Além disso, o interesse pelo uso de folhosas como madeira principal na produção de MLCC apresenta um campo promissor, uma vez que essas madeiras tendem a apresentar maior densidade, resistência, e elevada disponibilidade. Todavia, a eficácia desses materiais ainda precisa ser comprovada por meio de estudos detalhados que avaliem seu desempenho específico em relação ao cisalhamento rolante, visto que as normativas, ensaios, diretrizes e processos de produção de MLCC foram desenvolvidos e são voltados ao uso das coníferas.

Considerando esses aspectos, a presente pesquisa visa avaliar a resistência e a rigidez ao cisalhamento rolante de painéis de MLCC, construídos com espécies comumente encontradas na silvicultura nacional, avaliando as diferenças entre as metodologias de ensaios baseadas em ensaios de flexão e cisalhamento por compressão, e métodos analíticos de cálculo recomendados nas normativas e na literatura. Os resultados colaboram para a seleção adequada de materiais, metodologias de cálculo e ensaios mais eficazes, contribuindo para o avanço da engenharia de estruturas e a promoção de estruturas de madeira mais seguras e menos onerosas.

1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar a resistência e a rigidez ao cisalhamento rolante de painéis de MLCC constituídos por lamelas de madeira de

Pinus spp. e *Eucalyptus spp.*.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Determinar a resistência e a rigidez ao cisalhamento rolante de painéis MLCC feitos em de *Pinus spp.* e *Eucalyptus spp.*;
- b) Avaliar a influência da espécie na resistência e rigidez ao cisalhamento rolante de painéis MLCC;
- c) Avaliar as diferenças entre os resultados das metodologias de ensaio de flexão de pequeno vão (*Short span*) e do ensaio de cisalhamento por compressão proposto pela norma ABNT NBR 7190-7 (ABNT, 2022);
- d) Avaliar a eficácia dos métodos analíticos de cálculo da resistência ao cisalhamento rolante propostos na literatura;
- e) Avaliar o uso da folhosa *Eucalyptus spp* como madeira principal na produção de painéis de madeira lamelada colada cruzada.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A presente revisão bibliográfica busca abordar os conceitos sobre a temática deste trabalho. De início, discute-se sobre a utilização da madeira no Brasil, com uma breve contextualização histórica, em seguida, coloca-se em pauta os produtos engenheirados de madeira. Posteriormente, conceitua-se a Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC), sua aplicação e fatores que afetam o seu desempenho estrutural.

2.1 PAPEL DA MADEIRA NA CONSTRUÇÃO

Para a construção civil, a madeira foi um dos primeiros elementos a serem utilizados, devido à sua abundância e fácil usinagem, ela foi utilizada nas mais diversas construções realizadas desde os primórdios, estando presente em: silos, casas, estradas e pontes (De Araújo, 2013). Entretanto, devido às limitações da tecnologia e as requisições de edificações mais altas e complexas, o concreto e o aço dominaram o mercado da construção por décadas (Brandner et al., 2016), e as estruturas tradicionais em madeira se reduziram a construções relativamente simples feitas com madeira maciça e com dimensões limitadas (Ren et al., 2023).

Para a área de engenharia e construção, a madeira é o material de escolha para fôrmas, estacas, cercas, escoras, pisos, decks, esquadrias, forros, cunhas, pinos, pilares, escadas, vigas e caibros. Também segue essa tendência na indústria moveleira, onde a madeira é a matéria-prima para mesas, armários, camas, estantes (De Araujo et al., 2017).

Com o passar do tempo, as desvantagens do uso de concreto e aço na construção se tornaram aparentes, isso se deve ao seu elevado custo durante toda a cadeia (produção, transporte, instalação e manutenção), que produz quantias massivas de entulho (Ren et al., 2023). A madeira é o único dos materiais citados que pode ser classificado como sustentável pois a cadeia de produção de materiais como o aço, concreto e cerâmica, necessita que pedras, minérios e solo sejam mecanicamente removidos do chão, a madeira em contrapartida, requer que as camadas superficiais do solo permaneçam intactas para que as florestas plantadas possam se desenvolver e no futuro se colha a madeira (Ramage et al., 2017).

Antigamente, a maior parte da madeira utilizada industrialmente provinha de

árvores velhas de florestas naturais. No entanto, com a crescente de áreas de preservação e diminuição de áreas naturais de florestas exploráveis, a utilização de madeira de ciclos curtos aumentou exponencialmente, principalmente pela utilização das espécies de Pinus e Eucalipto. Devido a isso, nota-se a importância de compreender a diferenciação e potencialidade das propriedades físicas, químicas, anatômicas e mecânicas das árvores de ciclos curtos (Ballarin; Palma, 2003; Gonçalves; Néri, 2005).

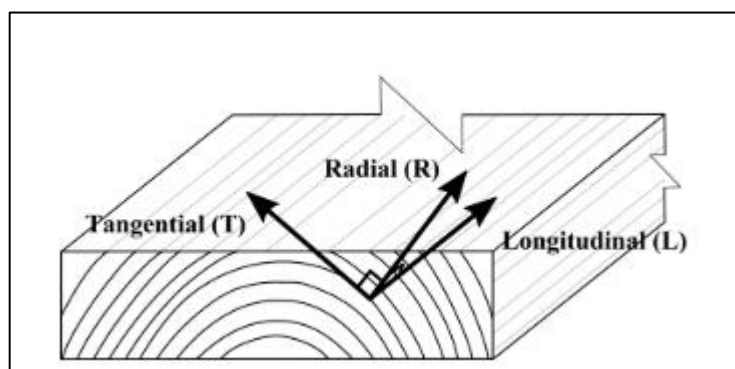
A madeira é um material que possui grande versatilidade, excelente relação entre peso específico e resistência mecânica, e ainda possui resistência a compressão comparável com o concreto, isso resulta em segurança para estruturas de grande porte (Ramage et al., 2017).

Apesar dos benefícios citados, a madeira no Brasil atual é um material construtivo subutilizado, isso se deve, em partes, pela falta de tecnologia e compreensão acerca das propriedades do material em diferentes aplicações (Nascimento et al., 2013). Na Europa, o desempenho ao fogo, o apodrecimento e o dano por insetos também são barreiras para a adoção em maior escala de edificações em madeira (Espinoza et al., 2016).

2.1.1 Propriedades físicas e mecânicas da madeira

A madeira é um material ortotrópico, portanto possui propriedades mecânicas que diferem ao longo dos três eixos ortogonais, apresentados na Figura 2.1 (Nero; Christopher; Ngo, 2022). O eixo longitudinal (L) está alinhado à direção das fibras da madeira, enquanto os demais eixos são transversais em relação aos anéis de crescimento e, portanto, ortogonais as fibras da madeira (Franzoni et al., 2016; Green; Winandy; Kretschmann, 1999).

Figura 2.1: Representação dos 3 eixos ortogonais de uma peça de madeira



Fonte: Franzoni et al. (2016)

O comportamento mecânico e as propriedades elásticas de materiais com anisotropia cilíndrica, assim como a madeira, dependem do tipo e da direção do carregamento. Nove coeficientes independentes de elasticidade são necessários para descrever completamente o comportamento elástico da madeira: três módulos de elasticidade na direção de cada eixo principal (E_0 ; E_R ; E_T), três módulos de cisalhamento (G_{LR} ; G_{LT} ; G_{TR}) e três coeficientes de *Poisson* (V_{LR} , V_{LT} e V_{RT}) (Sandoli; Calderoni, 2020; Arriaga et al., 2023).

Ainda, devido à similaridade entre as propriedades mecânicas nas direções radial e tangencial, os padrões dos anéis de crescimento geralmente não são mapeados em peças de madeira serrada e em produtos engenheirados de madeira baseados em lamelas. Por conseguinte, a madeira é frequentemente tratada como um material transversalmente isotrópico, ou seja, as propriedades mecânicas nas direções radiais e tangenciais podem ser consideradas equivalentes para fins de modelagem matemática (Thelandersson; Larsen, 2003).

2.1.2 Vantagens do uso de madeira e seus produtos

A indústria da construção civil é um dos maiores contribuidores das emissões de dióxido de carbono (CO_2), isso acontece devido à produção dos materiais mais comumente utilizados, como o aço e o concreto (Abed et al., 2022). Estima-se que 21% de toda a produção de gases agravadores do efeito estufa são resultado direto das construções de engenharia (UNEP, 2024).

Entende-se que a extração e produção desses materiais gera volume significativo de gases que agravam o efeito estufa, portanto, a indústria da construção

civil representa um importante alicerce para a redução de emissões de CO₂ (Abed et al., 2022).

Uma das soluções encontradas para a redução das emissões é a substituição dos materiais convencionais, que são não renováveis e intensivamente emissivos, por alternativas mais sustentáveis que minimizam a depleção de recursos e emissão de dióxido de carbono (Abed et al., 2022; Hassan; Öberg; Gezelius, 2019).

Plantas lenhosas podem retirar enormes quantidades de carbono da atmosfera, ou utilizando para o seu crescimento, e estas reservas são duradouras e renováveis (Russell; Kumar, 2017). Globalmente, as florestas representam cerca de 861 ± 66 peta gramas de carbono armazenado, e os processos de reflorestamento e regeneração das florestas desmatadas armazenam anualmente aproximadamente $1,6 \pm 0,5$ peta gramas/ano de gases que contribuem para o efeito estufa (Pan et al., 2011).

Em uma comparação entre o processo de produção da madeira e o de materiais mais tradicionais, como a alvenaria, o concreto e o aço, é evidenciado que a madeira é a solução mais sustentável. Isso se deve pelo menor consumo energético em sua fabricação, e pela capacidade de armazenamento de dióxido de carbono (CO₂) durante o seu ciclo de crescimento (Churkina et al., 2020). Como o MLCC é majoritariamente feito em madeira, material de baixas emissões de carbono, gases estufa e baixo consumo de energia em sua produção, promover o uso de MLCC melhora diretamente o controle da poluição e consumo de recursos do setor construtivo (Ren et al., 2024).

Os elementos em MLCC são mais leves que os similares em concreto, cerca de 1/6 da massa, o que reduz o peso geral da construção, e desse modo, pode ser construída uma fundação mais barata e de mais fácil execução, devido também a menor massa, os custos logísticos podem ser reduzidos (Hassan; Öberg; Gezelius, 2019).

Os produtos engenheirados de madeira apresentam grandes vantagens, especialmente as peças coladas, pode-se citar a grande versatilidade construtiva, o potencial de pré-fabricação, gera poucos resíduos, reduz o tempo e os custos de construção, possui baixa densidade e elevada resistência mecânica, pode ser fabricada em grandes dimensões, também possibilita a utilização de recortes e peças de menor resistência (Narloch; Librelotto, 2018; Oliveira, 2016). O MLCC viabilizou a utilização de madeira em projetos de grande escala na forma de painéis

engenheirados, superando limitações técnicas dos sistemas tradicionais de madeira (Wieruszewski; Mazela, 2017).

Dentre as desvantagens de produtos engenheirados, é visto que os custos para a produção de lajes em concreto são mais baratos que as feitas em MLCC, porém, quando levados em conta as perdas de lucro devido ao maior tempo de execução, os gastos em logística, a economia nas fundações, o custo da mão de obra e dos materiais, os custos finais entre as diferentes lajes se tornam mais parecidos (Hassan; Öberg; Gezelius, 2019).

2.1.3 Madeiras de florestas plantadas

O aquecimento global está levando a pressões e políticas públicas para aumentar a biodiversidade e focar no manejo seminatural de florestas plantadas (Ehrhart; Brandner, 2018). Isso acontece graças ao seu apelo sustentável, pois, florestas plantadas, de rápido crescimento e florestas bem manejadas, capturam mais CO₂ da atmosfera que elas emitem e podem acumular grandes estoques de carbono na vegetação e no solo (Russell et al., 2010).

A madeira de florestas plantadas é o recurso do futuro para as construções em madeira (Cherry et al., 2019). Para a produção de peças coladas, a utilização de madeira de florestas plantadas com ciclos curtos é vantajosa, devido à sua menor densidade. A baixa densidade da madeira é mais adequada ao processo de colagem, pois a presença de poros mais abertos permite adequada penetração do adesivo, observa-se que em madeiras de maior densidade tendem a apresentar degradação das linhas de cola mais rapidamente quando comparadas as peças coladas que utilizam madeiras de menor densidade (Leite; Sánchez; Blumenschein, 2018; Santiago et al., 2018).

Apesar de parecer que a retirada de madeira para utilização no setor construtivo seria um caminho para diminuir áreas de floresta, se forem utilizadas práticas sustentáveis de manejo, grandes quantidades de madeira podem ser retiradas sem degradar os recursos florestais (De Vecchi; Magalhães Júnior, 2018; Germano Vasques et al., 2007; Ramage et al., 2017). Em complemento, o aumento na demanda por produtos engenheirados de madeira incentiva investimento na silvicultura e manejo florestal, expandindo as reservas de carbono por encorajar o reflorestamento, crescimento e regeneração florestal (Germano Vasques et al., 2007;

Pasternack et al., 2022).

A madeira proveniente de florestas plantadas geralmente é de menores dimensões, por isso, as toras de menor diâmetro possuem maior dificuldade de serem aproveitadas pela indústria. Os produtos de madeira engenheirada permitem que esse material de menor qualidade seja convertido em produtos versáteis como compensados, MLCC ou MLC (Vella; Heitzmann; Redman, 2019).

O grande volume de recursos locais oferece uma boa oportunidade para se estabelecer manufaturas locais de produtos de madeira, incluindo-os no leque de produtos disponíveis para a construção civil (Gutierrez et al., 2023). A inclusão da MLCC em mercados emergentes requer o uso de novas normas e incentivos econômicos para impulsionar o setor da silvicultura e os setores que utilizam a madeira. Alguns países possuem normas recentes para a regulação da construção baseada em MLCC, entre eles encontra-se o Brasil (De Araujo; Christoforo, 2023). O principal foco deve ser priorizar as pesquisas científicas para identificar as espécies da silvicultura que mais se adequam a produção de produtos engenheirados para cada território, e, estudar as espécies nativas que sejam mais promissoras na produção de MLCC (De Araujo; Christoforo, 2023).

2.1.3.1 *Produção de madeira do gênero Pinus no Brasil*

No Brasil, a introdução das espécies de *Pinus spp* aconteceu na década de 60 para plantios comerciais, a difusão e aceitação vieram através do estabelecimento de programas de reflorestamento com as espécies de *Pinus Taeda* e *Pinus Elliottii*, como o Incentivo Florestal, que era um programa de concessão de recursos para áreas de menor potencial produtivo determinadas como “Distritos Florestais” (Germano Vasques et al., 2007).

Depois disso, as espécies foram e continuam sendo utilizadas na silvicultura das regiões sul e sudeste do país (Mustefaga et al., 2019). A Figura 2.2-A) demonstra a espécie de *Pinus Elliottii* enquanto a Figura 2.2-B) mostra um *Pinus Taeda*.

Figura 2.2: Exemplos da espécie *Pinus*: A) *Pinus Elliottii*; B) *Pinus Taeda*.



Fonte: A) Estabrooks, (2020); B) Kelly, (2020).

Dentre as mais variadas espécies de árvores o *Pinus* é a escolha para considerável porção da indústria de árvores plantadas mundialmente, isso se dá pelo rápido e homogêneo crescimento das florestas plantadas da espécie (Loiola et al., 2019).

No Brasil, o gênero *Pinus* cobre cerca de 1,9 milhões de hectares de área plantada, sendo aproximadamente 90% nos estados do Sul. A produtividade das espécies foi estimada em 30,8 m³/ha/ano, com idade média de 14,7 anos, destacando o seu uso para produção de bens industriais (IBÁ, 2024).

As subclasses do gênero *Pinus* compartilham algumas características físicas como: baixa densidade, anéis de crescimento bem definidos, com potencial energético e suscetível a influência da umidade, necessitando de tratamentos preservativos quando utilizados *in natura*. A espécie é muito utilizada na fabricação de peças serradas, aglomerados, celulose e papel (Valeri; César De Paula, 2009).

A madeira de *Pinus Taeda*, quando comparada a espécie de *Pinus Elliotti*, apresenta menor massa específica, portanto, apresenta melhor permeabilidade, o que possibilita um melhor ancoramento mecânico e posterior adesão das juntas coladas, quando empregadas em elementos engenheirados (Melo Júnior; Bolgenhagen; Sellin,

2021).

A espécie de *Pinus Taeda* é originária do sul dos Estados Unidos, onde podem desenvolver até 45 metros de altura com diâmetro de 1,30 metros. Para esta espécie, o alburno tem tom amarelado claro, com cerne de coloração marrom avermelhada. O cerne se forma em árvores com cerca de 20 anos de idade (Klock, 2000). De mesmo modo, o *Pinus Elliotti* também é originário do Sul dos Estados Unidos, conhecido como *Yellow Slash Pine*, devido à coloração amarelada do seu alburno (USDA, 2004).

A base florestal de madeira plantada com o gênero *Pinus* atraiu investimentos e novas tecnologias como grandes fábricas de chapas reconstituídas, de movelaria e componentes de madeira para os estados do sul. Nota-se a grande importância do setor de reflorestamento e especialmente do gênero *Pinus* para a economia nacional (Germano Vasques et al., 2007). Atualmente, o papel estratégico da silvicultura na economia do país é ratificado por sua representatividade de 0,9% do Produto Interno Bruto (PIB) total, o que confere ao segmento a 5ª posição no ranking de participação industrial do PIB nacional. Dentro dessa sólida cadeia bioeconômica, o gênero *Pinus* consolida-se como um dos principais pilares florestais, respondendo por exatamente 19% da área total de florestas cultivadas no território brasileiro, sendo aproximadamente, 90% dessa área localizada na região sul. (IBÁ, 2024).

O estado do Paraná apresenta posição de destaque na produção de *Pinus*, de acordo com o Estudo Setorial APRE (2024), em 2023 o estado possuía aproximadamente 710,8 mil hectares de plantios de *Pinus*, correspondentes a cerca de 61% da área total de florestas plantadas para fins comerciais no território paranaense. No mesmo ano, a produção estadual de madeira chegou a 50,49% do volume produzido nacionalmente. Em relação à produtividade florestal, as empresas associadas à APRE registraram, em 2023, incremento médio anual de $31,75 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$ para **Pinus**, indicador que expressa o crescimento volumétrico médio anual dos plantios por unidade de área. Esses dados evidenciam a importância do Paraná no abastecimento nacional de madeira de *Pinus* e fornecem subsídios para compreender a dimensão territorial, a contribuição produtiva e o desempenho da silvicultura dessa espécie no estado (APRE, 2024).

2.1.3.2 Produção de madeira do gênero *Eucalyptus*

O gênero *Eucalyptus* é membro da família *Myrtaceae*, e existem mais de 700 espécies de *Eucalyptus*, sendo a maior parte originária do continente Australiano, com uma pequena quantidade encontrada nas ilhas de Papua, Indonésia e nas Filipinas. As espécies de *Eucalyptus* são umas das plantações mais comuns do mundo, possuindo mais de 19 milhões de hectares destinado à sua cultura (Yang et al., 2017).

O gênero *Eucalyptus*, foi introduzido no Brasil no final do século XIX, e o seu cultivo tinha como principal finalidade ornamentação, portanto, não havia interesse comercial. A sua inserção e plantio ocorreu em propriedades rurais para ocupar espaços na propriedade cuja terra era de pouca fertilidade, pedregosa ou com declives acentuados. Foi visto que o gênero crescia de forma rápida e homogênea, gerando uma grande massa de madeira, por isso, a espécie começou a ser plantada com o manejo adequado e produzida para uso comercial (De Vechi; Magalhães Júnior, 2018).

No Brasil, o gênero *Eucalyptus* ocupa cerca de 7,8 milhões de hectares de área plantada, sendo a maior parte concentrada nos estados de Minas Gerais e Mato Grosso do Sul, seguido pelos estados do Sul e Sudeste. A produtividade das espécies foi estimada em 33,7 m³/ha/ano, com idade média de 7,2 anos, destacando o seu uso para o desenvolvimento de fibras têxteis, produtos de madeira e aplicação em papel (IBÁ, 2024).

No estado do Paraná, a área cultivada com eucalipto no estado passou de 224.089 hectares em 2014 para 438.721,37 hectares em 2023, representando aproximadamente 38% da área total de florestas plantadas no território paranaense. Em relação à produção, o volume de madeira em tora de eucalipto atingiu 13,18 milhões de m³ em 2023. Quanto à produtividade florestal, as empresas associadas à APRE apresentaram, em 2023, incremento médio anual de 39,12 m³·ha⁻¹·ano⁻¹ para o gênero, valor ligeiramente superior à média nacional. Destaca-se, ainda, a concentração dos plantios no polo florestal de Telêmaco Borba, que reúne aproximadamente 153,3 mil hectares de eucalipto, correspondentes a cerca de 35% da área estadual cultivada com esse gênero. Esses indicadores evidenciam a relevância econômica e produtiva do eucalipto no contexto da silvicultura paranaense, bem como sua importância para o fornecimento de matéria-prima aos diferentes segmentos da indústria florestal (APRE, 2024).

São muitos os benefícios e aspectos negativos da produção comercial do gênero *Eucalyptus* no Brasil, dentre os aspectos positivos destacam-se: evita a exploração de florestas nativas; geração de renda e emprego em diversos segmentos da indústria; boa aplicação como cercas em propriedades rurais; produção de desinfetantes naturais, resinas epóxi e corretivo para solo. O gênero *Eucalyptus* é exógeno, portanto, a sua relação com o ecossistema é ocasionalmente maléfica, dentre os pontos negativos da sua produção, destacam-se: o Eucalipto se sobressai em relação as plantas nativas, não havendo predadores e competidores naturais que o atrapalhe; suas folhas contêm óleos essenciais que contaminam as águas e alteram a vida aquática; devido ao seu acelerado crescimento, acontece o ressecamento do solo (De Vecchi; Magalhães Júnior, 2018).

Por ser uma espécie de plantação com rápido crescimento, o eucalipto tornou-se uma das principais matérias primas para painéis de fibra de média densidade, painéis para móveis articulados e para produção de celulose. Entretanto, o gênero possui propriedades mecânicas altas e ciclos de cultivo curtos, o que é um potencial alternativa para utilização como produto estrutural (Gui et al., 2020).

Incorporar a madeira de *Eucalyptus* na produção de MLCC oferece a possibilidade de converter um insumo em um produto de alto valor agregado com propriedades estruturais úteis e confiáveis (Ettelaei et al., 2022).

Uma das principais dificuldades para a comercialização de folhosas, como o *Eucalyptus*, em forma de produtos engenheirados é a falta de pesquisa sobre a sua utilização, resultados de testes, normas e códigos de referência que especifiquem o uso de madeiras duras. Todas as principais normas foram desenvolvidas para madeiras moles, as quais possuem grandes diferenças características e de desempenho quando comparadas as madeiras duras (Gutierrez et al., 2023).

A maior parte dos dados de referência foram obtidos de testes em madeiras de coníferas e, por consequência, os adesivos e as normativas padrão são focadas e designadas para as coníferas (Ammann et al., 2016). Existem duas principais normas estrangeiras para a produção de MLCC, a norma europeia EN 16351 e a norma norte americana ANSI/APA PRG-320, e nenhuma destas normas contemplam o uso de folhosas na produção de MLCC (Gutierrez et al., 2023), portanto, destaca-se a importância da pesquisa sobre o uso de folhosas na produção de produtos engenheirados.

2.1.4 Produtos de madeira engenheirada para construção civil

A tendência da construção civil tem sido construir edificações mais ambientalmente amigáveis mantendo o seu desempenho estrutural (Ren et al., 2023), e, uma das formas de alcançar esse objetivo é o uso de produtos engenheirados de madeira na construção civil. Produtos engenheirados de madeira ou EWP's (*Engineered Wood Products*), são materiais tecnológicos, compostos por tábuas, flocos, fibras ou partículas de madeira, que passam por processos industriais de fragmentação e recombinação, visando alcançar produtos de melhor desempenho estrutural (Palma; Ballarin, 2011).

A técnica de MLC (Madeira Lamelada Colada) produz elementos de função estrutural a partir da colagem de lamelas de madeira dispostas paralelamente sob pressão elevada. Essa metodologia permite a fabricação de componentes de grandes dimensões, que apresentam desempenho mecânico superior ao de tábuas de madeira maciça (Carrasco; Bremer; Mantilla, 2020). A Figura 2.3 demonstra um exemplo de uma peça de MLC.

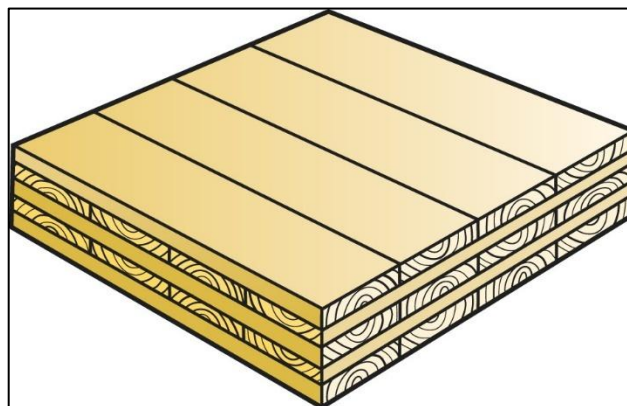
Figura 2.3: Exemplo de uma peça de MLC produzida com madeira de *Albizia Procera*



Fonte: Das et al., 2023.

Produzido de forma muito similar ao MLC, a Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC) ou *Cross Laminated Timber* (CLT), apresentada na Figura 2.4, foi desenvolvida como resultado de pesquisas Europeias sobre como usar retalhos de madeira, deixados após a eliminação de defeitos (Wieruszewski; Mazela, 2017).

Figura 2.4: Esquemática ilustrativa de um painel MLCC



Fonte: Jonasson; Persson; Danielsson, 2024.

O MLCC é um produto engenheirado de madeira resultado da colagem de lamelas de madeira de forma ortogonal umas às outras (Hassan; Öberg; Gezelius, 2019; Karacabeyli; Gagnon, 2019; Passareli, 2013; Sandoli; Calderoni, 2020), essa configuração permite que os painéis trabalhem como uma membrana ou placa, podendo ser usados como elementos de parede ou piso (Sandoli; Calderoni, 2020), sua composição laminar permite que o MLCC suporte carregamentos dentro e fora de seu plano (Ehrhart et al., 2015). A disposição ortogonal entre camadas confere ao material engenheirado excelentes capacidades mecânicas e boa estabilidade dimensional, permitindo a utilização de grandes vãos e a construção de edificações de grandes alturas (Brandner et al., 2016; Akter; Binder; Bader, 2023). O MLCC pode ser produzido nas mais diversas dimensões e configurações, sendo usual o uso de um número ímpar de lamelas variando entre 3, 5 ou 7 (Cherry et al., 2019; Jeleč; Varevac; Rajčić, 2018; Wieruszewski; Mazela, 2017), os painéis podem ter até 3,5 metros de largura, 16 metros de comprimento e entre 60 e 500 mm de espessura (Cherry et al., 2019).

Investimentos na indústria da construção civil são arriscados, novos produtos engenheirados, materiais ou tecnologias disruptivas requerem pesquisas em nível significativo, para demonstrar que os requerimentos de durabilidade e resistência são atendidos (Abed et al., 2022). Dentre os produtos engenheirados, a MLCC destaca-se como um produto engenheirado inovador, devido à sua versatilidade, viabilidade econômica e crescente relevância no cenário de construção sustentável, o que impulsionou o desenvolvimento do seu mercado (Ehrhart et al., 2015).

A MLCC caracteriza-se pelas suas numerosas vantagens, dentre as mais importantes, destacam-se: consumo sustentável de materiais; processo de produção energeticamente eficiente; bom desempenho estático, mecânico e de isolamento; baixo peso; potencial de pré-fabricação; redução do tempo de construção; possibilidade de combinação com demais materiais de construção, dando liberdade criativa ao projeto arquitetônico (Wieruszewski; Mazela, 2017). As múltiplas vantagens e aplicações de produtos MLCC, reforçam a motivação global da utilização de soluções mais racionais e sustentáveis fortemente baseadas em produtos engenheirados mais ambientalmente adequados (De Araujo; Christoforo, 2023).

De acordo com Ehrhart e Brandner (2018), o conhecimento aprofundado sobre as propriedades mecânicas da madeira de espécies disponíveis localmente é de suma importância para avaliar o seu possível uso como material base em produtos engenheirados de madeira com função estrutural, como a MLCC. As madeiras de coníferas são comumente utilizadas na fabricação de produtos engenheirados de madeira graças à sua estrutura celular mais homogênea e crescimento mais rápido que as madeiras de folhosas (Shirmohammadli et al., 2023). Folhosas são menos utilizadas na fabricação de *Engineered Wood Products* (EWP's) devido à sua alta densidade e baixa penetração de adesivo, dificultando uma ligação efetiva entre lamelas e resultando em menores resistências ao cisalhamento e a delaminação (Cristina et al., 2010; Luedtke et al., 2015).

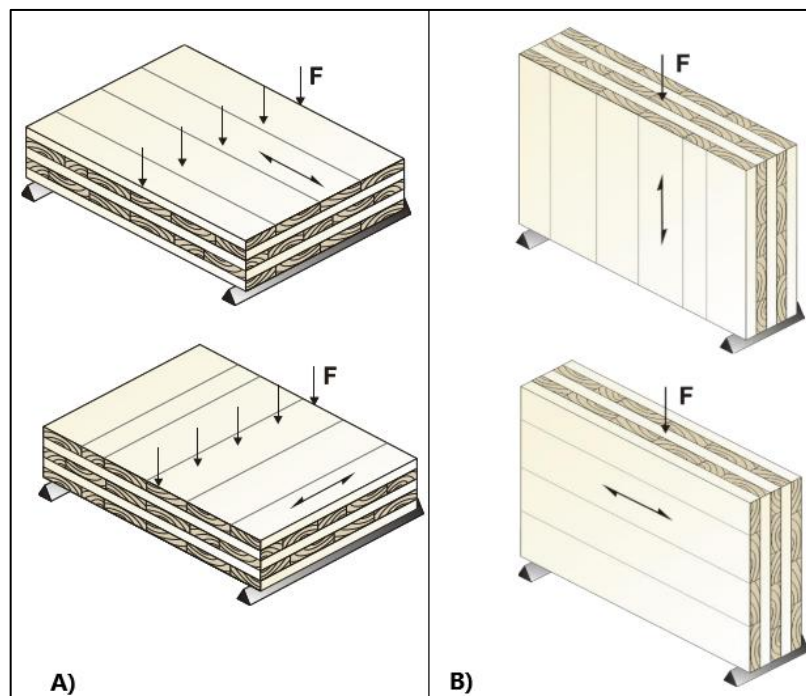
2.1.5 Propriedades mecânicas dos painéis de MLCC

As razões principais da madeira laminada colada cruzada ter ganho tanto enfoque nos últimos anos são graças às suas propriedades mecânicas e apelo ambiental, que permitem a utilização do material em uma ampla faixa de aplicações (Abed et al., 2022). O aumento na popularidade aconteceu especialmente em edificações de médio e grande porte, devido às suas habilidades de suportar esforços dentro e fora de seu plano longitudinal (Li et al., 2021). Por isso, há uma grande oportunidade de mercado para a produção de MLCC em escala global, especialmente pelo atendimento de demandas distintas como elementos modulares e pré-fabricados (De Araujo; Christoforo, 2023).

Usualmente, as lamelas externas são alinhadas à direção dos vãos primários para lajes e paredes, essa configuração proporciona melhores propriedades de flexão, cisalhamento, rigidez axial e resistência na direção principal. As lamelas internas, estão tipicamente orientadas ortogonalmente, com a direção das suas fibras perpendiculares ao vão primário, essa configuração expõe as fraquezas da madeira nas direções radial e tangencial para as tensões de cisalhamento (Nero; Christopher; Ngo, 2022). Cada lamela de painéis MLCC é exposta a diferentes tipos de carregamentos, dependendo da aplicação do painel, e por isso, madeiras de menor qualidade geralmente são utilizadas nas lamelas internas, que são menos sujeitas a esforços (Cherry et al., 2019).

Em relação às funções estruturais, painéis MLCC podem ser divididos nas seguintes categorias: Painéis de teto, piso e telhado, dimensionados para resistir carregamentos fora do plano dos painéis; Painéis de paredes, que são dimensionados para suportar carregamentos paralelos ao seu plano; Estruturas combinadas, que devem suportar cargas de diferentes direções (Wieruszewski; Mazela, 2017). A Figura 2.5 apresenta alguns dos modos de carregamento em painéis MLCC.

Figura 2.5: Painéis de MLCC A) carregamento perpendicular ao plano do painel; B) Carregamento paralelo ao plano do painel.



Fonte: Adaptado de Popoviski et al., 2019.

A configuração em múltiplas lamelas proporciona capacidades resistivas tanto para cargas atuantes dentro e fora do plano dos painéis, o que possibilita a construção de elementos de placas, como pisos e paredes (Brandner et al., 2016; Jeleč; Varevac; Rajčić, 2018; Li et al., 2021). A disposição ortogonal das lamelas possibilita melhor aproveitamento das resistências à tração e à compressão da madeira na direção da fibra (Li et al., 2019), e mitiga o impacto de defeitos redutores de resistência e fornece propriedades físicas e mecânicas mais uniformes (Ettelaei et al., 2022).

Devido à orientação ortogonal das lamelas, e à intrínseca anisotropia da madeira, o comportamento mecânico de elementos MLCC é complexo, havendo por parte dos pesquisadores, projetistas e fabricantes algumas incertezas sobre o dimensionamento de peças de MLCC. Devido a isso, diversas teorias e métodos de cálculo foram desenvolvidos para o dimensionamento de painéis MLCC baseados na determinação da rigidez à flexão e na resistência ao cisalhamento do painel (Amorim; Mantilla; Carrasco, 2017).

O comportamento de um painel MLCC depende da direção de aplicação do carregamento, podendo ser paralelo ou perpendicular ao plano do painel, com capacidades resistivas muito diferentes (Nero; Christopher; Ngo, 2022). Os esforços com direção perpendicular ao plano do painel são comuns em construções o MLCC como lajes, causando esforços de flexão nas lamelas longitudinais e esforços de cisalhamento rolante nas lâminas transversais (Li et al., 2021)

O dimensionamento de lajes em MLCC é limitado pela capacidade de flexão e dos estados limites de flecha, que são propriedades fortemente governadas pela resistência de cisalhamento rolante das lamelas ortogonais de madeira, visto que tanto como a resistência quanto o módulo de cisalhamento rolante são bem menores que as propriedades na direção longitudinal (Akter; Binder; Bader, 2023).

Dentre os limitantes no dimensionamento de elementos MLCC, o efeito do cisalhamento rolante destaca-se na resistência de peças coladas sujeitas a carregamentos normais ao plano. A deformação por cisalhamento rolante consiste na tendência da rolagem das fibras da madeira umas sobre as outras quando há tensões tangenciais ao seu redor (Ehrhart; Brandner, 2018; Vilela; Tadeu Mascia, 2020). Em muitos casos a resistência ao cisalhamento rolante pode ser o elo mais fraco do dimensionamento de estruturas MLCC e pode desencadear falhas frágeis (Li et al., 2021).

O desempenho geral ao cisalhamento e a deformação global do painel, depende nas propriedades de cisalhamento rolante das lamelas cruzadas, principalmente quando o elemento MLCC está sujeito a flexão induzida por carregamentos perpendiculares ao plano do painel (Ettelaei et al., 2022). A Figura 2.6 mostra a ruptura devido ao cisalhamento rolante em painéis de MLCC.

Figura 2.6: Deformação causada pelo *cisalhamento rolante*



Fonte: Adaptado de Li et al., 2021.

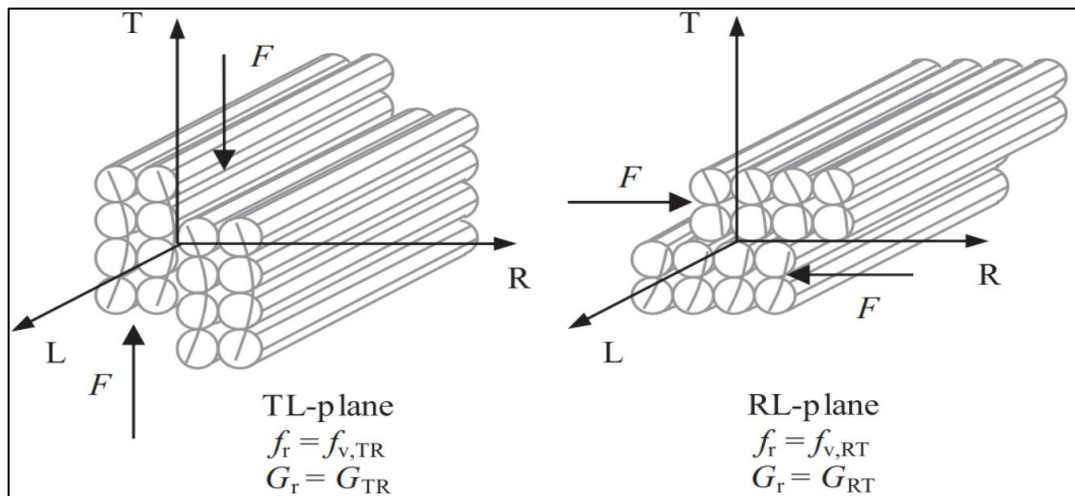
As propriedades dos materiais são um dos fatores mais críticos que afetam o desempenho estrutural de um elemento MLCC. A madeira é o ingrediente principal e essencial para a produção de peças coladas, e o comportamento mecânico de peças MLCC feitas de diferentes espécies de madeira é significativamente diferente (Ren et al., 2023).

2.2 CISALHAMENTO ROLANTE (*ROLLING SHEAR*) EM PAINÉIS DE MLCC

Dentre as propriedades mecânicas de maior influência e interesse para o dimensionamento de peças MLCC tem-se o cisalhamento rolante, que afeta as lâminas cruzadas e ocorre principalmente em situações em que a peça está sendo flexionada (Vilela, 2020).

O cisalhamento rolante é derivado de tensões de cisalhamento perpendiculares nas camadas cruzadas, o que acarreta o “deslizamento” das fibras da madeira fazendo com que as fibras “rolem” uma sobre as outras (Ehrhart; Brandner, 2018), como demonstrado na Figura 2.7.

Figura 2.7: Demonstração dos esforços causadores do efeito cisalhamento rolante



Fonte: Ehrhart, Brandner, 2018.

A configuração morfológica dos painéis resulta em um comportamento de cisalhamento particular quando sujeito a carregamentos fora do plano. O baixo módulo de cisalhamento na direção ortogonal à fibra causa deformações significativas de cisalhamento nas camadas transversais das lamelas, cuja direção das fibras é perpendicular à direção das tensões tangenciais. (Pradhan et al., 2024; Sandoli; Calderoni, 2020). As lamelas longitudinais superiores e inferiores são flexionadas devido aos momentos gerados pelos carregamentos, que estão sujeitas a esforços de compressão e tração, respectivamente. As diferentes deformações causam tensões de cisalhamento nas lamelas transversais (Ren et al., 2024).

Cisalhamento rolante é uma propriedade inerente ao MLCC, devido à baixa resistência ao cisalhamento das lamelas transversais, torna-se o fator determinante da resistência de peças de pequeno vão sujeitas a flexão (Huang et al., 2023; Nero; Christopher; Ngo, 2022). A incidência deste efeito é maior em elementos de placas como paredes e lajes, onde há carregamentos perpendiculares ao plano do painel (Popoviski et al., 2019; Vilela, 2020).

Esse tipo de ruptura é comumente associado à reduzida resistência e rigidez da madeira no plano radial-tangencial (direção perpendicular às fibras). O fenômeno ocorre porque as fibras da madeira, orientadas em camadas cruzadas, tem tendência a se separar sob tensão, observa-se essa fragilidade quando as camadas não conseguem resistir ao deslizamento interno, resultando em fissuras ou deformações (Nero; Christopher; Ngo, 2022).

A resistência ao cisalhamento rolante é dependente de diversos fatores, como: a espessura das lamelas, a densidade e espécie da madeira, o grau de umidade, a geometria dos anéis de madeira, da geometria das lamelas e da seção transversal da peça (Barros; Mascia; Vilela, 2022; Ehrhart; Brandner, 2018; Karacabeyli; Gagnon, 2019; Li et al., 2021)

A resistência ao cisalhamento rolante é avaliada pelo módulo de cisalhamento perpendicular (G_{vt}), que é considerado como sendo 1/10 do módulo de cisalhamento paralelo às fibras (Karacabeyli; Gagnon, 2019). O conhecimento adequado sobre o módulo de cisalhamento rolante (G_{vt}) e da resistência ao cisalhamento rolante (f_{vt}) é de suma importância para o dimensionamento correto de estruturas em MLCC (Ehrhart et al., 2015).

A geometria de uma lamela mostra ter forte influência tanto na resistência como no módulo de cisalhamento rolante, isso se deve pela distribuição não homogênea de tensões na seção de um elemento, esforços perpendiculares às fibras tendem a se concentrar em áreas próximas das bordas e no centro (Ehrhart et al., 2015).

Dentre as variáveis geométricas de grande influência, destaca-se a razão de aspecto (*aspect ratio*), definida como a relação entre a largura e a espessura da lamela. Quanto maior a razão de aspecto (>6) maior a probabilidade dos painéis falharem por não atenderem aos limites de deformação, portanto, as deformações por flexão se tornam o fator limitante. Quanto menor a razão de aspecto (≤ 6), menor será o vão utilizável e se aumenta a importância da rigidez de cisalhamento rolante, (Cherry et al., 2019). Para menores valores de razões de aspecto também serão maiores são os picos de tensão e maiores são as diferenças entre os valores reais e os valores calculados dos esforços (Ehrhart et al., 2015).

Diversos autores como Aicher; Dill-Langer (2000), Kumar et al. (2023), e Ehrhart; Brandner (2018), investigaram a influência da relação de aspecto das lamelas transversais nas propriedades de cisalhamento rolante, relatando que as resistências ao cisalhamento rolante tendem a aumentar conforme a razão de aspecto se eleva, sendo recomendado que esta relação não seja inferior a 4.

Kumar et al. (2023) avaliou o efeito da relação de aspecto nas propriedades de cisalhamento rolante de painéis de MLCC produzidos com madeira de *Southern Pine*, *Radiata Pine* e *Hoop Pine*, com densidades respectivas de 456, 537 e 491 kg/m³, e utilizando ensaios de cisalhamento por compressão modificado. Foram avaliados

relações de aspecto de 3, 4,5 e 6,75, e encontrou-se que a resistência ao cisalhamento por rolagem aumentou com o aumento da relação de aspecto, porém, para a rigidez ao cisalhamento não foi encontrada essa relação.

A determinação das propriedades de cisalhamento rolante se torna ainda mais complexa devido ao formato cilíndrico dos anéis de crescimento e da sensibilidade a esforços normais adicionais no plano perpendicular as fibras, como consequência, a resistência e módulo de cisalhamento rolante são comumente considerados na literatura como resultados aparentes ou propriedades do sistema ao invés de propriedades materiais (Akter; Binder; Bader, 2023).

A resistência ao cisalhamento rolante é uma propriedade do sistema MLCC, isso se deve aos complicados mecanismos de falha (Nero; Christopher; Ngo, 2022) e a anisotropia cilíndrica da madeira. Os valores de Cisalhamento rolante determinados por ensaios são mais próximos a valores aparentes do que propriedades materiais reais, isso acontece, pois, as tensões de cisalhamento rolante são acompanhadas por tensões adicionais como esforços perpendiculares as fibras e de cisalhamento (Ehrhart; Brandner, 2018). Devido aos complexos mecanismos de falha, no design de estruturas de madeira, o cisalhamento rolante deve ser considerado no estado limite último como um potencial mecanismo de falha e no estado limite de serviço, pois as deformações das lamelas transversais contribuem significativamente para as deformações globais do elemento (Ehrhart; Brandner, 2018).

Entretanto, ainda restam dúvidas em relação a influência das propriedades de cisalhamento rolante em diversas espécies de madeira, como também, da conformidade entre valores de norma e dados experimentais, mesmo existindo diversos estudos acerca do efeito (Barros; Mascia; Vilela, 2022).

2.2.1.1 Ensaios para determinação da resistência ao cisalhamento rolante

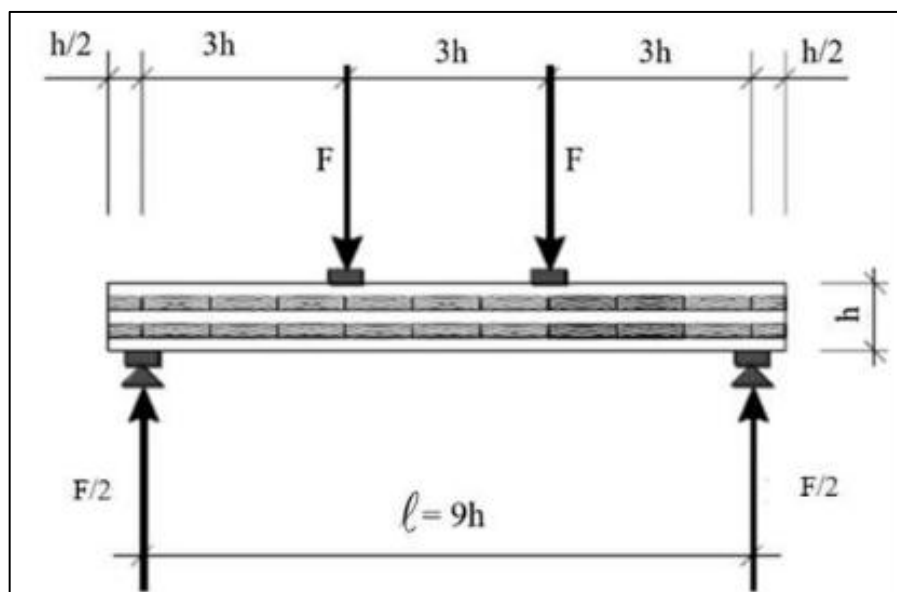
Configurações de teste robustas e replicáveis constituem premissas fundamentais para uma avaliação fidedigna do desempenho mecânico de componentes estruturais de madeira (Ehrhart et al., 2015). Essa diretriz assume caráter ainda mais crítico na caracterização do cisalhamento rolante; para extrair valores realistas desse fenômeno, o arranjo laboratorial deve ser capaz de reproduzir fielmente as situações comuns de tensões que solicitam o material em suas

aplicações práticas de projeto (Ehrhart; Brandner, 2018).

Há uma grande variedade de metodologias propostas em normas, podendo ser divididas em duas principais categorias: testes de flexão com carregamento fora do plano, e os ensaios de cisalhamento por compressão, também denominados de ensaios de cisalhamento por compressão inclinados ou testes de cisalhamento planar de duas placas (Baek; Song; Hong, 2024).

Os métodos mais convencionais de teste para o cisalhamento rolante são baseados em ensaios de flexão, essa metodologia consiste na aplicação de uma carga concentrada no meio do vão ou nos terços do vão, em espécimes de tamanho estrutural (Pangh et al., 2019). Tais testes requerem prensas e demais aparelhos de ensaio de alta capacidade de carga, tornando a caracterização mecânica dessas propriedades um processo oneroso (Silva et al., 2023). Os ensaios de flexão são apresentados em diversas normas, com as principais diferenças limitadas às razões de vão/espessura e o número de pontos de aplicação de força no sistema. De acordo com Nero, Christopher e Ngo (2022), os testes de flexão de 4 pontos são mais adequados ao estudo das propriedades de cisalhamento rolante em comparação aos de 3 pontos, pois permitem aplicar esforços de cisalhamento sem que ocorra um grande momento fletor, o que implica menor possibilidade de falha por flexão. A Figura 2.8 representa o teste de flexão de 4 pontos, apresentado na norma brasileira NBR 7190 (ABNT, 2022).

Figura 2.8: Ensaio de flexão a 4 pontos.

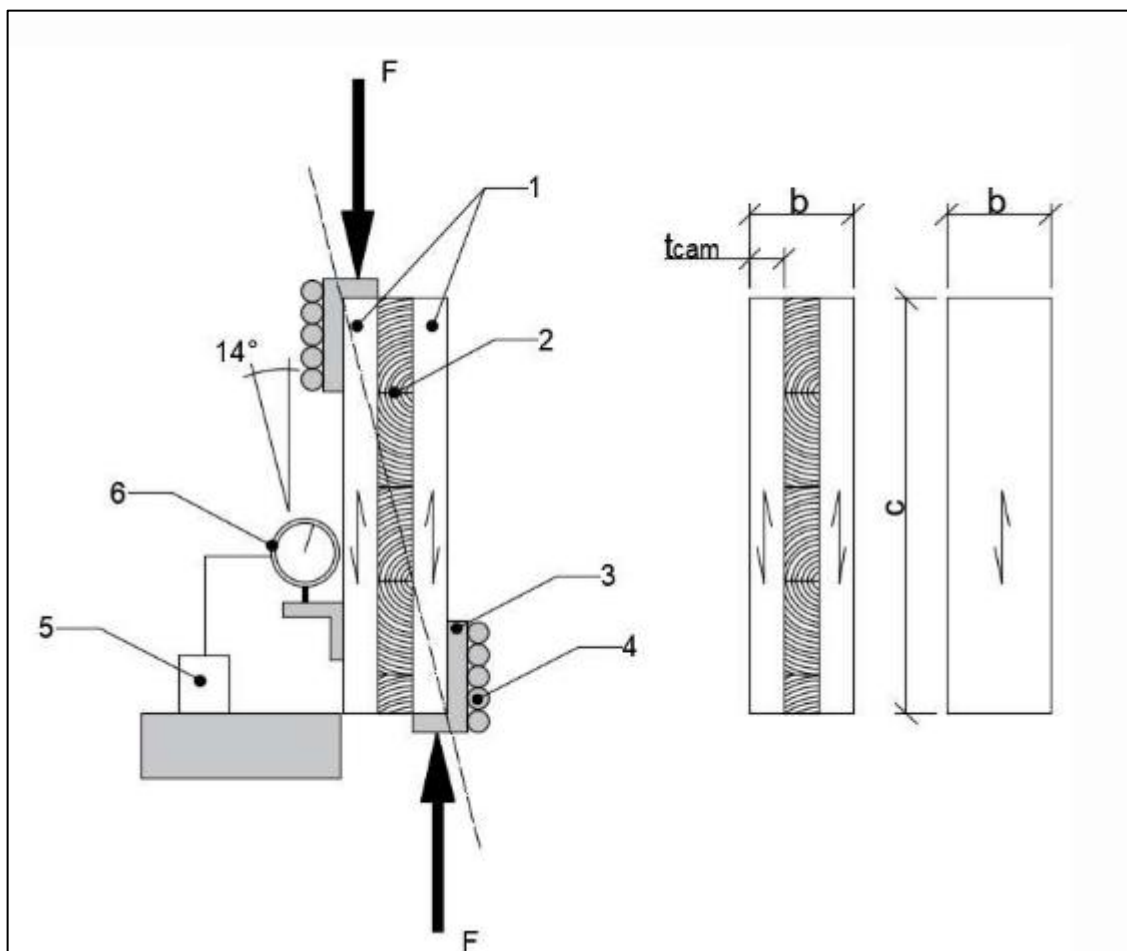


Fonte: ABNT, 2022.

De acordo com a norma americana ASTM D198-15 (ASTM, 2015), no ensaio de flexão, grandes esforços de cisalhamento são aplicados nos corpos de prova, que possuem uma relação de comprimento/espessura de baixo valor, resultando em uma falha por cisalhamento rolante nas lamelas da direção transversal.

Na metodologia de ensaio de cisalhamento por compressão, um corpo de prova de pequenas dimensões é fabricado e submetido ao esforço de cisalhamento por meio de compressão, através de uma força aplicada no topo e na base do corpo de prova (ABNT, 2022a), como apresentado na Figura 2.9. Segundo Huang et al. (2023), como não é aplicada pressão perpendicular à lamela transversal, esse tipo de ensaio pode estar mais próximo da resistência real (do material) de cisalhamento rolante.

Figura 2.9: Ensaio de cisalhamento por compressão normativo



Fonte: ABNT, 2022.

A NBR 7190 (ABNT, 2022) recomenda que a velocidade de carregamento seja ajustada para que o corpo de prova falhe na faixa de 300 s (± 120 s). Recomenda-se também que sejam ensaiados no mínimo 20 corpos de prova de cada modelo de painel. Deve-se utilizar medidores mecânicos de deformação ou extensômetros instalados diretamente no corpo de prova para a determinação do módulo de cisalhamento na direção transversal (G_{vt}). O medidor de deslocamento deverá ser instalado na porção medial/inferior das lamelas superiores, assim como indicado pelo item de número 6, da Figura 2.9.

2.2.1.2 Modelos analíticos para determinação da resistência ao cisalhamento rolante

Diversos modelos analíticos foram desenvolvidos para calcular a resistência ao cisalhamento de elementos MLCC, isso se deve a dificuldade de modelar precisamente o complicado mecanismo de falha por cisalhamento (Huang et al., 2023).

Recentemente, três métodos analíticos se destacam por serem os mais comumente utilizados nas análises mecânicas e físicas de painéis MLCC, sendo eles: *Gamma Method* (Método Gamma) ou Teoria das Vigas Mecanicamente Unidas; *K-Method* ou Teoria do Compósito, e o *Shear Analogy* (Analogia de Cisalhamento) (Miotto, 2023).

a) Método Gamma

Esse método considera as camadas longitudinais como vigas e as camadas transversais como conexões continuamente distribuídas. Assume-se que o carregamento no painel é suportado apenas pelas lamelas longitudinais, enquanto a deformação de cisalhamento ocorre nas camadas transversais, as quais possuem rigidez ao cisalhamento igual ao módulo de cisalhamento rolante. A fim de considerar a contribuição da deformação de cisalhamento para a rigidez de flexão total (EI_{eff}), um fator Y_i , é introduzido para medir a eficiência das conexões entre as lamelas transversas (Huang et al., 2023). A relação entre a tensão de cisalhamento τ e a força de cisalhamento V é expressa pela Equação (1).

$$\tau = \left[\frac{(EQ) * V}{(EI_{eff}) * b} \right] \quad (1)$$

Em que:

τ é tensão de cisalhamento (MPa);

EQ é o momento estático de área (N*mm);

V é a força de cisalhamento (N);

EI_{eff} é a rigidez efetiva de flexão (N*mm²);

b é a largura da seção transversal (mm).

Onde a rigidez de flexão (EI_{eff}) pode ser calculada pela Equação (2).

$$(EI)_{eff} = \sum_{i=1}^n (E_i I_i + Y_i E_i A_i Z_i^2) \quad (2)$$

Em que:

E_i é o módulo de elasticidade para a i-ésima lamela na direção longitudinal da viga (N*mm²);

I_i é o momento de inércia da seção transversal para a i-ésima camada (mm⁴);

A_i é a área da seção transversal para a i-ésima lamela (mm²);

Z_i é o espaço entre o centroide da seção transversal da i-ésima camada e o eixo neutro global de flexão (mm);

Y_i é o fator de eficiência de conexão para a i-ésima camada; dado pela Equação (3).

$$(Y)_i = \left(1 + \frac{\pi^2 E_i b_i h_i}{L_{eff}^2 G_{rj} b_j / h_j} \right)^{-1} \quad (3)$$

Em que:

L_{eff} é o comprimento efetivo da viga, o qual iguala-se à distância entre dois momentos nulos (mm);

b_i e h_i são respectivamente a largura e espessura da i-ésima lamela longitudinal (mm);

G_{rj} é o módulo de cisalhamento rolante para a j-ésima lamela transversal que conecta a i-ésima camada longitudinal (N/mm²);

b_j e h_j são a largura e espessura da j -ésima lamela transversal (mm).

O momento efetivo de área (EQ) é calculado pela Equação (4) para painéis de 3 lamelas.

$$(EQ)_3 = \left(0,5y_1E_0bh(h+t) + \frac{1}{8}E_{90}bt^2 \right) \quad (4)$$

Em que:

E_0 e E_{90} são módulos de elasticidade paralelos e perpendiculares às fibras, respectivamente (MPa);

h e t são as espessuras das lamelas longitudinais e transversais (mm), respectivamente.

y_1 é o fator de eficiência de conexão da camada transversal (adimensional).

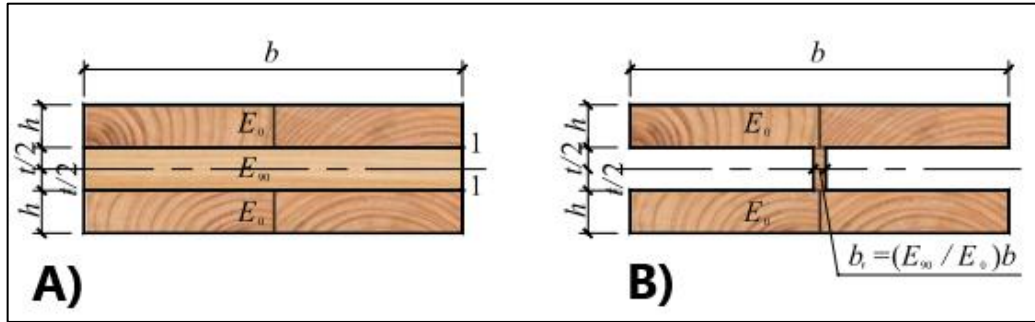
b) K-Method

Empregado na indústria de compensados, a Teoria Composta ou *K-Method* (Método K), considera que as camadas com orientação perpendicular à direção principal não possuem resistência significativa quando se quantifica as propriedades de flexão (Popoviski et al., 2019). De acordo com Popoviski et al., (2019) devido a isso, quando o *K-Method* é utilizado na análise de painéis MLCC o método deve ser modificado para se levar em conta a contribuição de resistência de todas as camadas e seguindo as seguintes premissas:

- Assume-se que a relação tensão-deformação apresenta comportamento linear e a hipótese de Bernoulli de seções transversais planas;
- O método de cálculo é baseado nas propriedades de rigidez e resistência de todas as lamelas como das lamelas sujeitos a esforços perpendiculares as fibras e as seções transversais sujeitas a esforços paralelos as fibras. No cálculo, considera-se a elasticidade das lamelas transversais como: $E_{90} = E_0/30$;
- Deformações de cisalhamento não devem ser levadas em consideração, portanto, o método deve ser utilizado preferencialmente para elevadas relações vão/altura (≥ 30);
- Fatores de composição são determinados para certas configurações de carregamento.

A largura equivalente tem como função o cálculo do momento de inércia equivalente, a Figura 2.10 demonstra a seção transversal real e a equivalente utilizadas no cálculo do momento de inércia equivalente (I_{eq}).

Figura 2.10: Seção transversal do painel de MLCC A) real, B) equivalente.



Fonte: Huang et al., 2023

Em seguida, calcula-se o momento de inércia da seção equivalente (I_{eq}), dado pela Equação (5);

$$I_{eq} = \sum_{i=1}^n (I_i + A_i z_i^2) \quad (5)$$

Onde:

I_{eq} representa o momento de inércia da seção equivalente (mm^4);

I_i representa o momento de inércia da i-ésima lamela (mm^4);

A_i é a seção transversal da i-ésima lamela (mm^2);

z_i representa a distância do centroide da lamela à linha neutra do corpo de prova da i-ésima lamela (mm);

Por conseguinte, calcula-se o momento estático de área (S), dado pela Equação (6);

$$(S_{1,3-lamelas}) = 0,5bh(t + h) \quad (6)$$

Em que:

$S_{1,3-lamelas}$ é o momento estático de área para um corpo de prova de 3 camadas (mm^3);

b é a largura do corpo de prova (mm);

h é a espessura da lamela longitudinal (mm);

t é a espessura da lamela transversal (mm);

Por fim, a tensão de cisalhamento rolante (τ) nas camadas transversais do corpo de prova, pode ser calculada pela Equação (7):

$$\tau = \left[\frac{VS}{(I_{eq}) * b} \right] \quad (7)$$

Em que:

τ é a tensão de cisalhamento rolante nas lamelas transversais (MPa);

V é a força cortante (N);

S é o momento estático de Área (mm³);

I_{eq} é o momento de inércia da seção equivalente (mm⁴);

b é a largura do corpo de prova (mm).

c) *Shear Analogy*

Considera-se esse método como o mais preciso para painéis MLCC, devido a esse não negligenciar os efeitos do cisalhamento em nenhuma das camadas (Miotto, 2023). Geralmente é utilizado um programa de análise de estruturas planas, que permite a utilização de diferentes módulos de elasticidade e cisalhamento de cada camada, para qualquer configuração de painel (número de camadas e razão de aspecto) (Popoviski et al., 2019).

Esse método assume que o painel é um sistema virtual composto por duas vigas virtuais, A e B. A viga A recebe a soma da rigidez e da flexão inerte das lamelas individuais ao longo de seu próprio eixo neutro, enquanto a viga B recebe as propriedades combinadas de rigidez a flexão de todas as lamelas e conexões ao longo do eixo neutro geral de flexão, assim como a soma da rigidez de cisalhamento de todas as camadas. As duas vigas são acopladas pela teia virtual que consiste em uma distribuição contínua de conexões com rigidez axial infinita, portanto, deve-se validar a deformação igual em qualquer posição ao longo da viga quando esse ponto é carregado transversalmente (Huang et al., 2023).

Para o método da analogia de cisalhamento, a resistência ao cisalhamento

rolante (τ) é calculada pela Equação (8).

$$\tau = \frac{V_B}{(EI)_B} \sum_{j=1}^n (E_j A_j Z_j) \quad (8)$$

Em que:

τ é a tensão de cisalhamento na interface entre a camada longitudinal e transversal (tensão de cisalhamento rolante) (MPa);

V_B é a força cortante suportada pela viga B (N);

$(EI)_B$ é a rigidez a flexão da viga B (N.mm²);

E_j representa o módulo de elasticidade paralelo às fibras da j-ésima lamela (MPa);

A_j representa a seção transversal da j-ésima lamela (mm²);

Z_j indica a distância entre o centro geométrico da j-ésima lamela e a linha neutra do painel (mm).

De acordo com as premissas citadas anteriormente, para o painel MLCC com camadas longitudinais com o módulo de elasticidade paralelo à direção das fibras E_i , largura b_i e espessura h_i , a rigidez à flexão das vigas A (EI_A) e B (EI_B) pode ser expressa pelas Equações 9 e 10, respectivamente:

$$(EI)_A = \sum_{i=1}^n \left(E_i b_i \frac{h_i^3}{12} \right) \quad (9)$$

Em que:

$(EI)_A$ representa a rigidez à flexão da viga A (N.mm²);

E_i é o módulo de elasticidade paralelo às fibras (MPa);

b_i e h_i são respectivamente, a largura e a altura/espessura da viga A (mm).

$$(EI)_B = \sum_{i=1}^n (E_i A_i Z_i^2) \quad (10)$$

Em que:

$(EI)_B$ representa a rigidez à flexão da viga B (N.mm²);

E_i é o módulo de elasticidade paralelo às fibras (MPa);
 A_i representa a seção transversal da viga B (mm²);
 Z_i é a distância entre o centro da i-ésima lamela com a linha neutra do painel (mm).

A força cortante máxima suportada pela viga B pode ser calculada pela Equação (11).

$$V_B = \frac{V}{\left[1 + \frac{EI_A}{EI_B}\right]} \quad (11)$$

Em que:

V é a força cortante de ruptura da viga real (N);

V_B representa a resistência ao cisalhamento da viga B (virtual) (N);

EI_A é a rigidez à flexão da viga A (virtual) (N.mm²);

EI_B é a rigidez à flexão da viga B (virtual) (N.mm²);

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção são apresentados os materiais utilizados, os procedimentos metodológicos para a caracterização da madeira, e os ensaios mecânicos e metodologias de cálculo para obtenção da resistência ao cisalhamento rolante em painéis MLCC.

A sessão de caracterização teve como finalidade determinar algumas das propriedades físicas e mecânicas da madeira das espécies empregadas, que pudessem influenciar a resistência ao cisalhamento rolante, e como meio de comparação de resultados experimentais e das metodologias no cálculo das resistências e rigidezes pelos métodos analíticos.

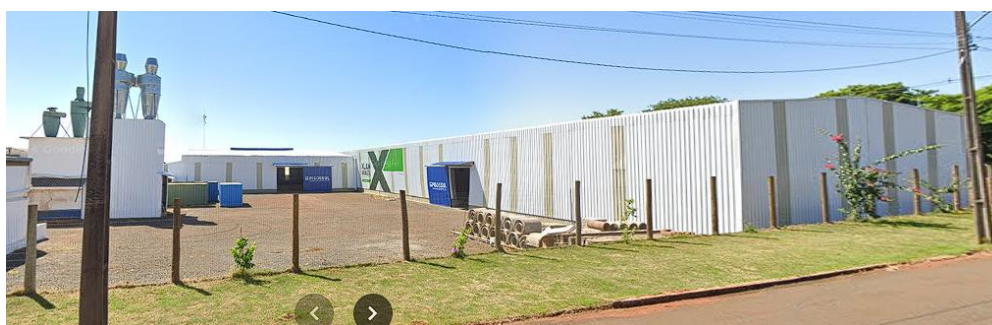
Para avaliação do desempenho ao cisalhamento rolante foram realizados ensaios de flexão de 3 pontos de vão curto, e testes de compressão por cisalhamento para o modelo experimental de painéis MLCC confeccionados de madeira de *Pinus spp* e *Eucalyptus spp*. Para os modelos teóricos de cálculo, foram utilizados o método *Gamma*, o *K-Method* e o *Shear Analogy*.

As etapas experimentais foram realizadas nos Laboratórios de Estruturas e Materiais de Construção Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), campus Toledo.

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Os painéis MLCC produzidos com *Pinus spp* e *Eucalyptus spp* (oriundas de plantios comerciais), foram fornecidos pela empresa XLAM BRASIL/Pisosul (Figura 3.1) com sua fábrica localizada no município de Santa Terezinha de Itaipu-PR.

Figura 3.1: Fachada da XLAM BRASIL/Pisosul



Fonte: Google Maps (2024).

Para o desenvolvimento da pesquisa, foram doados pela empresa quatro painéis, dois de *Pinus spp.* e outros dois de *Eucalyptus spp.*, com dimensões de 1,2 m x 1,2 m, na configuração de 3 lamelas, essas com espessuras de 30 x 22 x 30 mm, representando a lamela de topo, a central e a inferior respectivamente, e coladas por adesivo monocomponente à base de poliuretano na gramatura de 200 g/m².

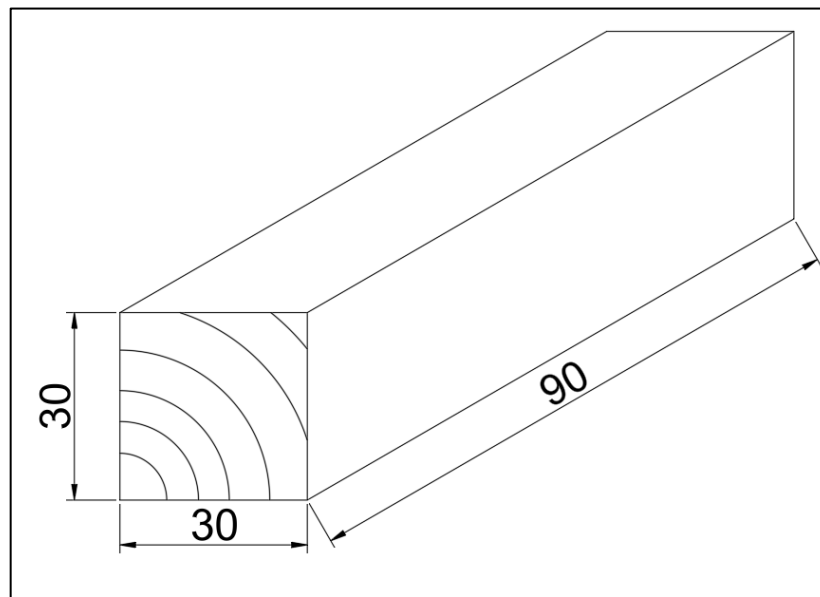
3.2 CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DA MADEIRA

Inicialmente foi necessário determinar as principais propriedades mecânicas e físicas das madeiras utilizadas nos painéis, e para isto, foram retiradas amostras de madeira dos corpos de prova doados pela empresa. Devido às dimensões das lamelas, foram necessárias adaptações nas dimensões dos corpos de prova para ensaio de caracterização definidos na norma NBR 7190 (ABNT, 2022). Para a caracterização das propriedades da madeira foram determinados: o teor de umidade, densidade básica, a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras, a resistência à compressão paralela às fibras e o módulo de elasticidade longitudinal (E_0).

3.2.1 Teor de Umidade

Para a determinação do teor de umidade foram adaptados os procedimentos da NBR 7190-03 (ABNT, 2022b). Os corpos de prova utilizados no ensaio possuíam seção transversal retangular com 30 mm de largura, 30 mm de altura e 90 mm de comprimento (Figura 3.2). Para este procedimento foram utilizados doze corpos de prova.

Figura 3.2: Corpo de prova utilizado no ensaio de umidade



Fonte: Adaptado, NBR 7190-3 (ABNT, 2022b).

Os corpos de prova foram pesados em balança com precisão de 0,01 gramas para determinar sua massa inicial, em seguida colocados em estufa a uma temperatura de $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, onde ficaram por cerca de 24 horas.

Após o período de secagem, os elementos foram retirados e mantidos em dessecador com sílica gel até atingirem a temperatura ambiente, em seguida, foram novamente pesados de forma a determinar a massa seca.

Desta forma, o teor de umidade para cada corpo de prova foi determinado utilizando a Equação (12):

$$\text{Teor de umidade (\%)} = \left[\frac{(W_i - W_s)}{W_s} \right] * 100 \quad (12)$$

Em que:

W_i é a massa inicial da madeira (g).;

W_s é a massa após a secagem em estufa da madeira (g).

3.2.2 Densidade básica

A densidade foi calculada baseando-se nas orientações da NBR 7190-03 (ABNT, 2022b), definida pela razão entre a massa seca e o volume saturado, em que o volume saturado se dá pela média das aferições de três pontos em cada dimensão do corpo de prova, já a massa seca, seguiu o procedimento supracitado no item 3.2.1.

Os corpos de prova possuíam seção transversal retangular de 30 mm x 30 mm x 90 mm. Foi analisado um lote de doze corpos de prova e a densidade básica obtida pela Equação (13).

$$\text{Densidade básica (g/cm}^3\text{)} = \frac{W_s}{V_s} \quad (13)$$

Em que:

W_s é a massa seca da madeira (kg);

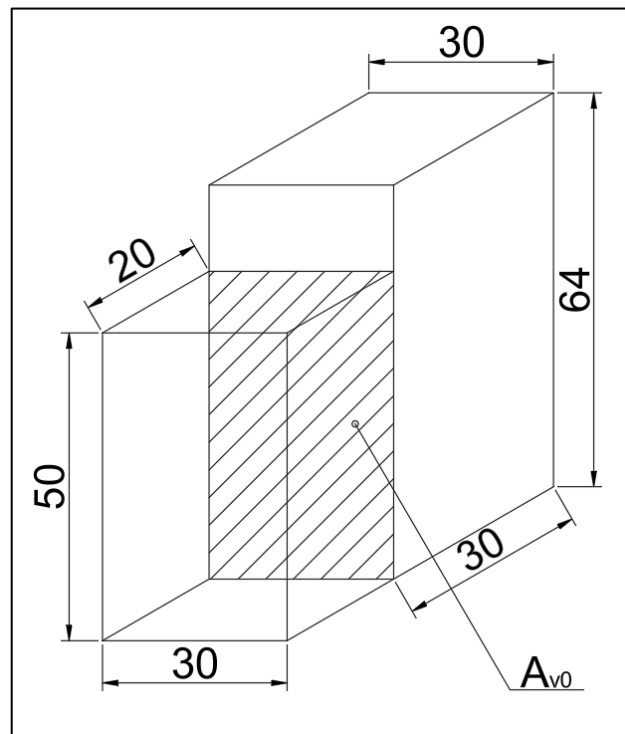
V_s é o volume da madeira saturada (m^3).

3.2.3 Resistência ao cisalhamento

Para a determinação da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras baseou-se nos procedimentos metodológicos nos procedimentos ditados pela NBR 7190-03 (ABNT, 2022). A resistência ao cisalhamento define-se como a razão entre a força máxima cisalhante aplicada no corpo e a área inicial da seção crítica do corpo de prova (A_{v0}), em um plano paralelo às fibras.

Para este ensaio, o carregamento foi realizado a uma taxa constante de 2,5 MPa/min e foram utilizados 6 corpos de prova. As dimensões dos corpos de prova estão representadas na Figura 3.3.

Figura 3.3: Modelo de corpo de prova utilizado no ensaio de cisalhamento



Fonte: Adaptado, NBR 7190-3, ABNT, 2022.

A resistência ao cisalhamento foi calculada pela Equação (18), onde:

$$f_{v0} = \frac{F_{v0,max}}{A_{v0}} \quad (14)$$

Em que:

$F_{v0,max}$ é a força última cisalhante (N);

A_{v0} é a área inicial da seção crítica do corpo de prova, em um plano paralelo às fibras (mm²);

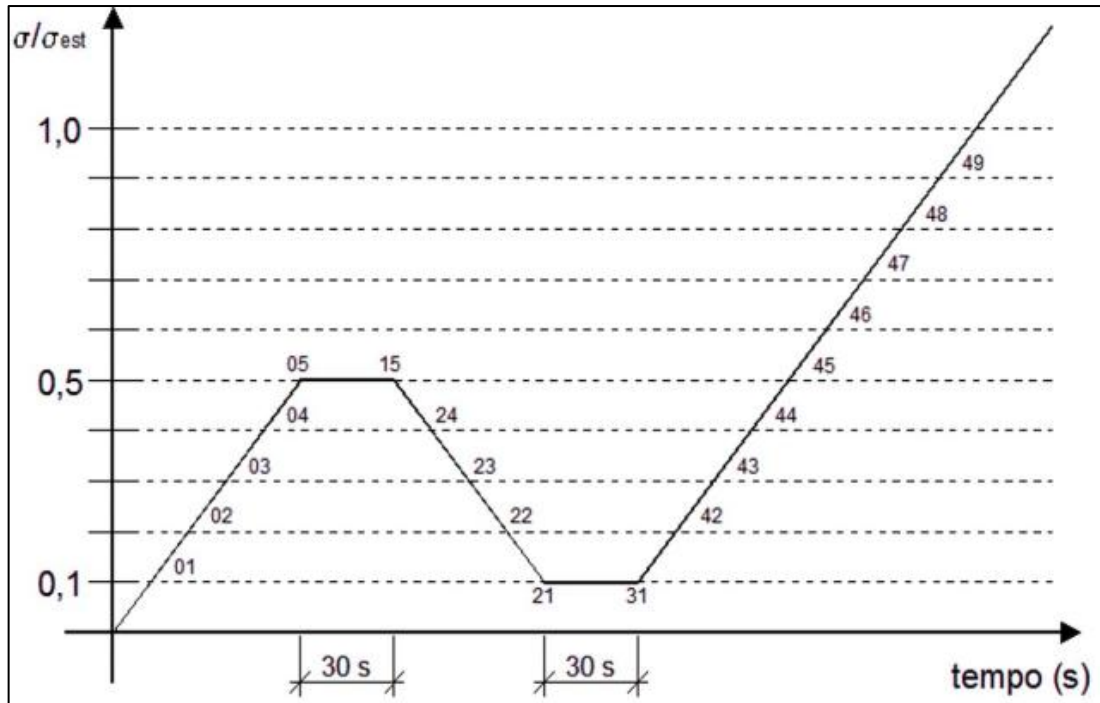
f_{v0} é a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (MPa).

3.2.4 Propriedades elásticas

Para a determinação do módulo de elasticidade longitudinal E_0 foi realizado o ensaio de compressão paralelo às fibras, conforme as determinações da norma NBR 7190-3 (ABNT, 2022b). Para este ensaio, os corpos de prova possuíam as medidas de 30 x 30 x 150 mm, e mediram-se as deformações em duas faces opostas dos corpos de prova, por meio de extensômetros digitais (LVDT). O carregamento foi aplicado com ciclos de carga e descarga, de acordo com as recomendações da

norma, conforme apresentado na Figura 3.4.

Figura 3.4: Diagrama de carregamento para determinação do módulo de elasticidade longitudinal



Fonte: NBR 7190-3, ABNT, 2022.

O módulo de elasticidade E_0 é determinado pela Equação (15):

$$E_0 = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\varepsilon_{50\%} - \varepsilon_{10\%}} \quad (15)$$

Em que:

E_0 é o módulo de elasticidade paralelo às fibras, expresso em (MPa);

$\sigma_{10\%}$ e $\sigma_{50\%}$ são as tensões de compressão correspondentes a 10% e 50% da resistência f_{c0} , representadas pelos pontos 31 e 45 do diagrama de carregamento (MPa);

$\varepsilon_{10\%}$ e $\varepsilon_{50\%}$ são as deformações específicas medidas no corpo de prova, correspondentes às tensões de $\sigma_{10\%}$ e $\sigma_{50\%}$.

3.2.5 Resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0})

Para a determinação da resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}), os ensaios basearam-se nos procedimentos metodológicos da NBR 7190-03 (ABNT, 2022), utilizando 12 corpos de prova medindo 30 x 30 x 90 mm. A carga foi aplicada em máquina universal de ensaios com carregamento crescente com taxa de 10 MPa/min. A resistência à compressão paralela às fibras foi calculada pela Equação 16:

$$f_{c0} = \frac{F_{c0,max}}{A} \quad (16)$$

Em que:

$F_{c0,max}$ é a força última de compressão (N);

A é a área da seção transversal (mm²);

f_{c0} é a resistência à compressão paralela às fibras (MPa).

3.3 ENSAIOS EM MLCC

Como citado anteriormente, os painéis de madeira lamelada colada cruzada foram confeccionados e doados pela empresa Pisosul/XLAM do Brasil, os painéis possuíam formato retangular com 1,2 x 1,2 metros, na configuração de 3 lamelas com 30 x 22 x 30 mm de espessura, em madeira de *Pinus spp.* e *Eucalyptus spp.* A Figura 3.5 mostra os painéis logo após a produção.

Figura 3.5: Painéis MLCC produzidos e doados pela Pisosul/XLAM do Brasil



Fonte: Pisosul/XLAM do Brasil, 2025.

Os painéis foram enviados pela empresa e armazenados no laboratório de estruturas da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Toledo.

Os painéis foram serrados utilizando uma serra circular de mesa deslizante (Figura 3.6) obtendo-se os corpos de prova para os ensaios de flexão e cisalhamento por compressão (Figura 3.7).

Figura 3.6: Início do processo de cortes dos corpos de prova.



Fonte: Autor, 2025.

Figura 3.7: Corpos de prova aferidos, marcados e classificados.



Fonte: Autor, 2025.

Foram realizados dois diferentes tipos de ensaios, ensaios de flexão de 3 pontos e cisalhamento por compressão. Para ambos os ensaios a taxa de carregamento adotada foi de 1mm/min.

3.3.1 Ensaio de Flexão de três pontos

Para este ensaio foram seguidos e adaptados os procedimentos metodológicos de ensaios de flexão de três pontos para vigas de MLCC proposto por Silva et al. (2023) para a determinação da resistência e do módulo de cisalhamento rolante.

Quarenta e oito corpos de prova foram serrados, sendo 24 de *Pinus spp.* e 24 de *Eucalipto spp.*, nas dimensões de 82 mm x 100 mm x 495 mm (espessura x largura x comprimento), em duas diferentes configurações: a primeira com as lamelas centrais orientadas paralelamente ao comprimento, e as externas transversalmente, como apresentado na Figura 3.8; a segunda com as lamelas centrais orientadas perpendicularmente ao comprimento do corpo de prova (e as externas orientadas paralelamente) como apresentado na Figura 3.9. Após o corte, as dimensões de todos os corpos de prova foram aferidas com paquímetro digital de precisão 0,1 mm.

Figura 3.8: Ensaio de flexão de 3 pontos - lamela central paralela ao comprimento (Configuração longitudinal)



Fonte: Autor, 2025.

Figura 3.9: Ensaio de flexão de 3 pontos – lamela central com orientação perpendicular (Configuração transversal)



Fonte: Autor, 2025.

O ensaio consiste na aplicação progressiva de uma força F no ponto central da viga biapoiada. A carga foi aplicada a uma taxa constante, onde o movimento do atuador de carga foi de 1 mm/min, valor abaixo da máxima taxa de deslocamento recomendada pela norma NBR 7190 – 7 (ABNT, 2022) para ensaios de flexão, que é 0,246 mm/s (0,003h).

O deslocamento vertical da peça foi medido utilizando extensômetro digital (LVDT), alocado no centro do vão, referenciado em uma cantoneira metálica fixada na linha central da lamela superior para evitar que o surgimento de trincas e o escorregamento por cisalhamento rolante no miolo central gerassem instabilidades, rotações ou perda de fixação no suporte do sensor, isolando a leitura da flecha global da peça.

A partir dos resultados obtidos nos ensaios experimentais foram determinadas a resistência e a rigidez ao cisalhamento rolante, utilizando as equações 17 e 18.

$$f_{vt} \text{ (MPa)} = \frac{3 \times F_{max}}{4 \times b \times c} \quad (17)$$

Onde:

f_{vt} é a resistência ao cisalhamento rolante (MPa);

F_{max} é a força máxima de ruptura obtida no ensaio de cisalhamento (N);

b é a largura do corpo de prova (mm);

c é o comprimento do corpo de prova (mm).

$$G_{vt} \text{ (MPa)} = K \times \frac{\left(\frac{b}{L_0}\right)^2}{\left(\frac{1}{E_{m,app}}\right)} \quad (18)$$

Em que:

G_{vt} é a rigidez ao cisalhamento rolante (MPa);

K é o coeficiente de cisalhamento, (adimensional);

b é a largura do corpo de prova (mm);

L_0 é o comprimento do vão (mm).

$E_{m,app}$ é o módulo de elasticidade transversal aparente, dado em Mega Pascal (MPa).

De mesma forma, o módulo de elasticidade transversal aparente ($E_{m,app}$), utilizado no cálculo da rigidez, foi calculado pela Equação 19.

$$E_{m,app} \text{ (MPa)} = \frac{\left(L_0^3 \times (F_{0,30\%} - F_{0,15\%})\right)^2}{48 \times I_{eff} (u_{0,30\%} - u_{0,15\%})} \quad (19)$$

Onde:

$E_{m,app}$ é o módulo de elasticidade transversal aparente (MPa);

L_0 vão livre da metodologia de ensaio (mm);

$F_{0,30\%}$ é o carregamento no meio do vão que corresponde ao deslocamento de 0,3% do vão ($u_{0,30\%}$) (N);

$F_{0,15\%}$ é o carregamento no meio do vão que corresponde ao deslocamento de 0,15% do vão ($u_{0,15\%}$) (N);

I_{eff} é inércia da seção em relação a X (mm⁴);

$u_{0,30\%}$ é o deslocamento no meio do vão causado por $F_{0,30\%}$ (mm);

$u_{0,15\%}$ é o deslocamento no meio do vão causado por $F_{0,15\%}$ (mm);

3.3.2 Ensaio de cisalhamento por compressão

A metodologia de teste de cisalhamento por compressão utilizada nesse trabalho é recomendada pelas normas 7190-7 (ABNT, 2022a) e EN 16351 (BSI, 2015).

Esse ensaio foi realizado seguindo e adaptando os procedimentos metodológicos utilizados por Molina et al. (2025), para a determinação da resistência ao cisalhamento rolante. Consiste em um ensaio de compressão, onde os corpos de prova estão “encapsulados” em cutelos metálicos, e aplica-se uma força de compressão paralela à uma das lamelas, que incide tensões de cisalhamento na lamela transversal, levando à ruptura do corpo de prova por cisalhamento rolante. A Figura 3.10 representa o aparato metálico utilizado no ensaio.

Figura 3.10: Aparato metálico utilizado no ensaio de cisalhamento por compressão



Fonte: Autor, 2025.

Para esse ensaio, foram utilizados 6 corpos de prova de cada painel, totalizando 24 corpos de prova no total, sendo 12 de *Pinus spp.* e o restante de *Eucalyptus spp.*, com dimensões aproximadas de 82 mm x 100 mm x 330 mm

(espessura x largura x comprimento). Após o corte, as dimensões de todos os corpos de prova foram aferidas com paquímetro de precisão de 0,1 mm. A fim de padronizar as taxas de carregamento, adotou-se a mesma taxa usada no ensaio de flexão, de 1mm/min. A Figura 3.11 representa o ensaio de compressão.

Figura 3.11: Ensaio de cisalhamento por compressão



Fonte: Autor, 2025.

Os resultados obtidos experimentalmente foram utilizados para o cálculo da resistência (f_{vt}) e a rigidez (G_{vt}) ao cisalhamento rolante, utilizando as Equações 20 e 21, respectivamente.

$$f_{vt} \text{ (MPa)} = \frac{F_{max} \times \cos 14^\circ}{b \times c} \quad (20)$$

Onde:

f_{vt} é a resistência ao cisalhamento rolante (MPa);

F_{max} é a força máxima de ruptura obtida no ensaio de cisalhamento (N);

b é a largura do corpo de prova (mm);

c é o comprimento do corpo de prova (mm).

$$G_{vt} \text{ (MPa)} = \frac{(F_{1,00} - F_{0,75}) \times t_{cam}}{0,25 \times b \times c} \quad (21)$$

Em que:

G_{vt} é a rigidez ao cisalhamento rolante (MPa);

$F_{1,00}$ é a força que causou uma deformação linear de 1,00 mm (N);

$F_{0,75}$ é a força que causou uma deformação linear de 0,75 mm (N);

t_{cam} é a espessura da camada transversal central (mm);

b é a largura do corpo de prova (mm);

c é o comprimento do corpo de prova (mm).

3.4 ANÁLISE VISUAL DE FALHA

Após a realização dos ensaios mecânicos até a ruptura, todos os corpos de prova, produzidos com *Eucalyptus spp.* e *Pinus spp.*, foram submetidos à análise visual macroscópica da fenomenologia de falha. A avaliação foi aplicada às amostras ensaiadas em cisalhamento por compressão e em flexão a três pontos, nas orientações transversal e longitudinal das lamelas externas. O procedimento teve como finalidade identificar o mecanismo de ruptura efetivamente mobilizado em cada configuração experimental e verificar se a solicitação imposta favoreceu a ocorrência de cisalhamento rolante nas camadas transversais do painel.

Após o colapso estrutural, as superfícies fraturadas, as lamelas e as linhas de colagem foram inspecionadas visualmente. Cada corpo de prova foi classificado segundo o modo de falha predominante, definido como o mecanismo com maior extensão e influência aparente na ruptura final. Quando presentes, mecanismos adicionais foram registrados como modos secundários.

A classificação considerou: (i) cisalhamento rolante puro, caracterizado pela ruptura associada ao rolamento das fibras na lamela transversal; (ii) cisalhamento

rolante combinado com delaminação, identificado pela ocorrência simultânea de ruptura na madeira e separação na interface colada; (iii) falha por flexão, associada predominantemente à tração na face inferior do corpo de prova; (iv) falha por flexão combinada com delaminação; e (v) falha por flexão combinada com cisalhamento rolante.

Os resultados foram organizados por espécie e grupo experimental. Para cada condição de ensaio, contabilizou-se o número total de corpos de prova e a frequência absoluta dos modos de falha predominante e secundário. A interpretação foi qualitativa e comparativa, buscando relacionar a distribuição dos modos de ruptura à orientação das lamelas, ao tipo de carregamento e à possível influência da interface adesiva. Essa análise complementou os resultados de resistência e rigidez, permitindo avaliar a adequação de cada método para a caracterização do cisalhamento rolante em painéis de MLCC.

3.5 AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A análise estatística dos dados experimentais foi conduzida para avaliar e analisar a resistência e rigidez ao cisalhamento rolante dos ensaios realizados e dos métodos teóricos de cálculo utilizados, focando nas diferenças entre as espécies e variações entre metodologias.

Todo o processamento dos dados e a condução da análise estatística foram realizados com o auxílio do software Microsoft Excel 365 (Microsoft Corporation, 2026). A execução dos testes estatísticos de maior complexidade e das rotinas analíticas não contempladas nativamente pelo software de planilhas (tais como a verificação da distribuição de probabilidade e as comparações não paramétricas) foi viabilizada por meio do suplemento complementar Real Statistics Resource Pack (Zaiontz, 2026).

A triagem inicial dos dados identificou a presença de quatro valores discrepantes (*outliers*) distribuídos em três grupos amostrais, mapeados por meio da análise visual dos gráficos de *Boxplot* (diagrama de caixas) gerados no programa de planilhas Microsoft Excel 365 (Microsoft Corporation, 2026). Após criteriosa inspeção física dos corpos de prova e verificação dos registros de ensaio, confirmou-se a integridade operacional dos testes e a inexistência de defeitos anômalos no preparo

das peças, atribuindo-se as amplitudes observadas à heterogeneidade anatômica intrínseca da madeira. Desse modo, optou-se pela manutenção da totalidade dos dados no acervo, utilizando-se métodos estatísticos não paramétricos (teste de Mann-Whitney), cuja formulação baseada em postos preserva a robustez da análise inferencial na presença de assimetria ou valores extremos.

Por fim, os parâmetros estatísticos adotados incluíram parâmetros descritivos, testes de normalidade, testes de hipótese, análises de concordância e análises gráficas conforme detalhado abaixo.

3.5.1 Parâmetros descritivos

A fim de comparar os resultados das metodologias de ensaios e validar os modelos teóricos de cálculo, utilizou-se o seguinte acervo de parâmetros descritivos:

- Média ($\bar{x}$), mediana e desvio padrão (s) dos resultados obtidos de resistência e rigidez de cada ensaio.
- Coeficiente de Variação (CV) para avaliar a homogeneidade entre amostras.

3.5.2 Testes de normalidade

Inicialmente, a distribuição dos resultados experimentais foi avaliada por meio de testes de normalidade, a fim de garantir a adequação do tratamento estatístico posterior. Para esse fim, utilizou-se o teste de Shapiro-Wilk, que se fundamenta na comparação entre a distribuição observada da amostra e uma distribuição normal teórica, avaliando a aderência dos dados a uma curva gaussiana.

O teste de Shapiro-Wilk é amplamente utilizado por sua sensibilidade em amostras de diferentes tamanhos, fornecendo um valor de significância que orienta a tomada de decisão. Caso o valor de p (p -valor) obtido seja superior a 0,05, falha em se rejeitar a hipótese nula, assumindo-se que os dados seguem uma distribuição normal. Por outro lado, um p -valor inferior a 0,05 indica que a amostra apresenta uma distribuição significativamente distinta da normalidade.

A sua importância reside na sua capacidade de determinar a natureza das variáveis analisadas, uma vez que a validade de testes estatísticos paramétricos depende da premissa de que os dados populacionais sigam uma distribuição normal.

A não normalidade dos dados implica necessariamente na utilização de testes de hipóteses não paramétricos, como por exemplo o teste de Kruskal-Wallis ou de Mann-Whitney.

3.5.3 Testes de hipótese

No presente estudo, a verificação da normalidade revelou que determinados grupos experimentais (Como: Cisalhamento Eucalipto G_{vt} e Flexão Longitudinal Pinus f_{vt}) apresentaram distribuições não normais, com p-valores abaixo do limite de 0,05. Essa constatação foi determinante para a seleção do ferramental analítico, justificando a utilização de testes não paramétricos, como o teste de Mann-Whitney U, que baseia suas comparações nas medianas e não na média aritmética, garantindo assim o rigor metodológico e a confiabilidade nas conclusões das comparações realizadas nesse trabalho.

Visto que a premissa de normalidade dos resíduos ($p > 0,05$) não foi atendida em todas as baterias de ensaios, optou-se pela utilização do testes não paramétricos de Mann-Whitney U em substituição à ANOVA.

Devido à natureza binária intrínseca das comparações feitas nesse trabalho, realizou-se uma série de comparações planejadas, entre seis grupos para identificar quais grupos diferem entre si. Os seis grupos consistem em:

1. Grupo 1: Cisalhamento por compressão - *Pinus spp.*;
2. Grupo 2: Cisalhamento por compressão - *Eucalyptus spp.*;
3. Grupo 3: Flexão simples (orientação perpendicular) - *Pinus spp.*;
4. Grupo 4: Flexão simples (orientação perpendicular) - *Eucalyptus spp.*;
5. Grupo 5: Flexão simples (orientação paralela) - *Pinus spp.*;
6. Grupo 6: Flexão simples (orientação paralela) - *Eucalyptus spp.*

A validade desta análise é garantida pela independência das observações e pela natureza contínua das variáveis de resistência analisadas, que permitem a comparação das medianas de resistência e rigidez entre as diferentes configurações de MLCC.

Em relação as hipóteses estatísticas, a hipótese nula (H_0) partiu da premissa

de que não há diferença entre as medianas dos dois grupos comparados. A hipótese alternativa (H_1) estabelece a existência de uma diferença estatisticamente significativa entre a mediana dos dois grupos, indicando que um grupo tende a apresentar valores superiores ao outro.

3.5.4 Verificação da concordância

Como base inicial de comparação entre os resultados experimentais e os obtidos nos modelos teóricos de cálculo, se utilizou do erro percentual médio ($E\%$), e é dado pela Equação (22).

$$E\% = \frac{\tau_{teórico} - \tau_{experimental}}{\tau_{experimental}} \times 100 \quad (22)$$

Para demais comparações entre as configurações de ensaio, se utilizou da análise de concordância de *Bland-Altman*, com o qual foi possível identificar vieses (*Bias*) dos métodos aplicados, observando se a configuração de ensaio superestima ou subestima sistematicamente os resultados, ou ainda, se há correlação estatisticamente significativa entre eles.

O método se baseia em uma análise gráfica, onde o eixo das abscissas (X) representa a média das medidas dos dois métodos comparados, e o eixo das ordenadas (Y) é composto pela diferença entre as medidas. A análise é feita a partir da linha central de referência, que representa a diferença média (d), e os Limites de Concordância (LdC) dados pela Equação (23).

$$LdC = \bar{d} \pm 1,96 \times s \quad (23)$$

Onde s é o desvio padrão das diferenças.

Onde $\bar{d}$ é a média de diferenças/bias ou viés.

Assim, pela análise gráfica, se 95% das diferenças estiverem dentro dos limites de concordância e o viés (diferença média) for próximo de zero, há concordância aceitável. Valores fora dos limites indicam discrepâncias relevantes

entre os métodos comparados, ou seja, não há concordância aceitável.

3.6 MODELOS TEÓRICOS DE CÁLCULO

Com o propósito de validar a capacidade preditiva das formulações matemáticas consagradas na literatura técnica para o dimensionamento de elementos estruturais de MLCC, foi estruturado um procedimento de confrontação direta entre as respostas empíricas obtidas em laboratório e os valores teóricos calculados. O escopo da modelagem analítica abrangeu a avaliação de três modelos mecânico-estruturais, apresentados no item 2.2.1.2, de naturezas constitutivas distintas:

- a) Método Gamma: Modelo simplificado que contabiliza a perda de rigidez efetiva da seção composta por meio de um coeficiente de eficiência de conexão (γ_i), assumindo uma distribuição simplificada de tensões de cisalhamento focada nas lamelas transversais;
- b) Método K (Teoria do Compósito): Formulação baseada na modificação da rigidez equivalente da seção transformada, operando sob a premissa de que as camadas orientadas perpendicularmente ao eixo do vão não oferecem resistência flexural primária significativa, sendo adaptada para computar a contribuição de todas as lamelas;
- c) Analogia de cisalhamento (*Shear Analogy*): Modelo rigoroso que segrega explicitamente o fluxo de tensões ao decompor o elemento estrutural em dois componentes virtuais acoplados, separando de forma acurada as parcelas correspondentes à rigidez à flexão pura e à rigidez ao cisalhamento rolante.

3.6.1 Premissas constitutivas e parâmetros de entrada

Como os painéis foram entregues prontos pela empresa doadora, e em seu processo comum não são caracterizadas as propriedades das madeiras utilizadas, foi necessária a adoção metodológica de um módulo de elasticidade longitudinal médio (E_{0med}) representativo para cada espécie.

Todas as comparações entre as metodologias foram conduzidas com base

nos valores médios obtidos para cada bateria de ensaios.

As comparações dos resultados entre metodologias teóricas e experimentais se restringiram a comparação dos valores em si (onde todos os valores foram alocados em uma tabela resumo dos resultados), e pela utilização de representações gráficas dos valores absolutos e dos erros percentuais médios.

Como parâmetro de entrada essencial para as metodologias de cálculo, fixou-se a razão de rigidez elástica transversal recomendada por diretrizes normativas internacionais, expressa pela Equação (24):

$$E_{90} = \frac{E_0}{30} \quad (24)$$

Onde E_{90} representa o módulo de elasticidade perpendicular às fibras da lamela solicitado no plano de crescimento radial-tangencial do miolo. Todas as rotinas de cálculo foram alimentadas com as propriedades geométricas nominais das seções transversais e executadas de forma isonômica em relação à amostragem.

3.6.2 Matriz de comparação e métricas de acurácia

A validação dos modelos foi conduzida de forma agregada, baseando-se estritamente nos valores médios experimentais de tensão de ruptura por cisalhamento rolante obtidos para cada bateria de ensaios. O plano de confrontação analítica foi desenhado para testar a sensibilidade dos modelos perante o comportamento bimodal do programa experimental, mapeando os desvios causados por duas variáveis de contorno distintas:

1. A orientação direcional das fibras da lamela central (Configuração transversal vs. Configuração longitudinal).
2. A procedência botânica (*Pinus spp.* vs. *Eucalyptus spp.*).

Para normalizar os desvios teóricos e quantificar a precisão matemática versus o nível de conservadorismo de cada formulação face à resposta real de laboratório, aplicou-se a métrica do erro percentual médio ($E\%$), explicado no item 3.5.4.

Onde desvios associados a sinais negativos ($E\% < 0$) foram classificados como subestimações da capacidade de carga real (margem de segurança estrutural desejável), ao passo que gradientes com sinais positivos ($E\% > 0$) foram mapeados como superestimativas perigosas da resistência limite do painel engenheirado. Os resultados foram consolidados em tabelas e gráficos de colunas para a verificação de tendências e indexação de segurança estrutural.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nessa seção são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios de caracterização das espécies, de resistência ao cisalhamento rolante por ensaio de flexão e por compressão das peças coladas de *Pinus spp.* e *Eucalyptus spp.*

4.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS E FÍSICAS DAS MADEIRAS UTILIZADAS

Em decorrência das adaptações metodológicas necessárias para a caracterização física e mecânica das madeiras utilizadas, que foram motivadas pela impossibilidade de ensaiar os lotes de madeira previamente à confecção dos painéis, as propriedades obtidas nesta seção foram analisadas por meio de seus valores médios. Essa diretriz visa assegurar uma base comparativa isonômica, padronizada e estatisticamente consistente para as etapas subsequentes do presente trabalho. A Tabela 4.1 apresenta os valores médios das propriedades características.

Tabela 4.1: Resultados médios das propriedades físicas e mecânicas das espécies

Espécie	Umidade (%)	Densidade Básica (Kg/m³)	Resist. ao cisalhamento (f_{vo}) (MPa)	Resist. a compressão (f_{co}) (MPa)	Módulo de elasticidade longitudinal (E_o) (GPa)
<i>Eucalyptus spp.</i>	12,62	466,54	11,02	52,20	17,66
<i>Pinus spp.</i>	11,64	432,44	15,36	48,50	13,29

Fonte: Autor, 2026.

4.2 ENSAIO DE CISALHAMENTO ROLANTE POR COMPRESSÃO

A determinação das propriedades de cisalhamento rolante via ensaios de cisalhamento por compressão, constitui a base experimental para a validação do desempenho estrutural dos painéis de MLCC produzidos com as espécies de *Eucalyptus spp.* e *Pinus spp.* Diferentemente dos ensaios de flexão, a configuração de compressão visa minimizar a interferência das tensões normais de flexão e isolar

as deformações por cisalhamento nas lamelas transversais. Porém, as tensões nessa metodologia não são necessariamente “puras”, visto que além das tensões cisalhantes na lamela central, o corpo de prova encontra-se encapsulado” e é esmagado simultaneamente. Esta seção apresenta os resultados descritivos da resistência (f_{vt}) e do módulo de cisalhamento rolante (G_{vt}), fundamentais para o dimensionamento de painéis MLCC, para a calibração de modelos analíticos e para a compreensão da capacidade de carga do material engenheirado. A Tabela 4.2 apresenta o resumo dos resultados obtidos nesta seção.

Tabela 4.2: Resultados descritivos dos ensaios de cisalhamento por compressão.

Variável	Espécie	Média (MPa)	Mediana (MPa)	Desv. Pad.	CV (%)	Mín. (MPa)	Máx. (MPa)
Resistência (f_{vt})	<i>Eucalyptus spp.</i>	3,20	3,27	0,51	16,02	2,27	3,81
	<i>Pinus spp.</i>	2,55	2,42	0,37	14,36	2,07	3,20
Módulo (G_{vt})	<i>Eucalyptus spp.</i>	56,67	56,53	9,73	17,16	35,99	79,17
	<i>Pinus spp.</i>	43,64	49,70	11,63	26,65	20,94	55,81

Fonte: Autor, 2025.

Os resultados descritivos obtidos nos ensaios de cisalhamento rolante por compressão evidenciam comportamentos mecânicos distintos entre as espécies estudadas. Para a resistência ao cisalhamento rolante, o *Eucalyptus spp.* apresentou uma média de 3,20 MPa, superior aos 2,55 MPa observados no *Pinus spp.* Esta superioridade da madeira dura é acompanhada por uma estabilidade estatística satisfatória, com coeficientes de variação situados entre 16,02 % e 14,36 %, respectivamente.

No que tange ao módulo de cisalhamento rolante, os dados revelam uma disparidade acentuada na variabilidade entre amostras. A espécie de *Eucalyptus spp.* apresentou uma rigidez mediana de 56,53 MPa, enquanto o *Pinus spp.* atingiu 49,70 MPa. É notório o elevado CV de 26,65% registrado para o módulo de rigidez do *Pinus spp.*, indicando uma sensibilidade maior desta conífera sob carregamento por compressão.

As diferenças observadas podem ser relacionadas à densidade, à anatomia e à organização da madeira de cada espécie. Em painéis de CLT produzidos com *Eucalyptus nitens*, o módulo e a resistência ao cisalhamento rolante apresentaram

correlação significativa com a densidade do painel (Ettelaei et al., 2022), ainda, parâmetros anatômicos como a geometria das fibras e a densidade aparente também se mostraram bons preditores de propriedades mecânicas em madeiras de *Eucalyptus* (Marini et al., 2022).

Assim, a maior resistência do *Eucalyptus spp.* pode ser interpretada como compatível com uma matriz lenhosa mais densa e com elementos anatômicos que oferecem maior suporte à deformação transversal. Entre essas características, o conteúdo e a distribuição das células radiais podem contribuir para a resposta ao cisalhamento no plano radial-tangencial, pois Bader; Eberhardsteiner; De Borst, (2015) observaram na madeira de folhosas que o maior conteúdo de células radiais estava associado a maior rigidez e que as células radiais atuavam como elementos de reforço nesse plano contra o cisalhamento.

Contudo, a atribuição específica desse comportamento apenas a paredes celulares mais espessas requereria medições diretas de espessura de parede e proporção de lenho juvenil e adulto, o que não foi realizado no presente estudo. Porém, estudos em *Pinus taeda* mostram que aumentos de densidade e de espessura da parede celular podem acompanhar alterações nas propriedades mecânicas, embora a relação não seja necessariamente unívoca (Miller et al., 2019).

A menor carga de ruptura do *Pinus spp.* não deve ser atribuída genericamente apenas à constituição das coníferas. Ela pode refletir a combinação entre densidade, anatomia das fibras, orientação dos anéis de crescimento, presença de lenho juvenil, nós e configuração geométrica da camada transversal (Li et al., 2021; Pradhan et al., 2023). A importância da densidade é demonstrada experimentalmente pelo aumento da resistência ao cisalhamento rolante em painéis MLCC de *Pinus taeda* após a densificação da camada transversal; em uma condição de densificação de 50%, a resistência aumentou em até 108% (Pradhan et al., 2023).

No que tange ao confronto direto com a literatura que adota rigorosamente a mesma configuração experimental deste estudo (cisalhamento por compressão) sobressaem-se os achados de Silva et al. (2023). Os referidos autores avaliaram painéis de madeira lamelada colada cruzada produzidos com *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis*, registrando, para o ensaio de compressão convencional, resistências e rigidezes ao cisalhamento rolante de 2,14 MPa e 21,5 MPa para a conífera, e de 2,74 MPa e 27,90 MPa para a folhosa. Esse cenário estabelece uma convergência mecânica ideal com as tendências obtidas na presente pesquisa, na

qual o *Eucalyptus spp.* também superou o *Pinus spp.* em ambas as propriedades. A proximidade escalar e a manutenção estrita da hierarquia de desempenho entre os gêneros botânicos confirmam a reprodutibilidade da metodologia de cisalhamento por compressão.

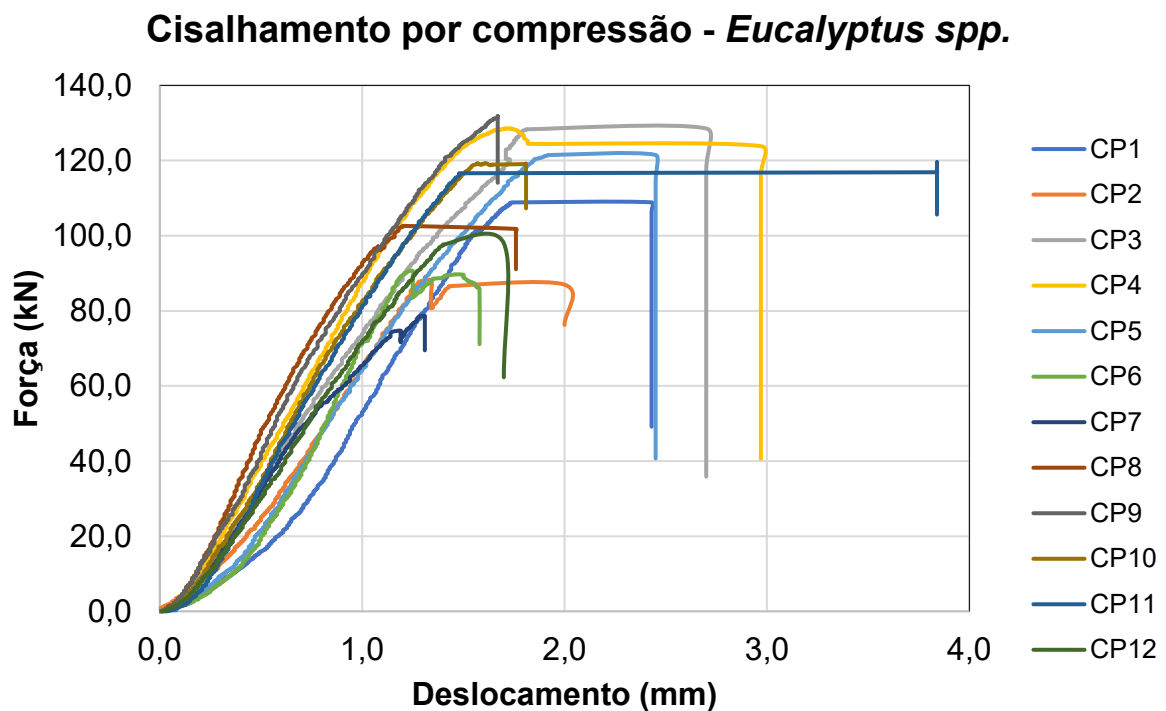
Por outro lado, torna-se imperativo salientar que a maior parte das investigações disponíveis na literatura adota uma linha metodológica distinta, fundamentada no ensaio de cisalhamento por compressão modificado (aparato com blocos inclinados), o que impede uma comparação direta de valores absolutos sem a devida ponderação mecânica. Sob essa configuração diferenciada, Gui et al. (2020) obtiveram resistência média de 3,54 MPa para o *Eucalyptus urophylla* (590 kg/m³), ao passo que Cao et al. (2019) reportaram limites entre 2,00 e 2,55 MPa para o *Pinus spp.*. No mesmo sentido, Wu, Zhong e Ren (2021) encontraram resistência de 1,52 MPa e rigidez de 93,9 MPa para a conífera *Spruce Pine Fir*, enquanto Kumar et al. (2023) registraram resistências de até 3,7 MPa e módulos transversais de até 99,7 MPa para coníferas australianas (*Radiata Pine*, *Southern Pine*, *Hoop Pine*). Até mesmo para folhosas de alta densidade, como o *European Beech Wood* (651 ~ 685 kg/m³) avaliado por Aicher, Christian e Hirsch (2016), a compressão modificada elevou a resistência média ao patamar de 5,5 MPa.

Cao et al., (2019) explicam que devido à inclinação utilizada no ensaio de compressão modificada, as tensões normais podem prevenir a propagação de fissuras pelos esforços cisalhantes, o que acarreta um aumento na resistência ao cisalhamento rolante. Adicionalmente, as tensões de cisalhamento decorrentes dessa configuração experimental não se restringem apenas à camada central, sendo também influenciadas pela resistência ao cisalhamento transversal das camadas externas. Ao mesmo passo, o mesmo fator de aumento da resistência não foi encontrado na metodologia de cisalhamento por compressão (sem inclinação).

Embora os dados preliminares da Tabela 4.2 indiquem uma elevada probabilidade de discrepância entre as metodologias e espécies avaliadas, e as investigações presentes na literatura sejam comparáveis a estes resultados, a compreensão integral da mecânica do cisalhamento rolante exige uma investigação que transcenda os valores discretos dos parâmetros descritivos. A caracterização da ductilidade, a identificação do regime de “plastificação” e a análise da fragilidade do modo de falha são aspectos que residem na trajetória de carregamento do material, e não apenas no seu ponto de colapso.

Nesse contexto, para fundamentar a interpretação física dos dados quantitativos apresentados anteriormente, torna-se imperativo observar o comportamento contínuo dos corpos de prova sob tensão. A Figura 4.1 apresenta as curvas força-deslocamento obtidas durante o ensaio de cisalhamento por compressão modificado para a espécie de *Eucalyptus spp.* Esta representação gráfica permite identificar a homogeneidade da resposta elástica entre as amostras e a morfologia da ruptura, fornecendo o subsídio fenomenológico necessário para validar as tendências observadas nas análises estatísticas posteriores.

Figura 4.1: Gráfico Força - Deslocamento, obtido nos ensaios de cisalhamento por compressão para a espécie de *Eucalyptus spp.*



Fonte: Autor, 2026.

Os resultados experimentais para o *Eucalyptus spp.* relevam um comportamento mecânico complexo, caracterizado por três fases distintas na maioria das amostras: um regime elástico-linear inicial, uma transição não linear associada à plastificação e/ou micro fissuração, e um colapso final abrupto.

Observa-se também uma variação considerável na carga de ruptura, com valores oscilando entre 80 kN e 130 kN.

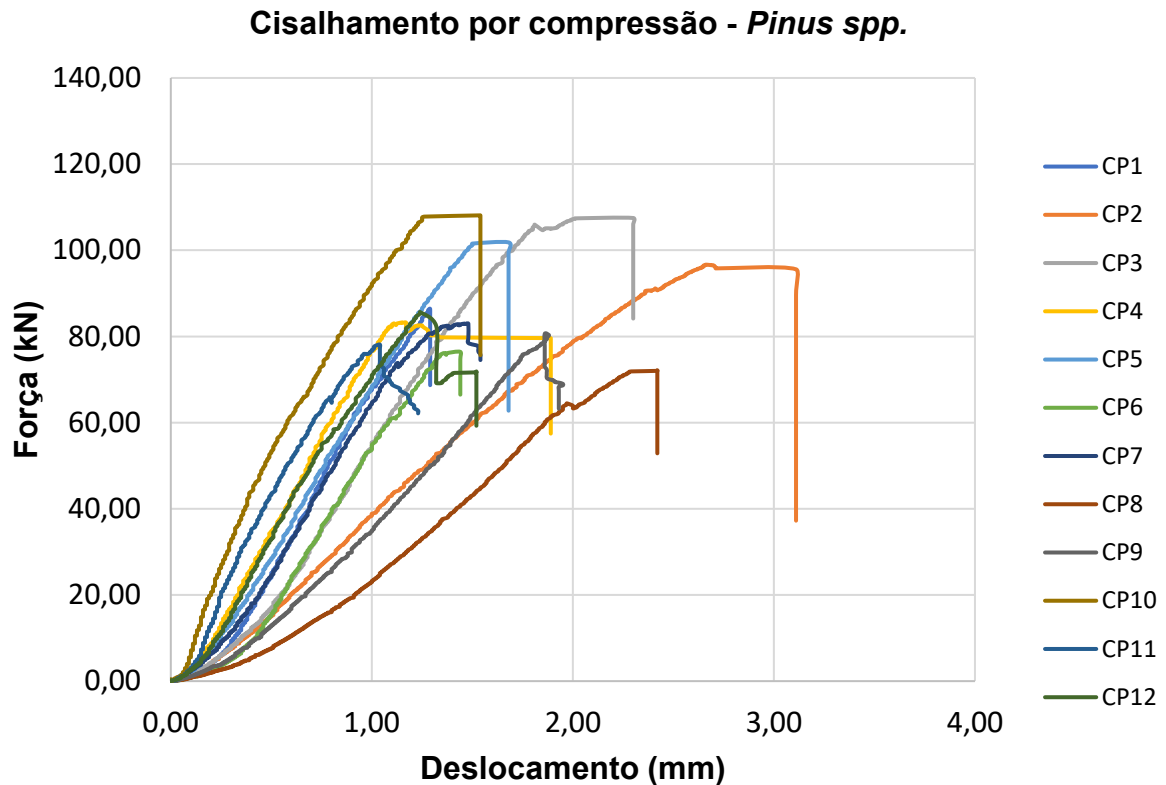
A maioria das amostras apresentou deformações últimas no intervalo de 1,5

a 3 mm. A inclinação das curvas na fase elástica mostra-se relativamente consistente entre os corpos de prova, sugerindo uma estabilidade no módulo de elasticidade aparente para esta configuração de ensaio e material empregado.

A natureza das curvas indica que, além do *Eucalyptus* possuir alta capacidade de carga, o seu modo de falha após atingir o pico é predominantemente “plástico”, portanto, não falha de forma súbita. Para o dimensionamento de elementos estruturais, isso implica a necessidade de coeficiente de segurança menos rigorosos, uma vez que o material oferece uma boa reserva de plasticidade ou aviso visual antes do colapso total sob o cisalhamento rolante induzido por carregamentos internos ao plano dos painéis.

Após a caracterização do comportamento reológico do *Eucalyptus spp.*, cuja resposta mecânica evidenciou uma elevada capacidade de carga e uma ruptura com um patamar de ductilidade, torna-se necessária a análise comparativa com a espécie de *Pinus spp.* para identificar as nuances impostas por uma anatomia lenhosa distinta. A Figura 4.2 detalha as curvas de força vs. deslocamento para os doze corpos de prova de *Pinus spp.*, evidenciando a variabilidade da rigidez e a capacidade de carga deste material.

Figura 4.2: Gráfico Força – Deslocamento, obtido nos ensaios de cisalhamento por compressão para a madeira de *Pinus spp.*



Fonte: Autor, 2026.

Os resultados experimentais para a madeira de *Pinus spp.* revelam um comportamento mecânico caracterizado por um regime elástico-linear inicial bem definido, seguido por uma etapa de transição associada à plastificação das fibras e o subsequente colapso do elemento.

Observa-se também uma variação considerável na carga de ruptura, com valores oscilando entre 70 kN e 110 kN.

A maioria das amostras apresentou deslocamentos últimos no intervalo de 1,0 a 2,5 mm, embora corpos de prova pontuais tenham atingido deformações superiores a 3,0 mm (como observado no CP2).

Ainda, amostras como o CP2 e CP8 apresentam uma rigidez inferior, atingindo deslocamentos superiores a 2,0 mm antes da ruptura total ou estabilização da carga.

Diferentemente do colapso visto no *Eucalyptus spp.*, algumas amostras de *Pinus spp.* nem apresentaram um patamar de plastificação, ou este foi muito breve após a perda de linearidade, indicando uma menor capacidade de acomodação de tensões por meio do esmagamento progressivo das fibras. E, observa-se uma

dispersão mais acentuada nas inclinações das curvas elásticas iniciais em comparação à espécie anterior.

A presença de falhas mais frágeis em boa parte das amostras, sugere que o *Pinus spp.* pode oferecer um comportamento mecânico desfavorável em situações de redistribuição das tensões internas em painéis MLCC (na fase de “plastificação”). Contudo, a menor rigidez média, implica que o dimensionamento para estados limites de serviço será mais crítico para esta espécie, uma vez que deformações excessivas na camada transversal podem comprometer a integridade dos acabamentos e a percepção de segurança da estrutura.

A menor carga de ruptura eventualmente observada nos painéis de *Pinus spp.* não deve ser atribuída exclusivamente à constituição da matriz lenhosa, pois o cisalhamento rolante em MLCC também é influenciado pela densidade das lamelas, pela orientação dos anéis de crescimento, pela relação geométrica das tábuas, pela espécie e pela configuração do ensaio (Li et al., 2021; Nero; Christopher; Ngo, 2022; Pradhan et al., 2023).

As diferenças anatômicas entre espécies podem contribuir para as divergências de desempenho encontradas, visto que: em espécies de *Pinus*, a transição entre lenho juvenil e adulto é acompanhada por mudanças acentuadas na densidade, no comprimento e no ângulo das fibras. Em *Pinus contorta*, essa transição ocorre em idades distintas conforme a propriedade analisada: aproximadamente 15 anos para o ângulo, 18 para o comprimento das fibras e 31 para a densidade (Mansfield et al., 2009). No *Eucalyptus grandis*, os principais elementos anatômicos apresentam distribuição radial relativamente uniforme, embora o comprimento das fibras, a espessura da parede celular e o diâmetro dos vasos aumentem gradualmente em direção à casca (Palermo et al., 2015). Resultados semelhantes indicaram que a proporção dos principais elementos anatômicos e o diâmetro dos vasos variaram pouco ao longo do raio de *Eucalyptus grandis*, enquanto as mudanças nas dimensões e no ângulo das fibras permitiram identificar uma zona de transição entre o quinto e o décimo primeiro ano (Ramos et al., 2011). Assim, o gênero *Pinus* tende a apresentar maior diferenciação radial entre lenho juvenil e adulto, enquanto o *Eucalyptus* apresenta variações anatômicas mais graduais, mas ainda possui uma zona de transição entre o lenho juvenil e adulto. Isso é atestado por (Bidakov et al., 2020), que encontrou em seus estudos que as coníferas apresentam um modo de falha bem definido na transição entre o lenho inicial e tardio nos anéis de crescimento,

ao passo que nas folhosas o modo de falha por cisalhamento rolante não se estabelece de forma tão clara, embora estas apresentem maior resistência mecânica.

Ainda assim, a anatomia da conífera fornece uma base plausível para as diferenças de comportamento: o lenho juvenil apresenta, em comparação com o lenho adulto, menor densidade e diferenças na organização e nas propriedades das fibras (Sadegh; Kiaei, 2011). Na conífera de *Pinus sylvestris*, por exemplo, foram observados valores menores de dureza e de módulo de elasticidade reduzido nas paredes celulares do lenho juvenil do que no lenho adulto, indicando uma menor rigidez local da parede celular (Mania; Nowicki, 2020). Esses resultados são compatíveis com uma maior deformabilidade e com o início antecipado dos mecanismos de ruptura; contudo, os estudos consultados não demonstram, de forma específica para o cisalhamento rolante em MLCC de *Pinus spp.*, que o lenho juvenil, ou uma separação mais evidente entre os lenhos, cause o colapso prematuro.

Para o gênero *Eucalyptus*, os resultados encontrados na literatura também indicam que painéis produzidos com madeira de maior classe estrutural apresentam maior rigidez e resistência ao cisalhamento rolante, e que a densidade da madeira da camada transversal e o módulo de elasticidade das camadas externas afetam o desempenho e os modos de falha (Ettelaei; Taoum; Nolan, 2022).

Portanto, a interpretação mais defensável é que diferenças de densidade, rigidez da parede celular, organização do lenho juvenil–adulto, orientação dos anéis e qualidade da ligação adesiva podem alterar a distribuição da deformação e o modo de ruptura, mas a atribuição causal de um mecanismo específico exige ensaios com caracterização anatômica e fractográfica simultâneas.

4.3 ENSAIO DE FLEXÃO A 3 PONTOS

A caracterização mecânica de painéis CLT por meio de ensaios de flexão constitui uma abordagem amplamente difundida em normas internacionais para a determinação das propriedades cisalhamento rolante. Esta configuração experimental é projetada para induzir tensões de cisalhamento nas camadas transversais, permitindo a extração indireta da resistência (f_{vt}) e do módulo de cisalhamento rolante (G_{vt}) a partir da análise da linha elástica e da carga de ruptura.

Nesta seção, são apresentados e discutidos os resultados obtidos para as

configurações: transversal (Lamela central com as fibras orientadas perpendicularmente ao comprimento da peça) e longitudinal (Lamela central com as fibras orientadas paralelamente ao comprimento da peça) para as espécies de *Eucalyptus spp.* e *Pinus spp.* A distinção entre estas orientações é crucial, uma vez que a disposição das camadas em relação ao vão de ensaio altera o mecanismo de falha predominante de cisalhamento rolante em configurações transversais para flexão em configurações paralelas, provendo uma visão holística sobre as implicações da orientação das fibras das lamelas sob carregamentos perpendiculares ao plano dos painéis. A Figura 4.3 apresenta os corpos de prova utilizados nos ensaios de flexão transversal e flexão longitudinal em *Pinus spp.*, e a Tabela 4.3 apresenta os resultados obtidos para os ensaios de flexão.

Figura 4.3: a) Corpo de prova do ensaio de flexão transversal (direção de maior desempenho);
b) Corpo de prova do ensaio de flexão longitudinal (direção de menor desempenho).



Tabela 4.3: Resultados descritivos dos ensaios de flexão de 3 pontos.

Variável	Configuração	Média (MPa)	Mediana (MPa)	Desv. Pad.	CV (%)	Mín. (MPa)	Máx. (MPa)
Resistência (f_{vt})	<i>Eucalyptus</i> spp. Transversal	4,17	4,51	0,78	18,75	2,73	5,03
	<i>Eucalyptus</i> spp. Longitudinal	0,96	0,91	0,40	41,30	0,34	1,95
	<i>Pinus</i> spp. Transversal	4,04	4,09	0,56	13,88	2,85	5,02
	<i>Pinus</i> spp. Longitudinal	0,47	0,39	0,22	47,27	0,25	0,91
Módulo (G_{vt})	<i>Eucalyptus</i> spp. Transversal	333,66	330,00	46,53	13,95	252,11	405,79
	<i>Eucalyptus</i> spp. Longitudinal	50,29	48,02	5,69	11,32	41,45	61,28
	<i>Pinus</i> spp. Transversal	326,65	330,60	55,98	17,14	239,04	415,14
	<i>Pinus</i> spp. Longitudinal	32,78	32,14	3,78	11,54	26,36	40,52

Fonte: Autor, 2025.

Os dados consolidados na Tabela 4.3, revelam uma disparidade significativa entre os valores de resistência e rigidez em função da orientação do painel e da espécie ensaiada. Na configuração transversal, o *Eucalyptus* spp. apresentou resistência média de 4,17 MPa, valor ligeiramente superior aos 4,04 MPa obtidos para o *Pinus* spp. No que concerne ao módulo de cisalhamento rolante (G_{vt}), as duas espécies apresentaram a mesma tendência, o *Pinus* registrou média de 326,65 MPa, e o Eucalipto 333,66 MPa.

Esses indicadores de rigidez obtidos na flexão transversal posicionam-se em patamares marcadamente superiores aos predeterminados via ensaios de compressão direta. Esse fenômeno de subestimação sistemática na compressão decorre das condições de contorno cinemáticas e das hipóteses de modelagem analítica de cada aparato. Enquanto o método de compressão isola de forma mais direta a deformação por cisalhamento pura da camada central, no modelo matemático da flexão, a deflexão global do painel é governada de forma combinada pela rigidez flexural das camadas longitudinais externas. Por conseguinte, o G_{vt} na flexão acaba

incorporando frações da rigidez longitudinal das lamelas externas, resultando em um módulo elástico transversal aparente que reflete a eficiência do sistema estrutural composto, e não a propriedade purificada da lamela central.

Essa assimetria metodológica encontra perfeita correspondência nos achados de Silva et al. (2023), que ao investigarem painéis de MLCC de *Pinus Elliottii* e *Eucalyptus Grandis*, mapearam rigorosamente esse comportamento. Os autores reportaram que, na flexão de três pontos, as propriedades elasto-mecânicas elevaram-se para 2,45 MPa (f_{vt}) e 233 MPa (G_{vt}) para a conífera, e 3,14 MPa e 264 MPa para a folhosa, superando os valores obtidos pelos ensaios de compressão convencional. De forma análoga, Cao et al. (2019) obtiveram resistências na faixa de 1,77 a 1,89 MPa para o *Pinus spp.* em ensaios de flexão de quatro pontos, documentando limites inferiores àqueles extraídos por compressão modificada no mesmo estudo, o que ratifica o papel governante da tipologia de ensaio e do vão de corte sobre as tensões internas geradas.

Inversamente, quando avaliada a configuração longitudinal dos painéis, observa-se um decréscimo drástico nas propriedades mecânicas equivalentes, com resistências médias decaindo para 0,96 MPa para o *Eucalyptus spp.* e 0,47 MPa para o *Pinus spp.* Essa redução severa é plenamente justificada pela alteração no regime de falha governante. Na flexão transversal, o colapso estrutural deixa de ser puramente ditado pelo cisalhamento rolante da lamela central e passa a ser regido pelas tensões normais de tração na face inferior do corpo de prova, plano no qual a resistência do sistema é inerentemente menor devido à orientação paralela das fibras em relação ao fluxo de tensões normais.

Concomitantemente, registrou-se uma elevada variabilidade estatística na resistência sob orientação longitudinal, expressa por elevados coeficientes de variação (CV de 41,30% para o *Eucalyptus spp.* e 47,27% para o *Pinus spp.*). Esse comportamento evidencia que imperfeições associadas à qualidade da linha de cola, frestas latentes e defeitos naturais da madeira exercem influência nitidamente preponderante quando o painel composto é solicitado em sua orientação de menor rigidez relativa. Sob a perspectiva normativa, essa flutuação amostral está plenamente prevista; a norma europeia EN 789 preconiza que a rigidez ao cisalhamento rolante de painéis de CLT exhibe elevados coeficientes de variação, estipulando limites de até 50% especialmente para painéis configurados com apenas três lamelas. O fato de o teto de dispersão deste trabalho ter se fixado em 47,27% atesta a consistência

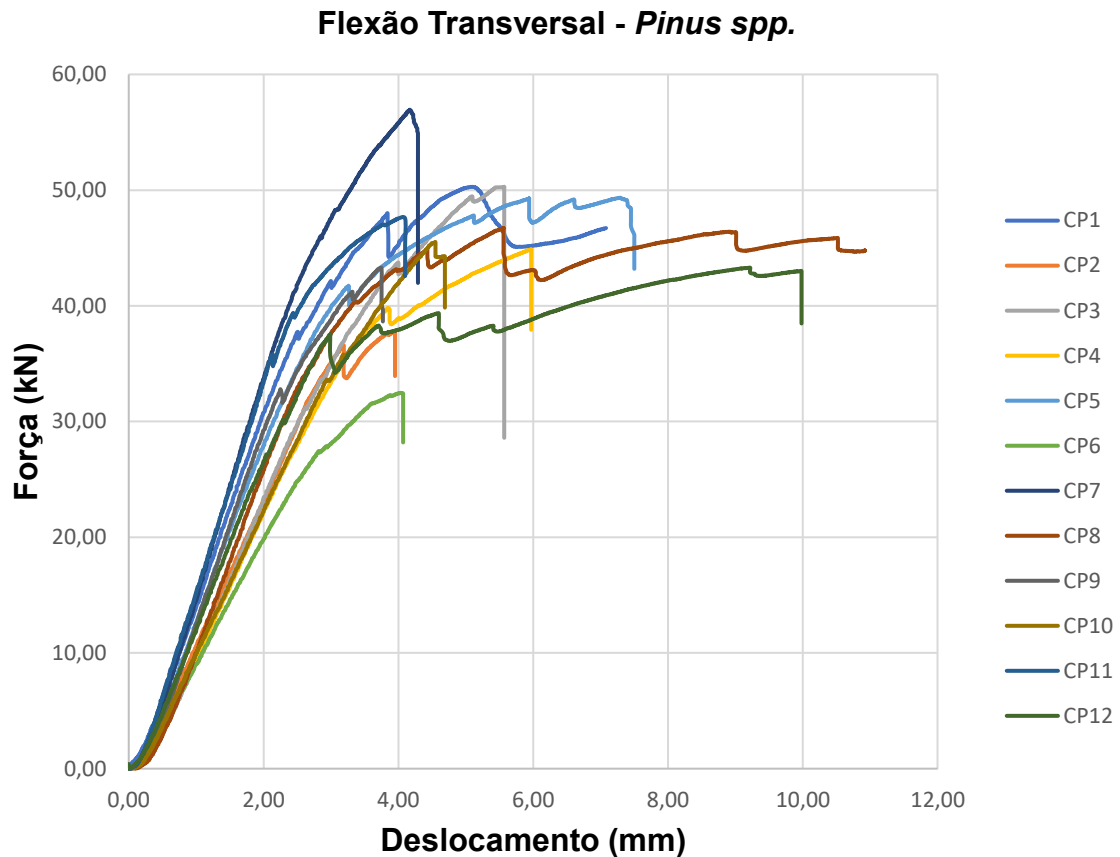
metodológica e a precisão de amostragem mantidas durante a execução dos ensaios laboratoriais.

O agrupamento de investigações internacionais utilizando ensaios de flexão permite contextualizar o desempenho do *Eucalyptus spp.* e do *Pinus spp.* frente a outras matérias-primas engenheiradas ao redor do mundo. Em coníferas de média e alta densidade, os resultados obtidos por He et al. (2020) para o Black Spruce (490 kg/m³) sob flexão a três pontos de vão curto indicaram resistências entre 1,74 e 1,80 MPa, demonstrando a sensibilidade do ensaio à geometria da peça. Adicionalmente, Das et al. (2023) avaliaram o comportamento sob flexão de quatro pontos da folhosa Aspen (385 kg/m³), obtendo resistências de 1,88 a 2,00 MPa.

A comparação com esses estudos valida o alto desempenho mecânico dos lotes avaliados nesta pesquisa: tanto o *Pinus spp.* quanto o *Eucalyptus spp.* ensaiados na flexão transversal superaram os limites dessas espécies internacionais. Essa variação elástica e de ruptura associada à geometria do componente foi aprofundada por Kawaai et al. (2023) ao ensaiarem a conífera *Larix kaempferi* (501~523 kg/m³) em painéis MLCC de múltiplos vãos e camadas. Os autores constataram resistências médias flutuando entre 1,04 e 2,66 MPa, sedimentando a premissa de que a resistência ao cisalhamento rolante aparente na flexão é inversamente proporcional ao aumento do vão e ao número de lamelas, haja vista a alteração na rigidez efetiva equivalente do sistema composto.

Dando continuidade à análise do comportamento mecânico e transcendendo a síntese estatística das propriedades médias e parâmetros descritivos discutidos anteriormente, torna-se fundamental investigar a resposta fenomenológica do material sob solicitação de flexão. A Figura 4.4 apresenta as curvas de Força vs. Deslocamento para as unidades experimentais de flexão transversal, em *Pinus spp.*, permitindo observar a transição entre os regimes elástico e plástico, bem como a resiliência do sistema estrutural antes do colapso definitivo.

Figura 4.4: Gráfico Força – Deslocamento, obtido nos ensaios de flexão transversal para a madeira de *Pinus spp.*



Fonte: Autor, 2026

A análise das curvas de força-deslocamento para o *Pinus spp.* no ensaio de flexão transversal revela um comportamento mecânico marcado por uma fase elástica linear bem definida, seguida por uma zona de degradação de rigidez progressiva. As cargas de pico concentram-se predominantemente entre 35 e 50 kN, com deslocamentos máximos que apresentam elevada amplitude, variando de 4 mm até ultrapassar 10 mm em amostras específicas.

A morfologia das curvas indica uma capacidade de redistribuição de tensões internas considerável antes da ruptura. Diferente do comportamento observado nos ensaios de compressão por cisalhamento, a flexão transversal no *Pinus spp.* exibe patamares de “pseudo-ductilidade”. Amostras como o CP8 e o CP12 demonstram que, mesmo após a ocorrência de fissuras iniciais (caracterizadas por pequenas oscilações na força), o painel mantém a capacidade de sustentar carga com grandes incrementos de deslocamento. Para o projeto estrutural, isso implica que o material oferece um

aviso prévio ao colapso sob este tipo de carregamento, fator essencial para a segurança em estados limites últimos.

Em síntese, a fenomenologia observada pode ser atribuída à interação entre: o mecanismo de cisalhamento rolante mobilizado na flexão fora do plano; a heterogeneidade anatômica da espécie; e os efeitos da geometria de ensaio e ação composta das lamelas.

Quanto ao primeiro mecanismo, a flexão fora do plano de painéis MLCC induz tensões de cisalhamento rolante nos planos perpendiculares às fibras das camadas transversais, em decorrência da orientação ortogonal entre lamelas adjacentes (Ehrhart; Brandner, 2018). Em ensaios de flexão, podem coexistir ruptura por cisalhamento rolante, falha na linha de cola e modos mistos (Ruan; Xiong; Chen, 2019), e a degradação associada ao cisalhamento rolante pode ser interpretada como um processo de dano acumulado, cuja evolução depende do nível e da duração da solicitação (Li; Lam, 2016). Essa interpretação decorre de ensaios de fadiga de baixo ciclo e, portanto, deve ser transposta com cautela para ensaios monotônicos de flexão. Assim, as quedas de carga observadas em degraus são compatíveis com a iniciação e propagação sucessiva de dano, incluindo expansão de fissuras por cisalhamento rolante, fissuração secundária e, eventualmente, descolamento interfacial. Essa progressão de fratura não foi identificada nos ensaios de cisalhamento por compressão realizados, nas condições e pelo método de observação adotados neste estudo.

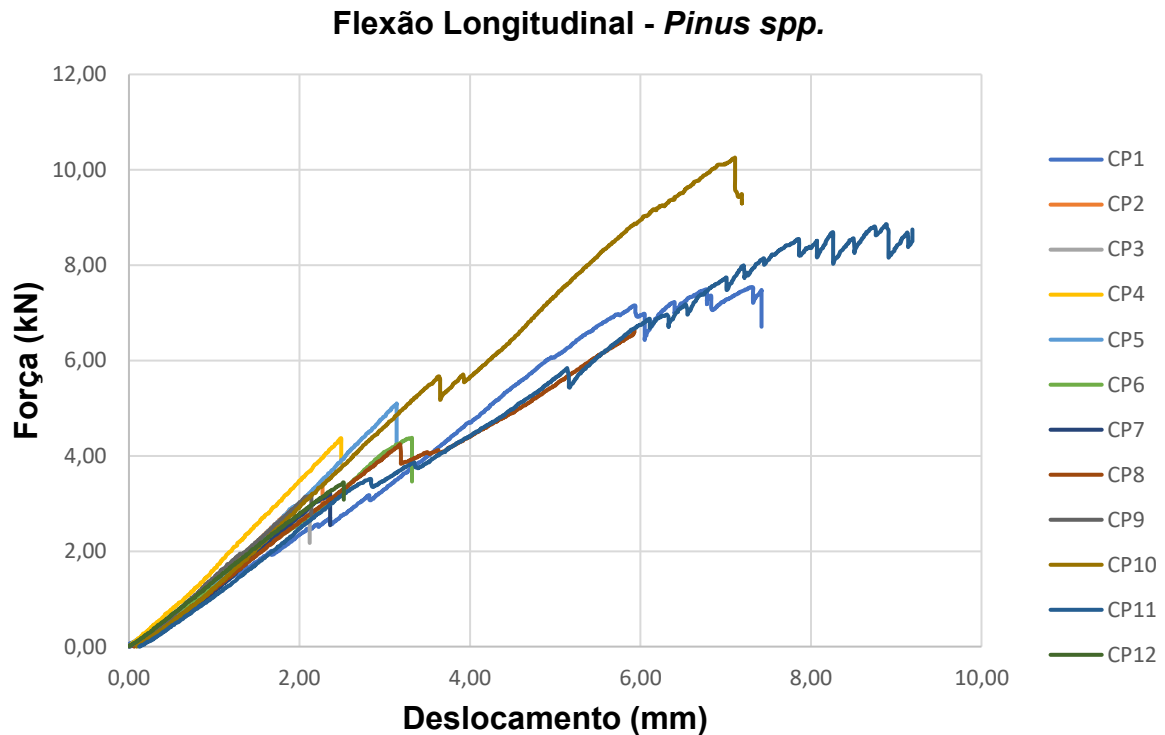
Quanto à influência da anatomia da espécie, em espécies de *Pinus* investigadas, a alternância entre lenho inicial e lenho tardio introduz heterogeneidade local de densidade, estrutura celular e propriedades mecânicas. Em *Pinus sylvestris*, por exemplo, o lenho tardio apresentou resistência e módulo de elasticidade em flexão substancialmente maiores que os do lenho inicial (Büyüksarı; As; Dündar, 2017). Além disso, Mania e Nowicki (2020), observaram valores menores de dureza e de módulo de elasticidade reduzido nas paredes celulares do lenho juvenil do que no lenho adulto, indicando uma menor rigidez local da parede celular para o *Pinus sylvestris*. Esses resultados indicam menor rigidez local da parede celular na madeira juvenil. Assim, é mecanicamente consistente interpretar que deformações localizadas tendam a concentrar-se nas regiões de menor rigidez; contudo, essa relação deve ser entendida como uma inferência microestrutural, pois os estudos citados não mediram diretamente a distribuição de deformações em painéis MLCC. As diferenças entre

lenho inicial e tardio não decorrem apenas da densidade: as propriedades da parede celular e o ângulo das fibras também contribuem para a rigidez (Krauss et al., 2011). A variação radial entre madeira juvenil e adulta constitui uma fonte adicional de dispersão: em *Pinus taeda*, a madeira juvenil apresentou menor resistência e rigidez, além de maior variabilidade, que a madeira adulta (Ballarin; Palma, 2003).

Por fim, quanto à ação composta e a geometria de ensaio, a configuração de flexão transversal não reproduz um estado de cisalhamento puro: as lamelas longitudinais participam do transporte de carga e a distribuição de tensões depende da rigidez local das lamelas e da arquitetura do painel. Essa ação de sistema pode modificar o módulo, a resistência e o modo de falha em cisalhamento rolante (Ehrhart; Brandner, 2018). Portanto, o ensaio de flexão costuma indicar uma resistência maior do que o ensaio de cisalhamento por compressão (Ruan; Xiong; Chen, 2019). Contudo, esse valor mais alto não reflete a resistência real e própria da madeira ao cisalhamento, mas sim a forma como o painel responde a esse tipo de carregamento.

Diferentemente da resposta observada no ensaio de flexão transversal, onde a orientação das lamelas externas favorece uma maior rigidez aparente, o ensaio de flexão longitudinal submete a camada de alma (central) a um estado de tensões de flexão que exacerba a fragilidade intrínseca da madeira de *Pinus spp.* Esta configuração experimental é crítica para a compreensão do comportamento de vigas e lajes de CLT, onde a camada transversal deve resistir a tensões tangenciais elevadas sem o suporte mecânico de uma orientação favorável das fibras externas. A Figura 4.5 apresenta as curvas força-deslocamento para as amostras de *Pinus spp.* sob flexão (longitudinal), revelando uma sensível redução na capacidade de carga e um perfil de ruptura marcado por instabilidades progressivas.

Figura 4.5: Gráfico Força – Deslocamento, obtido nos ensaios de flexão longitudinal para a madeira de *Pinus spp.*



Fonte: Autor, 2026.

Os resultados expostos na Figura 4.5 evidenciam um comportamento mecânico substancialmente inferior em comparação aos ensaios de compressão e flexão transversal. As cargas máximas de ruptura apresentaram uma dispersão significativa, situando-se majoritariamente entre 3 kN e 9 kN, com uma única amostra atingindo o patamar de 10 kN. Este desempenho é ratificado pela posterior análise estatística de Mann-Whitney, que identificou a flexão longitudinal como a configuração de menor resistência para o *Pinus. spp.* com uma mediana de apenas 0,39 MPa.

Observa-se nas trajetórias de carregamento, uma série de quedas abruptas de carga, seguidas de tentativas de recuperação. Esse padrão indica falhas sucessivas, sugerindo que a ruptura nesta configuração não é um evento único, mas sim um processo de degradação progressiva. Esse comportamento também é encontrado em ensaios de fadiga de baixo ciclo em painéis MLCC (Li; Lam, 2016).

O deslocamento total atingido pelas amostras chegou a ultrapassar 7 milímetros em alguns casos, o que, aliado às baixas cargas, caracteriza uma rigidez ao cisalhamento extremamente reduzida nesta direção. Tal comportamento reforça a necessidade de se considerar fatores de correção severos no dimensionamento de

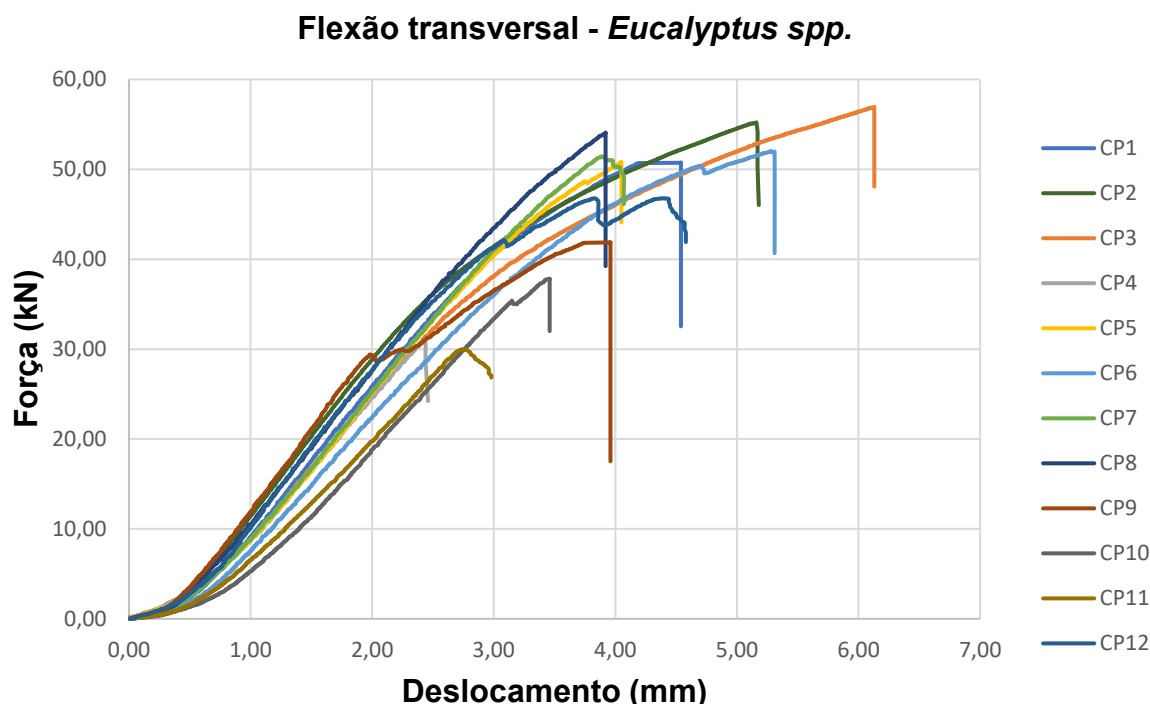
flechas para elementos CLT solicitados majoritariamente nesta direção.

Na configuração de flexão longitudinal o travamento mecânico proporcionado pela orientação longitudinal das fibras nas camadas adjacentes não ocorre de forma tão eficaz quanto na flexão transversal. A menor resistência a flexão para a configuração longitudinal é esperada, visto que a configuração transversal possui duas lamelas que resistem predominantemente à flexão, enquanto a longitudinal possui apenas uma (He; Sun; Li, 2018).

Li et al., (2020) em painéis de MLCC produzidos com a conífera *Australian Radiata Pine* encontrou resultados similares a este estudo, onde a configuração longitudinal apresentou aproximadamente 20% da resistência da transversal. Já (He; Sun; Li, 2018), em painéis produzidos com a conífera *Canadian Hemlock*, a configuração longitudinal desempenhou bem melhor em relação a transversal, apresentando cerca de 50% da resistência da direção mais resistente.

Diferentemente da fragilidade acentuada e dos baixos patamares de carga observados no ensaio de flexão longitudinal para o *Pinus. spp.*, a transição para a análise de flexão transversal no *Eucalyptus spp.* revela uma resposta mecânica substancialmente mais robusta. Esta configuração experimental, que mobiliza a rigidez das camadas externas de forma a confinar a deformação por cisalhamento rolante na camada interna, evidencia o potencial estrutural das folhosas de maior densidade na composição de painéis MLCC. A Figura 4.6 detalha o comportamento reológico dos corpos de prova, permitindo correlacionar a superioridade estatística da resistência mediana desta espécie com a morfologia de suas curvas de carregamento.

Figura 4.6: Gráfico Força – Deslocamento, obtido nos ensaios de flexão transversal para a madeira de *Eucalyptus spp.*



Fonte: Autor, 2026.

Os perfis força-deslocamento obtidos para o *Eucalyptus. spp.* na configuração de flexão transversal confirmam a dominância estatística (apresentada na seção 4.5) desta espécie em comparação aos ensaios de cisalhamento direto e flexão longitudinal. As cargas de ruptura oscilaram majoritariamente entre 40 e 55 kN, com o CP3 atingindo o ápice próximo a 57 kN.

Observa-se uma elevada rigidez elástica inicial, representada pela inclinação acentuada e uniforme das curvas. O deslocamento no ponto de carga máxima concentrou-se no intervalo de 3,5 a 5,5 mm, indicando uma estrutura mais rígida e menos deformável que o *Pinus spp.* para a mesma solicitação

A trajetória de descarga após o pico é predominantemente frágil e abrupta em quase todas as amostras. Diferente das quedas sucessivas em escada vistas nos ensaios de flexão das coníferas, o *Eucalyptus spp.* tende a sustentar o carregamento de forma linear até que o colapso por cisalhamento rolante ou flexão ocorra subitamente, sem aviso prévio de plastificação extensiva.

As quedas pós-pico observadas nas curvas fornecidas recomendam que a calibração do modelo constitutivo e dos valores de cálculo considere uma resposta pós-fissuração limitada; e a literatura experimental também descreve falhas por

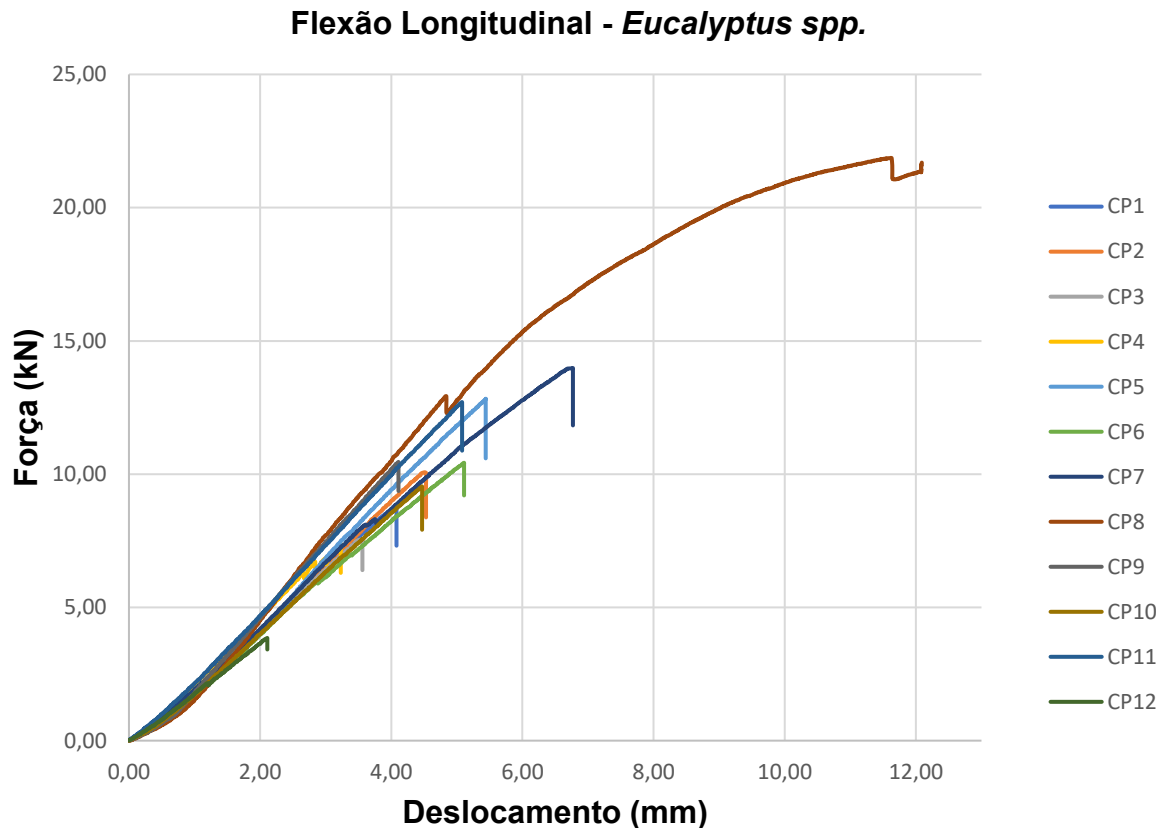
cisalhamento rolante como abruptas e frágeis (Aicher; Christian; Hirsch, 2016; Li, 2017).

A elevada densidade aparente do *Eucalyptus spp.* pode contribuir para uma maior rigidez ao cisalhamento no plano radial–tangencial, mas não deve ser tomada isoladamente como sinônimo de um melhor desempenho ao cisalhamento rolante. Bader; Eberhardsteiner; De Borst, (2015), estudaram dez folhosas, e encontraram que a densidade de massa foi a característica microestrutural dominante da rigidez ao cisalhamento, no plano radial–tangencial, contudo, também importaram o teor de raios, o teor de fibras e a porosidade. Além disso, num estudo da folhosa *Fagus Sylvatica*, a densidade apresentou correlação muito fraca com o módulo de cisalhamento rolante e nenhuma influência detectável sobre a resistência ao cisalhamento rolante (Aicher; Christian; Hirsch, 2016), o que reforça a necessidade de medir diretamente o desempenho do *Eucalyptus* do lote avaliado.

Fatores morfológicos também apresentam grande influência na resistência ao cisalhamento rolante, como as células radiais (raios), que interceptam o plano Radial-Tangencial, onde o cisalhamento rolante atua, e sua influência é dependente da espécie. Nos estudos de Bader; Eberhardsteiner; De Borst, 2015, foi encontrado que os raios atuam como elementos radiais de reforço no plano Radial-Tangencial, promovendo o travamento da estrutura contra o deslizamento das fibras. A madeira de *Eucalyptus spp.* como sendo uma folhosa de porosidade difusa, se aproveita desse fator de aumento de resistência.

Concluída a análise da flexão transversal, onde a interação entre as camadas e a elevada densidade do *Eucalyptus spp.* resultaram em patamares de resistência e rigidez elevados, esta seção aborda o comportamento do material sob flexão longitudinal. A Figura 4.7 ilustra as curvas força – deslocamento para as amostras de *Eucalyptus spp.*, servindo como subsídio visual para interpretar a redução drástica de desempenho quando comparada à configuração transversal.

Figura 4.7: Gráfico Força – Deslocamento, obtido nos ensaios de flexão longitudinal para a madeira de *Eucalyptus spp.*



Fonte: Autor, 2026.

A resposta mecânica do *Eucalyptus. spp.* em flexão longitudinal revela um decréscimo significativo na capacidade de suporte de carga em relação à flexão transversal, com a maioria das rupturas ocorrendo em um intervalo de força entre 7,5 e 14 kN.

As curvas apresentam uma fase elástica linear inicial com inclinações homogêneas, indicando uma rigidez estável, embora inferior à flexão transversal.

A maioria das amostras exibiu rupturas bruscas, caracterizadas por uma queda vertical na carga após o pico. Notadamente, o corpo de prova CP8 divergiu do padrão do grupo, atingindo uma carga máxima superior a 21 kN e demonstrando uma ductilidade excepcional com deslocamento próximo a 12 mm.

Os resultados reforçam que a flexão longitudinal é o estado de solicitação mais crítico para o dimensionamento de componentes CLT expostos a cargas perpendiculares ao seu plano. A discrepância entre as curvas de força da flexão transversal para a longitudinal evidencia que o projetista não deve extrapolar o

desempenho da direção de maior resistência para a de menor.

Quando os painéis CLT são ensaiados à flexão longitudinal, as fibras das lamelas exteriores são orientadas perpendicularmente à direção do vão, portanto, as lamelas externas contribuem pouco para a resistência à flexão (He; Sun; Li, 2018).

Os corpos de prova de *Eucalyptus spp.* apresentam resistência superior ao *Pinus spp* na flexão longitudinal (média de 0,96 MPa vs. 0,47 MPa). O maior desempenho do painel de *Eucalyptus spp.* na direção secundária pode ser explicado, em primeiro lugar, pelas propriedades mecânicas superiores das lamelas empregadas, especialmente densidade e o módulo de elasticidade, que tendem a aumentar tanto a parcela resistente à flexão quanto a capacidade de resistir às deformações por cisalhamento rolante. Essa interpretação é compatível com Pereira e Calil Junior, (2019), que obtiveram maior resistência e rigidez em MLCC de *Eucalyptus urograndis* do que em MLCC de *Pinus taeda*, e atribuíram essa tendência às propriedades físico-mecânicas mais elevadas do *Eucalyptus* e à possível influência de nós no painel de *Pinus*.

Em suma, a convergência entre os resultados obtidos nesta pesquisa e os achados de Silva et al. (2023) ratifica que o gênero *Eucalyptus spp.* desenvolve rigidez e resistência ao cisalhamento rolante significativamente superiores às do *Pinus spp.* Adicionalmente, os parâmetros de resistência e rigidez determinados por meio dos ensaios de flexão aparentam ser superiores àqueles derivados dos ensaios de compressão normativa, consolidando metodologia de flexão como a mais confiável e adequada para a predição das capacidades de carga ao cisalhamento rolante. Como implicação prática do bom desempenho da madeira de folhosas, valida-se o preceito de Aicher, Christian e Hirsch (2016) de que a utilização estratégica de madeiras de folhosas nas lamelas transversais atua como um mecanismo eficiente de otimização estrutural. Esse arranjo pode promover um incremento substancial no desempenho ao cisalhamento rolante, principalmente quando este se configure como o esforço governante da capacidade de carga do painel engenheirado.

4.4 ANÁLISE VISUAL DE FALHA

A caracterização mecânica de painéis de CLT exige, além da quantificação numérica das propriedades de resistência e rigidez do material, uma análise qualitativa pormenorizada da fenomenologia da ruptura. A complexidade ortotrópica da madeira e a configuração estratificada dos painéis podem induzir modos de falha distintos do cisalhamento rolante puro, influenciados por fatores como a qualidade da interface colada, a anatomia da espécie lenhosa e a distribuição de tensões inerentes a cada configuração de ensaio.

Nesta seção, apresenta-se a caracterização macroscópica dos modos de falha observados após o colapso estrutural das amostras de *Eucalyptus spp.* e *Pinus spp.*, submetidas aos ensaios de cisalhamento por compressão e flexão a três pontos (transversal e longitudinal). O objetivo primordial desta análise visual é validar a eficácia dos métodos experimentais em isolar o mecanismo de cisalhamento rolante nas camadas centrais, correlacionando o comportamento físico observado com as discrepâncias identificadas na análise estatística dos resultados. A Figura 4.8 apresenta os modos de falha encontrados nos ensaios e a Tabela 4.4 mostra o resumo da análise visual realizada.

Figura 4.8: Modos de falha considerados na análise: A) Cisalhamento rolante + Flexão; B) Flexão + delaminação; C) Cisalhamento rolante puro (flexão); D) Cisalhamento rolante + delaminação; E) Cisalhamento rolante puro (compressão); F) Cisalhamento rolante + delaminação.



Fonte: Autor, 2026.

Tabela 4.4: Resumo da análise visual da fenomenologia de falha

Grupo experimental	N	Modo de falha predominante	Frequência	Modo de falha secundário	Frequência
Cisalhamento por compressão (<i>Eucalyptus spp.</i>)	12	Cisalhamento rolante + Delaminação	11	Cisalhamento rolante puro	1
Cisalhamento por compressão (<i>Pinus spp.</i>)	12	Cisalhamento rolante puro	9	Cisalhamento rolante + Delaminação	3
Flexão transversal (<i>Pinus spp.</i>)	12	Cisalhamento rolante puro	10	Cisalhamento rolante + Flexão	2
Flexão longitudinal (<i>Pinus spp.</i>)	12	Flexão	11	Flexão + Delaminação	1
Flexão transversal (<i>Eucalyptus spp.</i>)	12	Cisalhamento rolante puro	8	Cisalhamento rolante + Flexão; Cisalhamento rolante + Delaminação	1; 3
Flexão longitudinal (<i>Eucalyptus spp.</i>)	12	Flexão	10	Flexão + Delaminação	2

Fonte: Autor, 2025.

Os resultados da análise visual, revelam que o ensaio de cisalhamento por compressão demonstrou significativa eficácia na indução do cisalhamento rolante, embora com manifestações morfológicas distintas entre as espécies. Para a espécie de *Pinus spp.*, o modo predominante foi o cisalhamento rolante puro (verificado em 9 das 12 amostras), evidenciando o rolamento efetivo das fibras na camada central. Já no *Eucalyptus spp.*, observou-se uma associação sistemática entre o cisalhamento rolante e a delaminação da linha de cola (11 de 12 amostras). Este fenômeno indica que a elevada rigidez e densidade do *Eucalyptus spp.* geram tensões cisalhantes severas na interface colada que competem com a resistência ao rolamento das fibras, indicando que o colapso nesta espécie pode ser influenciado pelo desempenho do sistema de colagem, ou pela maior fragilidade da zona de transição entre camadas.

Essa dualidade de comportamento entre coníferas e folhosas sob compressão foi observada em investigações similares. Nos ensaios de compressão modificada conduzidos por Cao et al. (2019) com coníferas, 100% dos corpos de prova manifestaram falhas por cisalhamento rolante puro, validando a assinatura de ruptura observada no *Pinus spp.* deste trabalho. Por outro lado, avaliando painéis de CLT manufaturados com *Eucalyptus Nitens*, Ettelaei et al. (2022) reportaram um panorama análogo ao desta pesquisa: embora o cisalhamento rolante na lamela transversal tenha sido o modo primário, a combinação com a delaminação de interface despontou como o principal mecanismo secundário de colapso.

A suscetibilidade das folhosas à delaminação interfacial é discutida por Das et al. (2023), que apontam a elevada densidade da madeira como um fator restritivo à penetração profunda do adesivo, sugerindo que essa fragilidade de interface pode ser mitigada em âmbito fabril por meio do incremento da gramatura de resina ou da pressão de prensagem. Adicionalmente, Kumar et al. (2023) alertam que a pureza do modo de falha na compressão é indexada pela relação de aspecto (*Aspect Ratio*) do painel; geometrias curtas e robustas (como as deste trabalho) tendem a induzir picos de tensão que migram o plano de ruptura para a linha de colagem, gerando linhas únicas de fratura, enquanto relações de aspeto mais esbeltas favorecem falhas progressivas e puras por cisalhamento nas fibras da madeira.

Nos ensaios de flexão, a configuração transversal apresentou o melhor isolamento do efeito de cisalhamento rolante como mecanismo principal de falha em ambas as espécies, registrando índices de eficiência de 10 em 12 amostras para o *Pinus spp.* e 8 em 12 para o *Eucalyptus spp.* Contudo, a identificação de modos secundários envolvendo a tração por flexão na face inferior do Eucalipto reforça a premissa de que o ensaio flexural também submete a seção mista a um estado complexo de tensões combinadas. As magnitudes superiores de resistência e rigidez observadas na flexão transversal decorrem, fundamentalmente, do fato de que a ruptura final por cisalhamento rolante só se estabelece após o sistema composto ter suportado cargas elevadas que mobilizam mecanismos concorrentes de resistência interna (efeito sanduíche), consolidando essa matriz experimental como uma metodologia fidedigna para a predição da capacidade de carga do painel composto.

O perfil de distribuição de falhas observado na flexão transversal converge com o mapeamento experimental de Silva et al. (2023). Os autores constataram que o *Pinus elliottii* concentrou 77% de suas rupturas por cisalhamento rolante puro, ao

passo que o *Eucalyptus grandis* exibiu uma taxa inferior (64%), manifestando maior capacidade de deformação plástica e predisposição a falhas associadas. Essa fenomenologia de falha mista em folhosas foi confirmada por Das et al. (2023), que identificaram a combinação "cisalhamento rolante + delaminação" como o padrão normativo de colapso em folhosas sob flexão transversal. Para a madeira de *Pinus spp.*, Cao et al. (2019) encontraram uma fenomenologia de falha muito semelhante a este trabalho, cerca de 89% dos corpos de prova sofreram de falhas cisalhantes e 11% de tração flexural.

Essa diferenciação do fenômeno possui raiz anatômica: conforme mapeado por Bidakov et al. (2020), as coníferas apresentam planos de fraqueza previsíveis nas transições entre o lenho inicial e tardio dentro dos anéis de crescimento, facilitando a homogeneidade e a reprodutibilidade do cisalhamento rolante puro, enquanto o arranjo celular difuso das folhosas dispersa o fluxo de tensões, reduzindo a previsibilidade da falha isolada por cisalhamento rolante. Metodologicamente, Kawaai et al. (2023) sintetizam que essa matriz de falhas tripla (cisalhamento rolante, delaminação interfacial e tração/flexão na lamela inferior) é governada pela esbeltez da viga, demonstrando que elementos ensaiados sob vãos de corte mais curtos tendem a apresentar uma maior porcentagem de falhas por cisalhamento rolante.

Por fim, a configuração de flexão com a orientação das lamelas externas paralelas ao comprimento (flexão longitudinal) confirmou a transição radical do modo de falha predominante do cisalhamento rolante para a tração pura por flexão em ambas as espécies, invalidando esta metodologia para a caracterização das capacidades de carga ao cisalhamento rolante. A elevada variabilidade observada na resistência mecânica residual do eucalipto (CV de 41,30%) e do pinus (CV de 47,27%) denota que defeitos anatômicos naturais da madeira e descontinuidades na linha de colagem exercem uma influência soberana e destrutiva quando o painel composto é solicitado em seu eixo de menor inércia eficaz a flexão.

Esse comportamento de colapso longitudinal pode ser explicado pela sustentação teórica de He, Sun e Li (2018), em que as propriedades flexurais do MLCC são governadas predominantemente pela capacidade de carga das lamelas inferior e central. Em seus ensaios de flexão longitudinal, 100% das rupturas ocorreram por tração na lamela inferior, padrão que induz uma fratura marcadamente frágil e abrupta assim que a força máxima de pico é atingida, sem o desenvolvimento de patamares de plasticidade. Essa vulnerabilidade das lamelas longitudinais

inferiores é complementada por He et al. (2020), que identificaram as emendas do tipo *finger-joint* localizadas no centro do vão como os elos mais frágeis do sistema estrutural, antecipando o colapso por tração e mascarando qualquer capacidade residual de escorregamento das fibras nas lamelas transversais do painel.

Em suma, a análise visual e fenomenológica ratifica o ensaio de flexão transversal de três pontos como o método mais fidedigno para capturar a resposta elasto-mecânica global do sistema sob a ação do cisalhamento rolante. Em contrapartida, o ensaio de cisalhamento por compressão, embora exiba de forma frequente o modo de falha desejado ou a sua combinação com a delaminação interfacial, este sofre a interferência direta de componentes de tensões normais e restrições cinemáticas de borda que mascaram a determinação purificada dos valores intrínsecos de resistência (f_{vt}) e módulo de cisalhamento rolante (G_{vt}) do material engenheirado.

4.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

A interpretação fidedigna das propriedades de resistência e rigidez obtidas experimentalmente requer um tratamento estatístico rigoroso, capaz de validar as inferências mecânicas e quantificar as disparidades entre os métodos de ensaio e espécies utilizadas.

Esta seção dedica-se à sistematização analítica dos resultados, iniciando pela verificação dos pressupostos distribucionais, via teste de Shapiro-Wilk, etapa essencial para fundamentar a escolha entre métodos inferenciais paramétricos e não paramétricos.

De modo a avaliar a existência de diferenças estatisticamente significativas entre as espécies e as configurações de carregamento, aplicou-se o teste de hipótese U de Mann-Whitney, garantindo a robustez da comparação frente às variabilidades intrínsecas do material engenheirado.

A análise de concordância de Bland-Altman foi empregada como ferramenta central para verificar a intercambiabilidade entre os métodos de flexão e cisalhamento por compressão, permitindo a identificação de vieses sistemáticos e limites de concordância estrutural, provendo o suporte estatístico necessário para a validação da fenomenologia do cisalhamento rolante discutida ao longo deste trabalho.

4.5.1 Testes de normalidade de *Shapiro-Wilk*

A confiabilidade das inferências estatísticas em ensaios de caracterização mecânica de materiais ortotrópicos, depende intrinsecamente da natureza da distribuição dos dados amostrais. Para assegurar que os parâmetros de tendência central e dispersão calculados representem adequadamente as propriedades de resistência (f_{vt}) e rigidez (G_{vt}) das peças de CLT, os resultados foram submetidos ao teste de normalidade de *Shapiro Wilk*.

A análise partiu da hipótese nula (H_0) que os dados seguem uma distribuição normal, adotando-se um nível de significância de 5%. A validação da hipótese de normalidade é essencial não apenas para a caracterização descritiva, mas também para fundamentar a escolha das demais ferramentas estatísticas utilizadas neste trabalho. A Tabela 4.5 mostra os resultados obtidos para o teste de normalidade de Shapiro-Wilk.

Tabela 4.5: Resumo dos resultados do teste de normalidade de Shapiro Wilk

Grupo experimental	N	Estatística (W)	P-valor	Aderência a distribuição Normal
Cisalhamento Pinus (f_{vt})	12	0,898	0,151	Sim
Cisalhamento Pinus (G_{vt})	12	0,856	0,043	Não
Cisalhamento Eucalipto (f_{vt})	12	0,927	0,348	Sim
Cisalhamento Eucalipto (G_{vt})	12	0,867	0,059	Sim
Flexão Transversal Pinus (f_{vt})	12	0,960	0,788	Sim
Flexão Transversal Pinus (G_{vt})	12	0,966	0,865	Sim
Flexão Longitudinal Pinus (f_{vt})	12	0,858	0,046	Não
Flexão Longitudinal Pinus (G_{vt})	12	0,965	0,858	Sim
Flexão Transversal Eucalipto (f_{vt})	12	0,878	0,082	Sim
Flexão Transversal Eucalipto (G_{vt})	12	0,972	0,927	Sim
Flexão Longitudinal Eucalipto (f_{vt})	12	0,904	0,181	Sim
Flexão Longitudinal Eucalipto (G_{vt})	12	0,901	0,165	Sim

Fonte: Autor, 2026.

Os resultados do teste de Shapiro-Wilk indicam que a maioria das variáveis analisadas apresentam aderência à normalidade, com p-valores significativamente superiores ao limite crítico de 0,05. Destaca-se a maior homogeneidade dos dados para o *Pinus spp.* que apresentou p-valores constantemente maiores que os pares

comparáveis da espécie de *Eucalyptus spp.*, o que sugere um comportamento mecânico mais previsível e consistente para a madeira de *Pinus spp.* sob diferentes estados de tensão.

Entretanto, dois casos específicos apresentaram violação da hipótese de normalidade, sendo o módulo de rigidez (G_{vt}) do *Eucalyptus spp.* em compressão, e a resistência (f_{vt}) do *Pinus spp.* em flexão na configuração longitudinal. O primeiro caso é a divergência mais severa observada. A causa provável reside na complexidade anatômica da espécie, e na elevada frequência de falhas combinadas (cisalhamento rolante + delaminação) registrada para este grupo. A ocorrência de delaminação introduz uma variabilidade extrema na leitura das deformações, gerando dados discrepantes que afastam a amostra da curva de Gauss. O Segundo caso possui um valor de p ligeiramente abaixo de 0,05, o que indica um desvio moderado. Como esta configuração de ensaio acabou resultando em mecanismos de falha principais por flexão e não o cisalhamento rolante, a transição entre os mecanismos de ruptura pode gerar uma dispersão não uniforme dos valores de ruptura.

A aderência à normalidade em grande parte das variáveis analisadas ratifica a robustez das inferências estatísticas subsequentes, fundamentando a aplicação de métodos paramétricos com elevado grau de fidedignidade. Todavia, para os grupos que apresentaram desvios significativos da distribuição gaussiana, a sensibilidade da média aritmética a valores extremos compromete a sua capacidade descritiva. Nessas circunstâncias, a mediana é adotada como o estimador de tendência central mais robusto, minimizando distorções causadas pela assimetria dos dados. Por conseguinte, para o teste de hipóteses, optou-se pelo teste não paramétrico de Mann-Whitney U para todas as comparações, assegurando a integridade da análise comparativa frente à heterogeneidade de algumas distribuições.

4.5.2 Testes de hipótese U de *Mann-Whitney*

Dando prosseguimento ao tratamento estatístico dos dados, esta seção apresenta a análise inferencial conduzida por meio do teste de hipótese de Mann-Whitney U. A decisão pela aplicação desta técnica não paramétrica fundamenta-se nos resultados previamente discutidos do teste de *Shapiro-Wilk*, os quais evidenciaram que grupos experimentais específicos, tais como o módulo de

cisalhamento rolante do *Eucalyptus spp.* no ensaio de compressão e a resistência do *Pinus spp.* no ensaio de flexão longitudinal, não apresentaram aderência a distribuição normal.

O objetivo primordial desta análise é investigar se as discrepâncias observadas entre as medianas de resistência e rigidez das amostras de *Eucalyptus spp.* e *Pinus spp.*, bem como as variações decorrentes dos diferentes métodos de ensaio (cisalhamento por compressão e flexão de três pontos), e se estas apresentam significância estatística ou se são meramente atribuíveis a variabilidade natural do material biológico e engenheirado.

Adotando-se um nível de significância de 0,05, os testes de Mann-Whitney U permitem validar as comparações entre as propriedades de cisalhamento rolante, provendo o suporte matemático-estatístico necessário para corroborar as discussões fenomenológicas sobre o comportamento mecânico e os modos de falha observados nos painéis de MLCC.

4.5.2.1 Comparação da resistência (f_{vt}) entre ensaios

Este teste foi estruturado para comparar, de forma pareada, as diferentes configurações experimentais para determinação da resistência ao cisalhamento rolante, com as espécies de *Pinus spp.* e *Eucalyptus spp.* A Tabela 4.6 sintetiza os resultados deste teste de hipótese.

Tabela 4.6: Testes de U de Mann-Whitney para a resistência ao cisalhamento rolante entre ensaios

Ensaio (f_{vt})	Grupo 1 (Mediana)	Grupo 2 (Mediana)	p-valor	Resultado
	Cisalhamento Pinus (2,42 MPa)	Flexão Transversal Pinus (4,09 MPa)	<0,001	Estatisticamente desiguais , sendo o Grupo 2 dominante
	Cisalhamento Pinus (2,42 MPa)	Flexão Longitudinal Pinus (0,39 MPa)	<0,001	Estatisticamente desiguais , sendo o Grupo 1 dominante
	Flexão Transversal Pinus (4,09 MPa)	Flexão Longitudinal Pinus (0,39 MPa)	<0,001	Estatisticamente desiguais , sendo o Grupo 1 dominante
	Cisalhamento Eucalipto (3,27 MPa)	Flexão Transversal Eucalipto (4,51 MPa)	0,005	Estatisticamente desiguais , sendo o Grupo 2 dominante
	Cisalhamento Eucalipto (3,27 MPa)	Flexão Longitudinal Eucalipto (0,91 MPa)	<0,001	Estatisticamente desiguais , sendo o Grupo 1 dominante
	Flexão Transversal Eucalipto (4,51 MPa)	Flexão Longitudinal Eucalipto (0,91 MPa)	<0,001	Estatisticamente desiguais , sendo o Grupo 1 dominante

Fonte: Autor, 2025.

A análise estatística inferencial, conduzida por meio dos testes de hipótese de Mann-Whitney, evidenciou que, em todas as comparações pareadas, o p-valor estabeleceu-se abaixo do nível de significância de 5% ($p < 0,05$), resultando na rejeição convicta da hipótese nula de igualdade entre as medianas. Esses achados ratificam, com rigor estatístico, que a configuração de ensaio empregada exerce uma influência determinante na magnitude da resistência aferida, caracterizando as respostas mecânicas dos grupos como heterogêneas e desiguais.

Em termos comparativos, o ensaio de flexão transversal consolidou os maiores patamares de mediana para ambas as espécies (*Pinus spp.*: 4,09 MPa; *Eucalyptus spp.*: 4,51 MPa), superando significativamente os valores derivados dos ensaios de cisalhamento por compressão convencional. Em contrapartida, a bateria de flexão longitudinal induziu os menores índices de resistência (0,39 MPa para o *Pinus spp.* e 0,91 MPa para o *Eucalyptus spp.*), desenhando uma assimetria marcante em relação às demais configurações.

A dominância estatística da flexão transversal indica que essa metodologia mobiliza mecanismos secundários de rigidez e confinamento geométrico (efeito sanduíche) que incrementam a resistência aparente ao cisalhamento rolante quando confrontada com o ensaio de compressão direta. Do ponto de vista prático de projeto, essa disparidade impõe que a seleção dos parâmetros de cálculo para o dimensionamento de componentes estruturais seja criteriosa: a adoção irrestrita dos coeficientes superestimados da flexão transversal pode comprometer a segurança, ao passo que o emprego exclusivo dos dados de compressão normativa pode penalizar o material, induzindo a um superdimensionamento oneroso e a uma robustez estrutural desnecessária para a edificação.

As variações de resistência validadas pelo teste de Mann-Whitney encontram justificativa teórica na natureza anisotrópica da madeira e na distribuição de tensões multiaxiais de cada metodologia:

No ensaio de flexão longitudinal, a baixa resistência observada pode ser explicada pelo fato de que as camadas longitudinais (centrais) estão solicitadas principalmente em tração nas fibras inferiores e compressão nas fibras superiores devido ao carregamento de flexão. O colapso mecânico nessa orientação é precipitado pela fragilidade intrínseca às fibras sob tração paralela e pela presença de defeitos localizados, minimizando o efeito de conjunto e inviabilizando o

desenvolvimento pleno do esforço cortante no miolo transversal.

Na flexão transversal a ortogonalidade das camadas externas favorece um fluxo de tensões que distribui a carga de forma mais homogênea por toda a seção composta. Adicionalmente, as reações de apoio geram tensões de compressão normais às interfaces coladas, o que eleva o atrito inter lamelar e eleva a rigidez e a resistência aparente do corpo de prova ao cisalhamento rolante.

Apesar de as tendências metodológicas manterem-se consistentes para ambos os gêneros, o *Eucalyptus spp.* exibiu indicadores sistematicamente superiores ao *Pinus spp.* Essa assimetria associa-se à maior densidade básica e à morfologia microestrutural das fibras da folhosa, cujo espessamento de parede celular oferece uma barreira mecânica superior contra o colapso por flambagem e rolamento das células lenhosas sob tensões de cisalhamento planar.

Essa superioridade das folhosas frente às coníferas é amplamente investigada por Ehrhart e Brandner (2018) e Aicher, Christian e Hirsch (2016), os quais afirmam que a anatomia das madeiras duras assegura propriedades de cisalhamento rolante significativamente mais elevadas, consolidando-as como matérias-primas preferenciais para a otimização de painéis estruturais.

No que tange às divergências metodológicas, o cenário identificado nesta pesquisa expande as discussões propostas por Cao et al. (2019). Ao avaliarem o *Pinus spp.*, os referidos autores constataram que o ensaio de compressão modificado superou a flexão transversal (a qual forneceu resultados 13% a 31,2% menores), haja vista que a inclinação do aparato modificado introduz tensões normais confinantes que impedem a propagação de trincas. No presente trabalho, contudo, por ter sido utilizada a metodologia de compressão convencional (normatizada pela NBR 7190-7), observou-se uma inversão: os resultados da flexão transversal para o *Pinus spp.* foram cerca de 59% maiores que os da compressão, enquanto para o *Eucalyptus spp.* a flexão apresentou-se 30% maior. Evidencia-se, assim, que o ensaio de compressão modificada guarda maior equivalência escalar com os ensaios de flexão do que o aparato convencional estruturado sem inclinação.

Essa mecânica de confinamento e adensamento sob compressão é detalhada por He et al. (2020), que explicam que a estrutura cruzada da madeira lamelada colada cruzada restringe a expansão horizontal das lamelas sob compressão vertical, aprimorando a resistência limite do elemento proporcionalmente ao número de camadas. Concomitantemente, conforme sugerido por Kumar et al. (2023), a

aplicação direta da força de compressão induz um esmagamento localizado das células lenhosas que se traduz em uma não linearidade na curva força-deslocamento, promovendo um ganho substancial de ductilidade e capacidade de deformação permanente antes da ruptura do corpo de prova.

Apesar de os valores de resistência obtidos nesta pesquisa para os ensaios de cisalhamento por compressão convencional situarem-se abaixo daqueles extraídos via flexão transversal, ambos os gêneros botânicos superaram com folga os requisitos mínimos de desempenho estipulados pelas principais diretrizes internacionais. Os lotes de *Pinus spp.* e *Eucalyptus spp.* ultrapassaram o limite referencial de 1,1 MPa recomendado pela norma europeia EN 16351 (BSI, 2015), bem como o piso normativo de 0,5 MPa preconizado pela norma norte-americana PRG 320 (ANSI/APA, 2019), atestando a viabilidade técnica e a segurança estrutural de ambas as espécies para a manufatura de painéis comerciais de MLCC.

4.5.2.2 Comparação da rigidez ao cisalhamento rolante (G_{vt}) entre ensaios

Este teste permite ratificar se as variações observadas entre os módulos de rigidez decorrem de flutuações amostrais ou se representam diferenças metodológicas estatisticamente significantes, fundamentais para a calibração de modelos analíticos e de dimensionamento estrutural. A Tabela 4.7 sumariza os resultados obtidos para a rigidez entre ensaios.

Tabela 4.7: Testes de U de Mann-Whitney para a rigidez ao cisalhamento rolante entre ensaios

Ensaio (G_{vt})	Grupo 1 (Mediana)	Grupo 2 (Mediana)	p-valor	Resultado
	Cisalhamento Pinus (49,7 MPa)	Flexão Transversal Pinus (330,6 MPa)	<0,001	Estatisticamente desiguais , sendo o Grupo 2 dominante
	Cisalhamento Pinus (49,7 MPa)	Flexão Longitudinal Pinus (32,14 MPa)	0,033	Estatisticamente desiguais , sendo o Grupo 1 dominante
	Flexão Transversal Pinus (330,6 MPa)	Flexão Longitudinal Pinus (32,14 MPa)	<0,001	Estatisticamente desiguais , sendo o Grupo 1 dominante
	Cisalhamento Eucalipto (56,53 MPa)	Flexão Transversal Eucalipto (330 MPa)	<0,001	Estatisticamente desiguais , sendo o Grupo 2 dominante
	Cisalhamento Eucalipto (56,53 MPa)	Flexão Longitudinal Eucalipto (48,02 MPa)	0,024	Estatisticamente desiguais , sendo o Grupo 1 dominante
	Flexão Transversal Eucalipto (330 MPa)	Flexão Longitudinal Eucalipto (48,02 MPa)	<0,001	Estatisticamente desiguais , sendo o Grupo 1 dominante

Fonte: Autor, 2025.

Os resultados compilados na Tabela 4.7 revelam uma discrepância acentuada na rigidez ao cisalhamento rolante em função da configuração de ensaio adotada, com p-valores majoritariamente inferiores a 0,001. O indicador mais proeminente desse panorama é a dominância estatística da flexão transversal para ambas as espécies, registrando medianas de 330,6 MPa para o *Pinus spp.* e 330,0 MPa para o *Eucalyptus spp.* Esses valores situam-se em patamares significativamente superiores aos obtidos via cisalhamento por compressão direta, cujas medianas orbitaram entre 49,7 MPa e 56,53 MPa, e também aos valores obtidos via flexão longitudinal, cujas medianas se situaram entre 32,14 MPa e 48,02 MPa, respectivamente.

A existência de diferenças significativas em todos os pares confirma que a ambas as anatomias lenhosas reagiram de forma sensível e assimétrica às variações na orientação das tensões solicitantes de cada método experimental.

A elevada magnitude da rigidez aparente extraída do ensaio de flexão transversal decorre, primordialmente, da influência do módulo de elasticidade longitudinal das camadas externas. Embora esse efeito seja minimizado nas simplificações dos modelos matemáticos de cálculo, o travamento físico exercido pelas lamelas externas impõe uma restrição de deformação (efeito sanduíche) que retarda o efeito de cisalhamento rolante da lamela central, inflando o G_{vt} aparente do sistema composto.

Para o projeto de elementos estruturais de MLCC, a adoção direta de parâmetros de rigidez baseados puramente na flexão transversal, sem os devidos fatores de ajuste, exige cautela extrema: esse procedimento pode levar a uma subestimativa severa das flechas em serviço, comprometendo os estados limites de utilização, haja vista que a rigidez real intrínseca do plano material chega a ser dez vezes menor.

Sob essa ótica, ensaios de cisalhamento por compressão direta expõem o corpo de prova a deformações de acomodação do aparato e esmagamentos locais. Como esses deslocamentos excessivos reduzem a inclinação da curva força-deslocamento, o ensaio de compressão acaba gerando uma rigidez menor que pode não representar adequadamente o comportamento do CLT como um sistema estrutural de alta performance, confirmando a complexidade em se eleger um método universal para mensurar o G_{vt} .

Esse comportamento assimétrico entre as propriedades elasto-mecânicas e os métodos de ensaio encontra amparo e validação em investigações internacionais

e nacionais:

De acordo com Ehrhart e Brandner (2018), os valores de rigidez ao cisalhamento rolante são intrinsecamente proporcionais à densidade da madeira. Essa premissa teórica justifica o fato de o *Eucalyptus spp.* (mais denso) ter superado o *Pinus spp.* tanto em rigidez quanto em resistência em todas as configurações experimentais onde não foi detectada a equivalência estatística.

Conforme discutido por He et al. (2020), a estrutura cruzada do CLT restringe a expansão horizontal das lamelas centrais quando o conjunto é submetido a esforços verticais, aprimorando a resistência mecânica global do painel. Adicionalmente, Kumar et al. (2023) explicam que a aplicação de forças de compressão direta induz um efeito de esmagamento e adensamento celular localizado. Esse fenômeno manifesta-se como uma não linearidade gráfica que, embora deprima o cálculo do módulo elástico inicial, resulta em um incremento perceptível da ductilidade do corpo de prova antes do colapso.

É fundamental destacar que essa sensibilidade estatística drástica entre os métodos de ensaio afeta principalmente ao módulo de cisalhamento rolante (G_{vt}). Para a determinação da resistência ao cisalhamento rolante (f_{vt}), observou-se uma ordem de magnitude mais equivalente entre as configurações experimentais de cisalhamento por compressão e flexão transversal. Esse cenário converge com as evidências de Silva et al. (2023), indicando que, enquanto a rigidez elástica é altamente influenciada pelas condições de contorno e deformações diferenciais de cada aparato, a capacidade última de ruptura por cisalhamento rolante do material mantém-se mais consistente entre os diferentes métodos experimentais.

4.5.2.3 Comparação da resistência ao cisalhamento rolante (f_v) entre espécies

A investigação da influência do fator biológico sobre a resistência ao cisalhamento rolante foi conduzida mediante a aplicação do teste de Mann-Whitney U, comparando se as espécies de *Pinus spp.* e *Eucalyptus spp.* para cada configuração experimental. O objetivo fundamental deste teste foi determinar se as variações de resistência observadas são inerentes às propriedades físico-mecânicas de cada gênero botânico ou se as espécies apresentam comportamento mecânico equivalente sob determinadas condições de solicitação. A Tabela 4.8 sumariza os resultados para os testes de hipótese entre espécies.

Tabela 4.8: Testes de U de Mann-Whitney para a resistência ao cisalhamento rolante entre espécies

	Grupo 1 (Mediana)	Grupo 2 (Mediana)	p-valor	Resultado
Espécies (f_{vt})	Cisalhamento <i>Pinus spp.</i> (2,42 MPa)	Cisalhamento <i>Eucalyptus spp.</i> (3,27 MPa)	0,006	Estatisticamente desiguais , sendo o Grupo 2 dominante
	Flexão Transversal <i>Pinus spp.</i> (4,09 MPa)	Flexão Transversal <i>Eucalyptus spp.</i> (4,51 MPa)	0,347	Estatisticamente equivalentes
	Flexão Longitudinal <i>Pinus spp.</i> (0,39 MPa)	Flexão Longitudinal <i>Eucalyptus spp.</i> (0,91 MPa)	0,001	Estatisticamente desiguais , sendo o Grupo 2 dominante

Fonte: Autor, 2025.

A análise inferencial conduzida para avaliar o efeito da variável "espécie" revelou que a divergência elasto-mecânica entre a folhosa e a conífera é altamente dependente da configuração cinemática do ensaio. Nos ensaios de cisalhamento por compressão e de flexão longitudinal, o teste de Mann-Whitney apontou diferenças estatisticamente significantes ($p = 0,006$ e $p = 0,001$ respectivamente), com o *Eucalyptus spp.* superando consistentemente o *Pinus spp.* em magnitude de resistência (f_{vt}).

Contudo, um comportamento atípico foi mapeado no ensaio de flexão transversal: o teste revelou que as espécies são estatisticamente equivalentes ($p = 0,347$), apesar da existência de uma sutil flutuação nominal entre as suas medianas.

Essa equivalência estatística pontual sugere que, sob regimes de tensões mais elevados e vãos de corte curtos inerentes à flexão transversal de painéis, a diferenciação estritamente biológica dos tecidos lenhosos pode ser mitigada ou mascarada por fatores de contorno externos ao material, tais como a distribuição das tensões normais de confinamento nos apoios e a eficiência limite da interface adesiva.

Todavia, a dominância soberana do *Eucalyptus spp.* nas demais matrizes experimentais confirma que o gênero confere um incremento substancial de segurança para componentes de CLT solicitados a esforços tanto no plano quanto fora do plano dos painéis, pavimentando o caminho técnico para a especificação de seções transversais significativamente mais esbeltas e otimizadas em comparação ao uso clássico das coníferas.

As causas fundamentais para a superioridade mecânica do *Eucalyptus spp.* residem na sua densidade básica elevada e na especialização evolutiva de sua estrutura celular. Enquanto as coníferas possuem um lenho anatomicamente simples e homogêneo, composto majoritariamente por traqueídeos, que acumulam cumulativamente as funções de condução de seiva e sustentação, as folhosas exibem

uma divisão celular de trabalho mais complexa, segregando vasos específicos para a condução dos fluidos e fibras dedicadas exclusivamente à rigidez estrutural. A maior concentração de massa de parede celular por unidade de volume na folhosa expande a inércia microscópica do tecido, retardando o colapso por flambagem e rolamento das células quando solicitadas ao cisalhamento rolante.

Essa assimetria microestrutural e seu impacto no plano de ruptura são amplamente validados pela literatura macroestrutural, conforme preconizado por Ehrhart et al. (2015), é mandatório segregar o comportamento de folhosas com porosidade em anel daquelas com porosidade difusa. Espécies de porosidade difusa, como o *Eucalyptus spp.*, caracterizam-se por um perfil de massa específica razoavelmente homogêneo ao longo de toda a espessura dos anéis anuais, diferenciando-se da transição abrupta e fragilizada observada em coníferas.

Investigando a mecânica da ruptura, Côté e Hanna (1982) demonstraram que, no cisalhamento no plano radial-tangencial, o plano de fratura contorna preferencialmente os vasos de paredes mais delgadas do lenho juvenil. Nas folhosas de porosidade difusa, a dispersão uniforme e o diâmetro reduzido dos poros impedem a formação de uma zona de fraqueza contínua. Consequentemente, a fissura é forçada a propagar-se por uma matriz densa de fibras de alta resistência, explicando o ganho assinalado por Gui et al. (2020), onde a introdução de lamelas transversais de eucalipto impulsionou a capacidade portante global de painéis compostos de CLT. Em contrapartida, folhosas de porosidade em anel (como o Carvalho) tendem a replicar a fragilidade das coníferas, concentrando rupturas prematuras em sua faixa inicial porosa.

Adicionalmente aos elementos verticais de sustentação, os tecidos horizontais desempenham um papel crítico na estabilização do plano radial-tangencial, vetor exato onde atuam as tensões de cisalhamento rolante.

Os raios parenquimáticos (tecidos vivos) atuam mecanicamente como pinos ou elementos radiais de reforço dispostos perpendicularmente às fibras. Em folhosas de porosidade difusa, a robustez dessas estruturas promove um travamento geométrico que restringe o deslizamento recíproco das fibras longitudinais. Nas coníferas as estruturas radiais são anatomicamente menores e menos rígidas, fazendo com que a resistência ao corte rolante dependa quase inteiramente da matriz celular principal, cuja interface entre o lenho juvenil e o tardio atua como a zona de menor resistência mecânica da peça. (Bader; Eberhardsteiner; De Borst, 2015)

Esse modelo de falha explica por que a correlação entre a massa específica média e a resistência ao cisalhamento rolante costuma ser estatisticamente menos relevante para coníferas (Ehrhart et al., 2015; Aicher; Christian; Hirsch, 2016). Em espécies como o Abeto-falso (*Norway Spruce*), tanto o lenho inicial quanto o tardio mantêm densidades locais constantes ao longo dos anos (cerca de 300 kg/m³ e 900 a 1000 kg/m³, respectivamente). Como a espessura do lenho tardio varia pouco, as flutuações na massa específica média da peça decorrem do lenho inicial. Visto que a ruptura por cisalhamento rolante se instala invariavelmente na interface adjacente ao lenho inicial mais fraco, a densidade global média da conífera torna-se um indicador falho de sua capacidade portante, ao passo que nas folhosas a densidade correlaciona-se com mais significância a performance elástica (Ehrhart & Brandner, 2018).

Ainda, a validação estatística de que o eucalipto atinge patamares elevados de resistência abre precedência para o desenvolvimento de painéis de alta performance com a substituição parcial de insumos. Esse princípio assemelha-se aos testes de Aicher, Christian e Hirsch (2016) com o *European Beech Wood (Fagus sylvatica)*, onde a introdução da folhosa no miolo transversal sob compressão modificada elevou a resistência média para 5,5 MPa, superando com folga os limites das coníferas de referência.

Por fim, a atenuação das diferenças biológicas observada estritamente no ensaio de flexão transversal evoca a discussão sobre como defeitos geométricos isolados e variáveis de contorno modificam o comportamento aparente do material engenheirado.

Embora comumente classificados como defeitos redutores de resistência, os nós presentes nas lamelas cruzadas exercem uma função benéfica singular frente ao cisalhamento rolante. Conforme mapeado por Cao et al. (2019), a intrusão do nó atua como um pino natural que intercepta e trava a matriz celular adjacente. Esse travamento desvia o fluxo de tensões cortantes em direção à linha de cola, elevando a capacidade portante nominal do painel no plano transversal.

No contexto deste estudo, a equalização observada na flexão transversal sugere que a resistência da linha de cola e o esmagamento localizado por compressão perpendicular na zona dos apoios atuaram como fatores de homogeneização. Sob altas taxas de carregamento, esses mecanismos equalizaram o desempenho mecânico aparente, demonstrando que, em situações específicas de flexão de

painéis, a eficiência da engenharia do produto composto consegue compensar as assimetrias biológicas inerentes às matérias-primas isoladas.

4.5.2.4 Comparação da rigidez ao cisalhamento rolante (G_{vt}) entre espécies

Para investigar se a procedência botânica do material exerce influência significativa sobre a rigidez ao cisalhamento rolante, procedeu-se pela aplicação do teste de hipótese não paramétrico de Mann-Whitney U. O objetivo central desta análise foi determinar a viabilidade de generalização de parâmetros de rigidez ou a necessidade de especificações distintas para cada espécie em modelos de cálculo estrutural. A Tabela 4.9 revela os resultados obtidos para essa comparação.

Tabela 4.9: Testes de U de Mann-Whitney para a rigidez ao cisalhamento rolante entre espécies

	Grupo 1 (Mediana)	Grupo 2 (Mediana)	p-valor	Resultado
Espécies (G_{vt})	Cisalhamento <i>Pinus spp.</i> (49,7 MPa)	Cisalhamento <i>Eucalyptus spp.</i> (56,53 MPa)	0,001	Estatisticamente desiguais , sendo o Grupo 2 dominante
	Flexão Transversal <i>Pinus spp.</i> (330,6 MPa)	Flexão Transversal <i>Eucalyptus spp.</i> (330 MPa)	0,713	Estatisticamente equivalentes
	Flexão Longitudinal <i>Pinus spp.</i> (32,14 MPa)	Flexão Longitudinal <i>Eucalyptus spp.</i> (48,02 MPa)	<0,001	Estatisticamente desiguais , sendo o Grupo 2 dominante

Fonte: Autor, 2025.

De forma homóloga ao verificado para a resistência, o módulo de rigidez ao cisalhamento rolante (G_{vt}) manifestou um padrão de equivalência estatística estritamente dependente da matriz de ensaio utilizada. Os resultados analíticos gerados pelo teste de Mann-Whitney apontam que, na configuração de flexão transversal, as espécies de *Pinus spp.* e *Eucalyptus spp.* são consideradas estatisticamente equivalentes, convergindo para patamares elásticos elevados de 330,6 MPa e 330 MPa, respectivamente.

Em contrapartida, as demais matrizes experimentais acusaram desigualdade estatística expressiva: no ensaio de cisalhamento por compressão, as medianas fixaram-se em 49,7 MPa para a conífera e 56,53 MPa para a folhosa ($p = 0,001$), ao passo que na flexão longitudinal o *Eucalyptus spp.* consolidou sua superioridade rígida

com uma mediana de 48,02 MPa frente a 32,14 MPa do *Pinus spp.* ($p = 0,000$).

A ausência de distinção estatística na flexão transversal reside no fato de que os altos valores obtidos (na ordem de 300 MPa) caracterizam uma propriedade do elemento estrutural composto, e não uma constante constitutiva isolada da madeira. Sob essa configuração, o efeito de sistema, governado pela severa restrição geométrica imposta pelas lamelas longitudinais externas altamente rígidas, sobrepõe-se às particularidades biológicas e anatômicas da matéria-prima. A retroanálise analítica da deflexão global acaba incorporando a rigidez flexural das lamelas adjacentes, equalizando a resposta de deformação de ambas as espécies.

Esse comportamento sistêmico e a dependência crônica do arranjo experimental encontram amparo direto nos achados de Silva et al. (2023). Ao investigarem painéis de MLCC de *Pinus elliottii* (383 kg/m³) e *Eucalyptus grandis* (413 kg/m³), os autores ratificaram o papel governante da metodologia de ensaio sobre a rigidez transversal e atestaram que lotes de menor massa específica traduzem-se em desempenho elástico inferior quando o material é devidamente isolado. Enquanto o ensaio de compressão normativa da NBR 7190-7 revelou módulos de rigidez discretos de 21,5 MPa para o *Pinus* e 27,90 MPa para o *Eucalyptus spp.*, a transição para a flexão a três pontos elevou os patamares para 233 MPa e 264 MPa, respectivamente. Esse incremento continuou na compressão modificada (157 MPa na conífera e 269 MPa na folhosa), corroborando o perfil assimétrico entre as propriedades intrínsecas e as respostas globais do produto composto de acordo com a cinemática do teste.

Por outro lado, a assimetria estatística nos ensaios de flexão longitudinal e de cisalhamento por compressão correlaciona-se intimamente com a estrutura celular e a densidade do material. O ensaio de compressão convencional atua de forma purificada, minimizando o confinamento de conjunto e isolando o plano radial-tangencial da lamela central. Paralelamente, a flexão longitudinal mobiliza de forma mais direta a interface entre as camadas e exige maior rigidez intrínseca do miolo, reduzindo a blindagem elástica das lamelas externas.

Sob essas condições de exposição mecânica, a maior densidade básica e a espessura da parede celular das fibras de sustentação do *Eucalyptus spp.* manifestam-se como uma vantagem competitiva mensurável, provendo maior coesão intercelular e travamento contra a distorção angular do que os traqueídeos de parede delgada do *Pinus spp.*

Essa dominância constitutiva das madeiras duras é ratificada por Ehrhart e

Brandner (2018). Ao investigarem o efeito de fatores anatômicos sobre as propriedades de cisalhamento rolante em seis espécies distintas, abrangendo folhosas e coníferas, os autores comprovaram que a rigidez e a capacidade de ruptura das folhosas superam de forma estatisticamente significativa os indicadores obtidos para o grupo das coníferas, validando os cenários de desigualdade mapeados nesta pesquisa sempre que o plano material puro é solicitado.

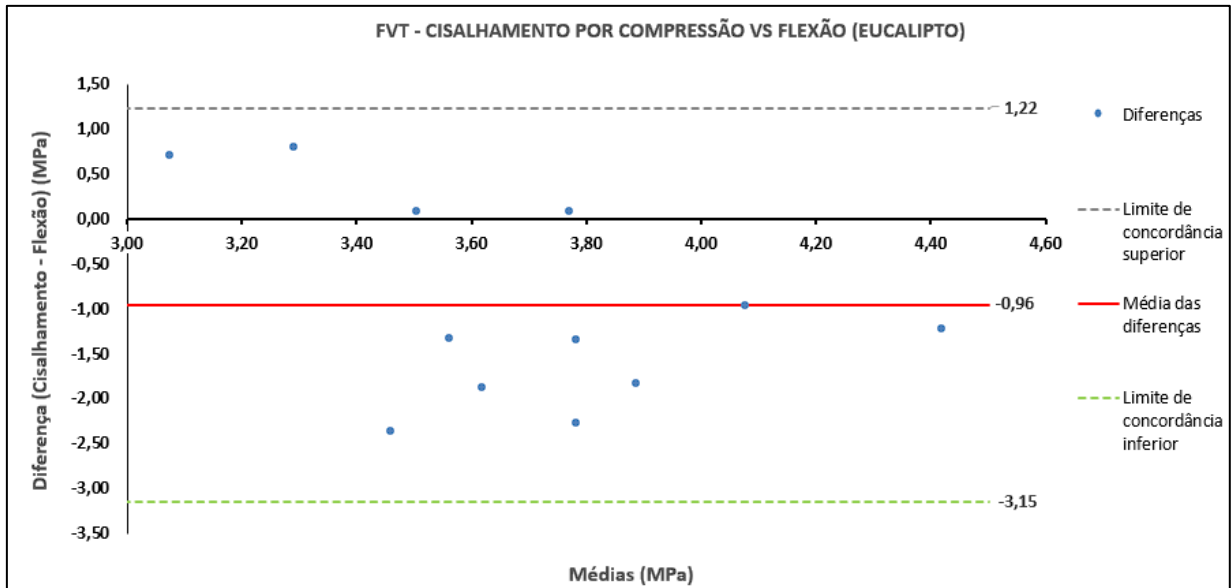
Ainda, a equivalência demonstrada na flexão transversal indica que, para a verificação de deformações e estados limites de serviço em painéis solicitados estritamente fora do plano nesta configuração, o parâmetro de rigidez aparente ao cisalhamento rolante pode ser uniformizado para ambas as espécies, simplificando rotinas de cálculo.

Todavia, a superioridade nítida da folhosa nos cenários de esforço direto (compressão) e flexão paralela adverte que, em solicitações de compressão e orientadas ao longo do eixo principal do painel, a especificação da espécie de maior densidade promove um incremento real de rigidez, reduzindo a flecha total de serviço e viabilizando o uso de seções transversais significativamente mais esbeltas e econômicas.

4.5.3 Análise de concordância de Bland – Altman

A avaliação da intercambialidade entre os métodos de ensaio foi conduzida por meio da análise de concordância de Bland-Altman. A Figura 4.9 demonstra os resultados obtidos para a análise da resistência dos ensaios para o *Eucalyptus spp.*

Figura 4.9: Análise de concordância de Bland-Altman para o *Eucalyptus spp.* comparando os resultados de resistência (f_{vt}) dos métodos de compressão e flexão transversal.



Fonte: Autor, 2026.

Observa-se um viés médio (*bias*) de -0,96 MPa, indicando que o ensaio de cisalhamento por compressão tende a subestimar a resistência ao cisalhamento rolante em comparação ao ensaio de flexão transversal. Isso é corroborado pelas médias obtidas de 3,20 MPa para o ensaio de compressão contra 4,17 MPa no ensaio de flexão transversal, representando uma diminuição nominal de aproximadamente 23,3% em relação metodologia de flexão.

A amplitude é considerável entre os limites de concordância (1,22 MPa à -3,15 MPa), e visto que a amplitude total do intervalo de concordância é superior que a própria resistência média da espécie (para o ensaio de compressão), isso indica uma alta incerteza e baixa reprodutibilidade entre os métodos.

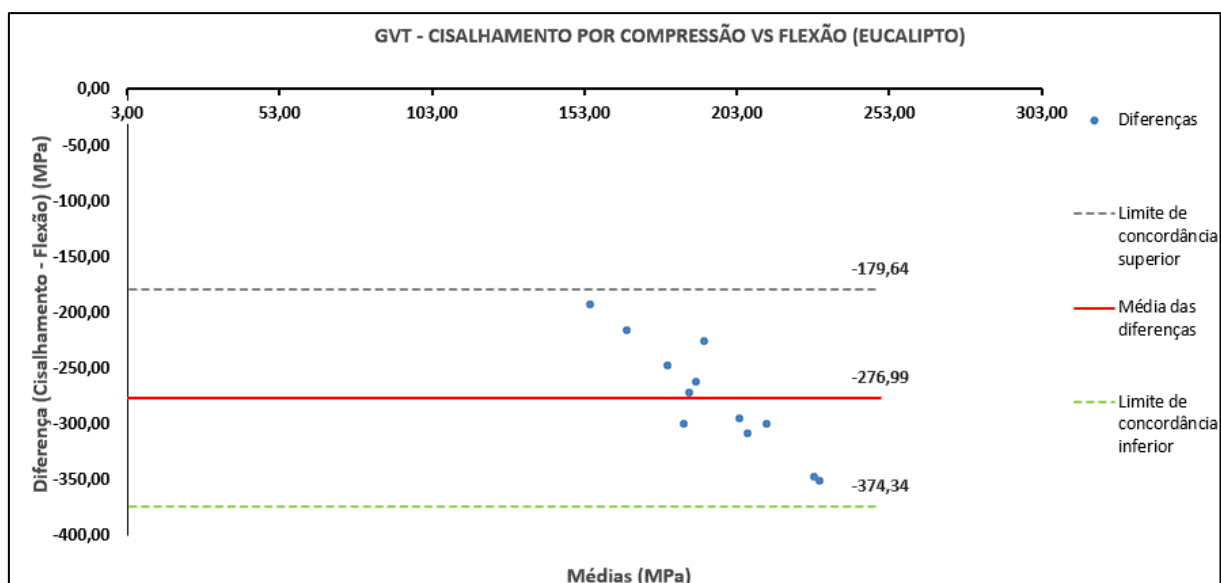
A maioria dos pontos experimentais encontra-se dispersa abaixo da linha de concordância nula ($Y=0$), com alguns exemplares apresentando diferenças individuais superiores a 2,00 MPa entre os dois tipos de ensaio.

A maior complexidade anatômica, a elevada densidade, e o estado de tensões “menos purista” do ensaio de cisalhamento por compressão, podem diminuir artificialmente a capacidade de carga e o módulo de cisalhamento rolante em relação ao estado de tensões mais puro induzido pelos ensaios de flexão.

Uma vez estabelecido o grau de concordância entre os métodos de ensaio para a estimativa da resistência ao cisalhamento rolante, torna-se imperativo estender

esta investigação para o módulo de cisalhamento rolante. A Figura 4.10 demonstra a análise de concordância entre ensaios para o *Eucalyptus spp.* comparando os resultados do módulo de cisalhamento.

Figura 4.10: Análise de concordância de Bland-Altman para o *Eucalyptus spp.* comparando os resultados do módulo de cisalhamento (G_v) dos métodos de compressão e flexão transversal.



Fonte: Autor, 2026.

O viés negativo de -276,99 MPa indica que o ensaio de flexão transversal resulta em valores de rigidez exponencialmente superiores aos obtidos por compressão. Ao confrontar os dados descritivos, observa-se que a média por compressão é 56,67, enquanto na flexão transversal o valor atinge 333,66 MPa.

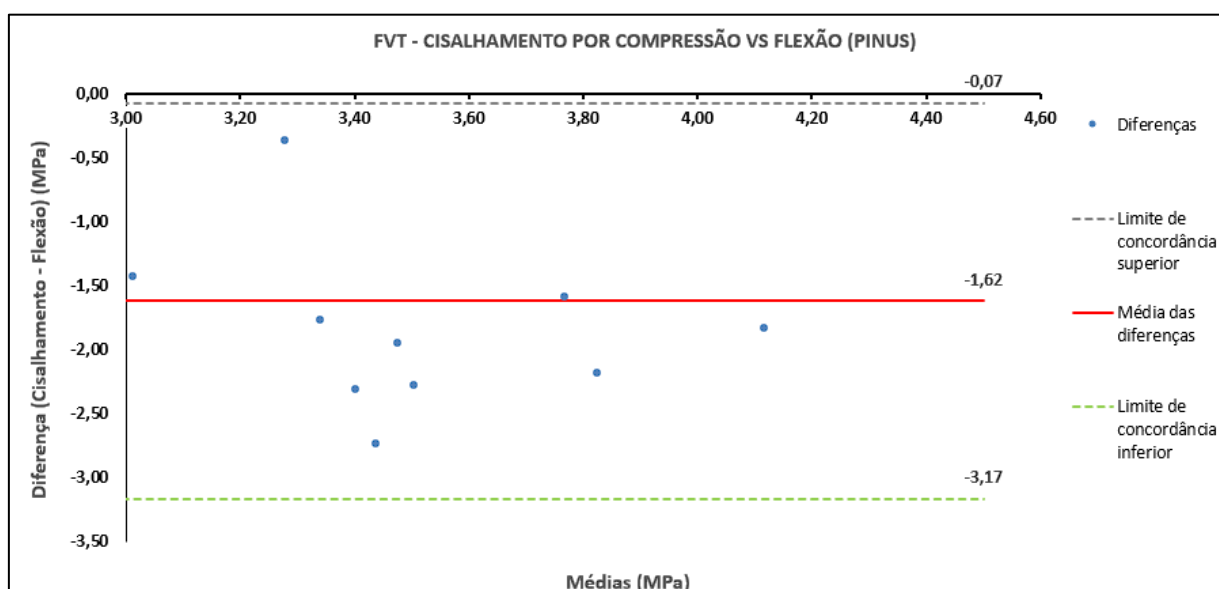
Já em relação aos limites de concordância, estes estendem-se de -179,64 MPa a -374,34 MPa. A linha de concordância nula (eixo das abscissas) sequer intercepta a nuvem de pontos ou o intervalo dos limites, o que caracteriza tecnicamente uma ausência total de concordância entre as metodologias para a medição do módulo de cisalhamento rolante.

Essa disparidade sugere que os ensaios avaliam propriedades de naturezas distintas. Enquanto o ensaio de cisalhamento por compressão aproxima-se mais da determinação do módulo de cisalhamento no plano radial tangencial da lamela transversal, o ensaio de flexão fornece o módulo aparente do sistema composto. O ensaio de flexão pode estar capturando componentes de rigidez que não se restringem apenas ao rolamento das fibras, ou que a deformação medida na flexão

sofre influência direta da geometria do painel e das camadas longitudinais, resultando em valores de rigidez que não representam a propriedade intrínseca do material sob cisalhamento puro, mas sim, um módulo aparente do sistema MLCC.

Concluída a investigação sobre a concordância entre ensaios para o *Eucalyptus. spp.*, a análise prossegue para a avaliação da segunda espécie componente do escopo amostral. A Figura 4.11 mostra a análise de concordância para a resistência ao cisalhamento rolante f_{vt} do *Pinus spp.*

Figura 4.11: Análise de concordância de Bland-Altman para o *Pinus spp.* comparando os resultados de resistência (f_{vt}) dos métodos de compressão e flexão transversal.



Fonte: Autor, 2026.

O *bias* de -1,62 MPa demonstra novamente que o ensaio de compressão subestima severamente a resistência em comparação ao ensaio de flexão. Ao analisar os dados brutos, a resistência média por compressão para o *Pinus* é de 2,55 MPa, enquanto na flexão transversal o valor salta para 4,04 MPa. Isso representa uma subestimação de aproximadamente 37%, um impacto percentual significativamente maior que o verificado no eucalipto.

Os limites situam-se entre - 0,07 MPa e -3,17 MPa, o fato de o limite superior estar muito próximo de zero e quase a totalidade dos pontos estar concentrada na zona negativa reforça que não há casos em que os métodos se equivalem, a flexão é invariavelmente superior.

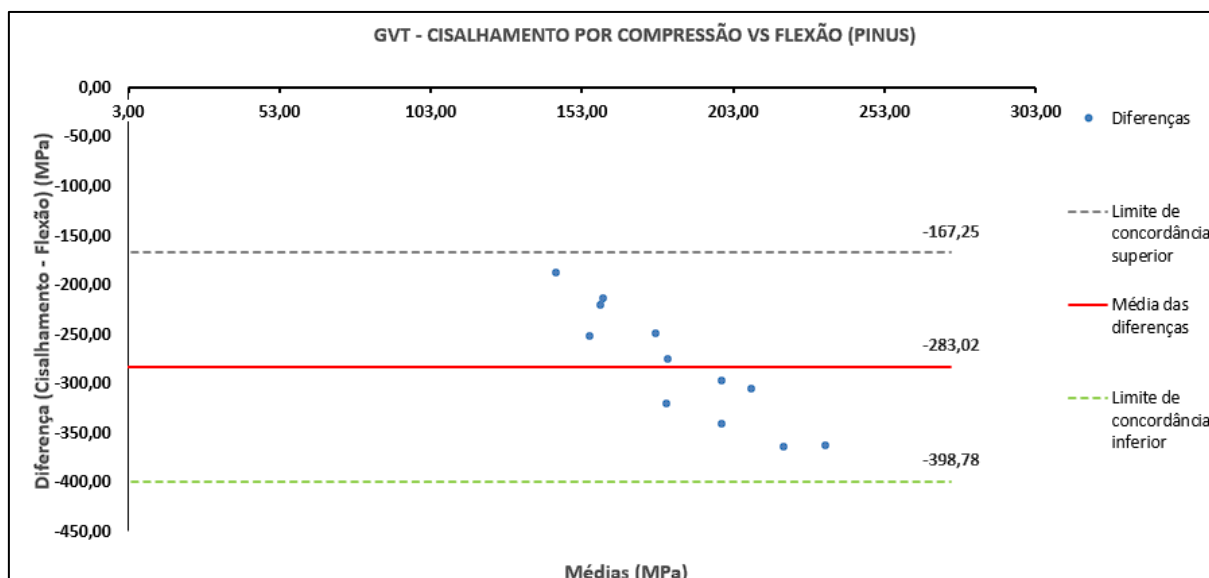
Observa-se uma dispersão considerável dos pontos, com diferenças

individuais chegando a ultrapassar 2,50 MPa em valor absoluto. A nuvem de pontos não demonstra uma tendência de afunilamento, o que indica que o erro é persistente em diferentes níveis de resistência do material.

Para a madeira de *Pinus spp.*, que possui menor densidade e paredes celulares mais delgadas que o eucalipto, a mecânica de ruptura na flexão transversal parece ser ainda mais influenciada pela restrição lateral das fibras e pelo esmagamento local nos apoios. Esses fatores podem mascarar o colapso por rolamento das fibras das lamelas centrais, resultando em uma capacidade de carga na flexão que não guarda relação direta com a resistência obtida no ensaio de compressão.

Uma vez estabelecido o grau de concordância entre os protocolos de flexão e cisalhamento direto para a resistência ao cisalhamento rolante do *Pinus spp.*, torna-se necessário investigar se a mesma paridade metodológica se sustenta para o módulo de cisalhamento rolante. A Figura 4.12 demonstra a análise de concordância para o módulo de elasticidade transversal (G_{vt}) da espécie de *Pinus spp.* entre a metodologia de ensaio de cisalhamento por compressão e o ensaio de flexão.

Figura 4.12: Análise de concordância de Bland-Altman para o *Pinus spp.* comparando os resultados de módulo de cisalhamento (G_{vt}) dos métodos de compressão e flexão.



Fonte: Autor, 2026.

O viés médio negativo de -283,02 MPa evidencia que o ensaio de compressão convencional subestima a rigidez ao cisalhamento rolante em uma magnitude

desproporcional para o *Pinus spp.* Enquanto o aparato de compressão normativa resultou em uma média de apenas 43,64 MPa, o ensaio de flexão transversal alcançou a média de 326,65 MPa, consolidando valores cerca de 11 vezes superiores para o método flexural. Os limites de concordância de Bland-Altman, situados entre -167,25 MPa e -398,78 MPa, discriminam uma dispersão severa. A linha de concordância nula localiza-se a uma distância abissal do intervalo de confiança estabelecido, o que ratifica a ausência completa de intercambialidade e correlação física direta entre as medidas do módulo de cisalhamento rolante extraídas por esses dois aparatos.

Adicionalmente, a distribuição cartográfica dos dados revela que a totalidade dos pontos experimentais se encontra confinada na região negativa do gráfico, com expressiva concentração abaixo da linha de viés médio. Mapeou-se uma clara tendência de alargamento da diferença (dispersão descendente) à medida que a média dos valores aumenta. Esse comportamento infere que o erro sistemático associado à rigidez aparente do método de flexão transversal torna-se ainda mais agudo em corpos de prova que apresentam maior rigidez intrínseca, ampliando a divergência entre as respostas dos ensaios.

De forma homóloga ao discutido para o gênero *Eucalyptus*, os ensaios de cisalhamento por compressão convencional e de flexão de três pontos atuam mensurando propriedades mecânicas de naturezas totalmente distintas. No cenário específico do *Pinus spp.*, a menor rigidez transversal intrínseca de suas fibras acentua a disparidade de leitura do sistema composto. A magnitude hipertrofiada dos módulos obtidos via flexão transversal decorre do fato de a deflexão no centro do vão incorporar a rigidez flexural das camadas longitudinais externas, falhando em isolar a distorção angular pura do miolo. Em contrapartida, o ensaio de compressão convencional, devido às restrições cinemáticas de seu arranjo e acomodações do aparato, falha em registrar a rigidez fenomenológica global do produto engenheirado.

Essa assimetria conceitual e metodológica é integralmente ratificada pelos achados experimentais de Silva et al. (2023) ao avaliarem painéis de MLCC de *Pinus elliottii* (383 kg/m³) e *Eucalyptus grandis* (413 kg/m³). Os autores comprovaram o papel governante do método de ensaio sobre os parâmetros elásticos, apontando a proposta de compressão da NBR 7190-7 como a abordagem mais conservadora do espectro técnico. No estudo referenciado, a rigidez do *Pinus elliottii* saltou de escassos 21,5 MPa no ensaio de compressão normativa para 233 MPa na flexão de três pontos, culminando em 157 MPa no método de compressão modificada (blocos inclinados),

enquanto a rigidez do *Eucalyptus grandis* saltou de 27,9 MPa para 264 MPa, culminando em 269 MPa no ensaio de compressão modificada.

O espelhamento entre o comportamento dos lotes de Silva et al. (2023) e os dados desta pesquisa consolida o perfil assimétrico existente entre as propriedades intrínsecas da matéria-prima isolada e as respostas globais do sistema estrutural composto. Em suma, a aplicação da modelagem de Bland-Altman cumpre um papel fundamental na pesquisa ao demonstrar matematicamente que, embora ambas as metodologias se proponham a caracterizar o mecanismo de cisalhamento rolante, o ensaio de compressão convencional impõe uma subestimação sistemática severa para ambas as espécies, operando em uma escala física distinta daquela observada nos ensaios flexurais.

4.6 MÉTODOS ANALÍTICOS

Com o propósito de validar a capacidade preditiva das formulações matemáticas consagradas na literatura técnica para o dimensionamento de elementos em MLCC, esta seção estabelece o confronto direto entre os resultados obtidos experimentalmente e os valores teóricos calculados. Foram avaliados três modelos mecânico-estruturais distintos: o Método Gamma (*Gamma Method*), que contabiliza a perda de rigidez por meio de um coeficiente de eficiência de conexão; o Método K (*K-Method*), que se baseia na modificação da rigidez equivalente da seção composta; e a Analogia de Cisalhamento (*Shear Analogy*), modelo acurado que segrega explicitamente as parcelas de rigidez à flexão pura e rigidez ao cisalhamento rolante.

A predição analítica das propriedades de cisalhamento rolante foi restrita aos ensaios de flexão. Isso se deve ao fato de que as metodologias empregadas (*Shear Analogy*, Método Gama e *K-method*) fundamentam-se na teoria de vigas e placas compostas submetidas a carregamentos transversais (flexão fora do plano), não sendo aplicáveis ao estado de tensões diretas e concentradas característico dos ensaios de cisalhamento por compressão.

Todas as comparações entre as metodologias foram conduzidas com base nos valores médios obtidos para cada bateria de ensaios. A Tabela 4.10 sintetiza os valores médios da tensão de resistência ao cisalhamento rolante (f_{vt}), observados entre as predições analíticas e as respostas empíricas de laboratório.

Tabela 4.10: Resumo comparativo dos resultados dos métodos analíticos para a resistência média ao cisalhamento rolante

Metodologia de ensaio	Espécie	f_{vt} médio (MPa)			
		Método Gamma	K-method	Analogia de Cisalhamento	Experimental
Flexão Transversal	<i>Eucalyptus spp.</i>	2,81	3,94	3,92	4,17
	<i>Pinus spp</i>	2,74	3,85	3,85	4,04
Flexão Longitudinal	<i>Eucalyptus spp.</i>	0,65	0,91	0,91	0,96
	<i>Pinus spp</i>	0,31	0,44	0,44	0,47

Fonte: Autor, 2026.

A análise comparativa disposta na Tabela 4.10 revela discrepâncias sistemáticas de magnitude variável entre as metodologias analíticas e o comportamento experimental dos painéis. Essas divergências não decorrem de falhas operacionais de ensaio, mas encontram justificativas fundamentadas tanto nas simplificações matemáticas de cálculo de cada modelo, quanto em fenômenos físicos e anatômicos intrínsecos à madeira estrutural.

De acordo com Popoviski et al. (2019), o método Gamma assume uma distribuição simplificada de tensões que tende a apresentar bom ajuste para painéis de menos que sete camadas sob razões de vão-altura mais elevadas (maior ou igual a 30). Contudo, o modelo impõe uma idealização das deformações causadas pelas tensões de cisalhamento, que ignora deformações secundárias nas lamelas longitudinais, considerando apenas as deformações das lamelas transversais. Para este trabalho, a razão vão-altura foi inferior a 30. Em contrapartida, o Método K e a Analogia de Cisalhamento operam sob premissas mecânicas distintas.

Já o Método K, considera que as camadas com orientação perpendicular não possuem resistência significativa quando se quantifica as propriedades de flexão, devido a isso, o método foi modificado para ser utilizado na análise de painéis CLT, para se levar em conta a contribuição de resistência de todas as camadas. (Popoviski et al., 2019)

A Analogia de Cisalhamento, por basear-se na decomposição da viga em dois componentes visuais, um puramente flexionado e o outro submetido apenas ao cisalhamento, tende a capturar de forma mais robusta a concentração de tensões na interface de colagem. (Huang et al., 2023)

As variações observadas entre esses três métodos decorrem diretamente de

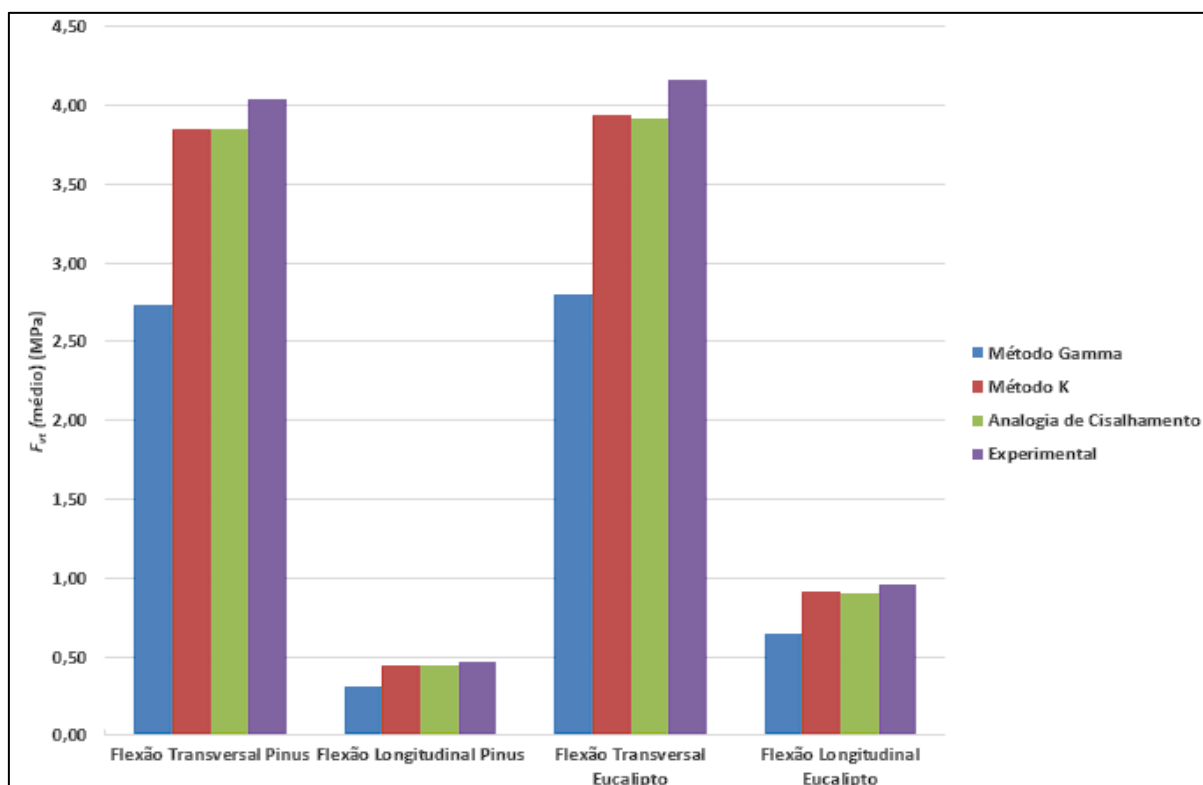
como cada algoritmo matemático distribui o fluxo de cisalhamento ao longo da seção transversal transformada, sendo altamente sensíveis à imposição teórica da relação entre o módulo de elasticidade longitudinal e o módulo de elasticidade transversal, adotado neste trabalho e em algumas diretrizes normativas como $E_{90} = E_0/30$.

Do ponto de vista reológico e material, a anisotropia e a orientação celular da madeira desempenham papel governante nos desvios quantificados. O fenômeno do cisalhamento rolante manifesta-se essencialmente como uma falha por distorção angular e “escorregamento” mecânico no plano de crescimento radial tangencial das lamelas transversais. A eficiência de resistência desse plano é diretamente afetada pelo padrão de corte das peças que compuseram as lamelas transversais. (Wu; Zhong; Ren, 2021)

A presença de defeitos que ocorrem naturalmente na matriz lenhosa das lamelas reduz a capacidade resistiva efetiva ao cisalhamento rolante, gerando pontos de fragilidade localizados que as formulações analíticas são incapazes de mapear. Esse distanciamento decorre do fato de que os modelos teóricos se fundamentam na premissa de homogeneidade macroestrutural do material, idealizando-o como um meio perfeitamente contínuo e ortotrópico, justificando as margens de erro das estimativas analíticas.

Com o propósito de estender a compreensão analítica dos dados quantitativos apresentados anteriormente, e evidenciar de forma imediata as tendências de afastamento entre os modelos, a Figura 4.13 ilustra graficamente a comparação do comportamento das resistências médias ao cisalhamento rolante.

Figura 4.13: Comparação gráfica dos resultados médios de resistência ao cisalhamento rolante (f_{vt}) entre os métodos analíticos e os resultados experimentais



Fonte: Adaptado de Huang, et al., (2023).

A inspeção visual das colunas dispostas na Figura 4.14 consolida e expande as inferências discutidas na seção anterior, tornando evidentes os gradientes de dispersão e a sensibilidade de cada modelo matemático.

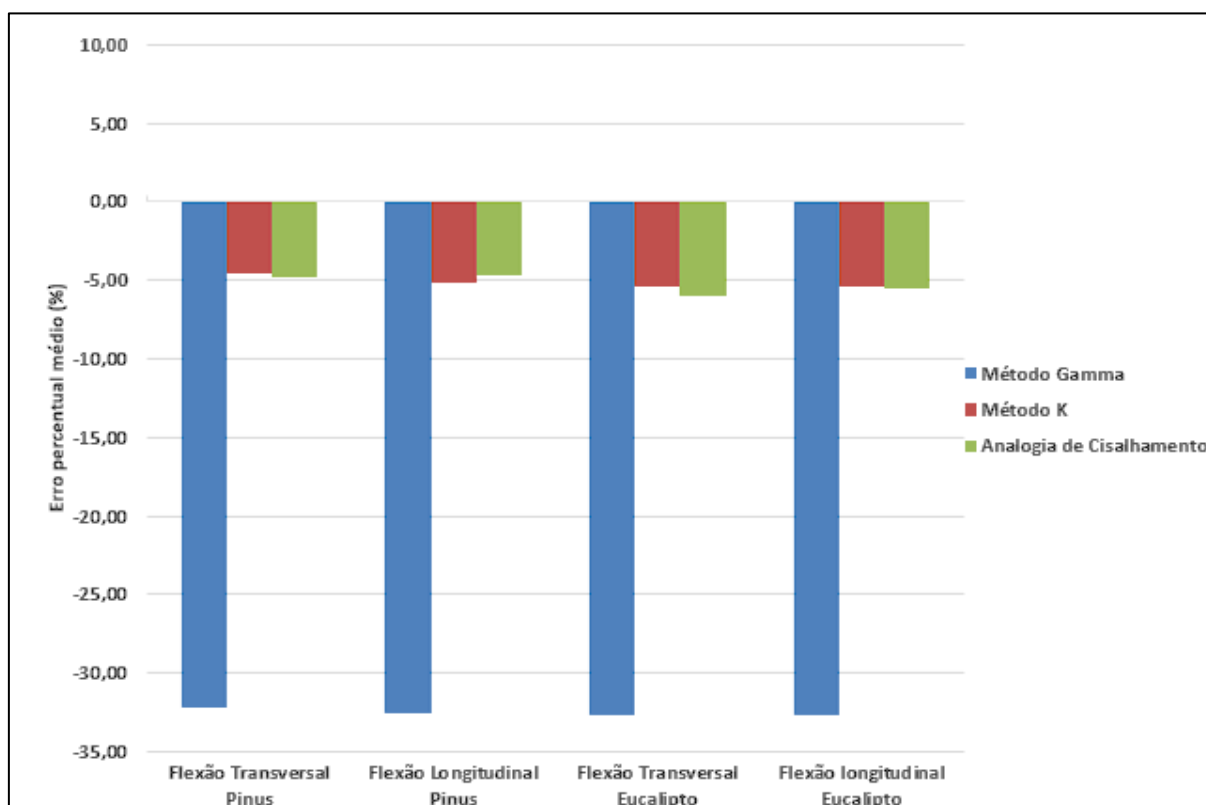
Para todos os ensaios de flexão, o alinhamento vertical das barras evidencia a estabilidade preditiva dos métodos analíticos. A analogia de cisalhamento e o Método K se destacam pela capacidade acurada e levemente conservadora de predição das resistências para as quatro baterias de ensaios, enquanto o método Gamma, apresentou uma subestimação elevada da resistência ao cisalhamento rolante (cerca de 70% em relação ao experimental). Adicionalmente, observa-se que todos os modelos operam predominantemente abaixo da linha do comportamento experimental, o que traduz visualmente o caráter conservador e seguro dessas formulações para a predição da resistência ao cisalhamento rolante de painéis compostos sujeitos à flexão.

Assim, o mapeamento visual do gráfico funciona como um indexador de segurança estrutural, validando quais modelos matemáticos resguardam a integridade e economia de material e quais expõem o painel composto a estimativas de resistência

onerosamente subestimadas.

Visando converter as divergências numéricas em métricas objetivas de acurácia, a Figura 4.14 apresenta o erro percentual médio de cada método analítico em relação à linha de base experimental (eixo zero). Esta normalização estatística é indispensável para isolar a magnitude real dos desvios, permitindo classificar os modelos sob o duplo critério de precisão matemática e conservadorismo estrutural. No contexto do design estrutural, erros percentuais médios com sinal negativo denotam uma subestimativa da capacidade de carga teórica, configurando uma margem de segurança desejável.

Figura 4.14: Comparação gráfica pelo erro percentual médio dos métodos analíticos com os resultados experimentais



Fonte: Adaptado de Huang et al., (2023).

A análise do gráfico de barras da Figura 4.15, evidencia de forma categórica que a margem de erro entre os métodos analíticos não é uniforme, sendo severamente penalizada ou favorecida pelas premissas fundamentais de cada formulação de cálculo e pelas características geométricas e de carregamento de cada ensaio.

No quadrante inferior do gráfico, onde se concentram os erros percentuais

negativos, observa-se o desempenho altamente satisfatório do Método K e da Analogia de cisalhamento nas baterias de flexão. Para ambas as espécies, os desvios contidos demonstram que esses dois métodos absorvem eficientemente a distorção da camada transversal, mantendo o erro em patamares reduzidos. Esse conservadorismo moderado é o cenário ideal para o projetista estrutural, pois resguarda a estrutura contra colapsos prematuros sem inviabilizar economicamente o projeto e exacerbando o consumo de material.

Nos estudos de Huang et al. (2023), foram testadas as capacidades preditivas das metodologias analíticas, encontrando-se resultados tanto comparáveis como contrastantes com os encontrados neste trabalho. Para o Método Gamma, o painel de três camadas sujeito a flexão produzido com *European Spruce* (EUS) apresentou uma resistência calculada 20% menor à real, enquanto o painel produzido com *Spruce Pine Fir* (SPF) apresentou uma resistência 2,35% maior à real para a mesma metodologia de cálculo. Os resultados da Analogia de Cisalhamento apresentaram desvios ainda mais expressivos: para os painéis de EUS, verificou-se uma resistência 45,99% maior, enquanto para o SPF encontrou-se uma superestimativa de 23,74% em relação à experimental. As resistências ao cisalhamento rolante calculadas com o Método K foram muito semelhantes às da Analogia de Cisalhamento. Todavia, para o painel de cinco lamelas produzido com *European Spruce*, os resultados assemelharam-se muito aos achados desta pesquisa: as metodologias de Analogia de Cisalhamento e Método K apresentaram valores calculados muito próximos ao experimental, enquanto o método gamma apresentou uma subestimativa de resistência de aproximadamente 20%. Tais diferenças podem ser explicadas pelas diferenciações entre trabalhos na esbelteza relativa dos painéis (razão vão-altura, razão de aspecto), bem como pela variação na razão de rigidez transversal e longitudinal intrínseca para cada espécie botânica utilizada, e pela simplificação utilizada nos cálculos deste trabalho devido a inserção de um valor médio determinístico do módulo de elasticidade longitudinal (E_{0med}).

Em síntese, a análise integrada da matriz de dados e das projeções gráficas ratifica o comportamento bimodal do programa experimental, cujos regimes de convergência analítico – experimental são governados pelas relações geométricas dos corpos de prova e pela variação na razão dos módulos de elasticidade transversal e longitudinal. As metodologias teóricas demonstraram satisfatória aderência conceitual na predição ao cisalhamento rolante sob condições de flexão simples.

Nesse domínio, tanto as predições para a configuração longitudinal quanto a transversal exibiram desvios percentuais negativos e controlados, o que resguarda a integridade do dimensionamento prático. Por fim, a magnitude global dos erros percentuais mostrou que a validação analítica de painéis MLCC evoca uma indissociável correlação entre o arranjo de solicitação e a geometria dos painéis.

5 CONCLUSÃO

Esta pesquisa determinou a resistência ao cisalhamento rolante f_{vt} e o módulo de rigidez ao cisalhamento rolante G_{vt} de painéis de Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC) *Pinus spp.* e *Eucalyptus spp.*. E com base nos resultados experimentais, estatísticos e analíticos, conclui-se que os objetivos específicos foram atendidos da seguinte forma:

a) Determinar a resistência e a rigidez ao cisalhamento rolante dos painéis de MLCC.

A caracterização experimental permitiu quantificar as propriedades de cisalhamento rolante para as duas espécies e para as distintas configurações de ensaio. No ensaio de cisalhamento por compressão, o *Eucalyptus spp.* apresentou valores médios de f_{vt} e G_{vt} de 3,20 MPa e 56,67 MPa, respectivamente; para o *Pinus spp.*, os valores correspondentes foram 2,55 MPa e 43,64 MPa.

Na flexão transversal as resistências obtidas foram consideravelmente superiores, 4,17 MPa para o *Eucalyptus spp.* e 4,04 para o *Pinus spp.*, já os módulos aparentes de rigidez foram substancialmente maiores: 333,66 MPa para o *Eucalyptus spp.* e 326,65 MPa para o *Pinus spp.*.

O Ensaio de flexão longitudinal apresentou as menores capacidades de carga das três metodologias, aferindo resistências médias de 0,96 e 0,47 MPa, com rigidezes de 50,29 e 32,78 MPa, para as espécies de *Eucalyptus spp.* e *Pinus spp.* evidenciando que os parâmetros obtidos dependem do arranjo do painel e da configuração de carregamento.

Portanto, os valores obtidos constituem uma base de caracterização para a geometria, configurações de ensaio, o adesivo e as condições de fabricação estudadas, mas não devem ser tratados como constantes intrínsecas e universais das espécies. A resistência e, sobretudo, a rigidez medidas expressam a interação entre a madeira da camada transversal, as lamelas externas, a geometria do corpo de prova e o método de ensaio.

b) Avaliar a influência da espécie da madeira na resistência e na rigidez ao cisalhamento rolante.

A espécie de madeira exerceu influência estatisticamente significativa sobre as propriedades de cisalhamento rolante nas configurações de ensaio que mobilizaram de forma mais direta a resposta mecânica da lamela central:

No ensaio de cisalhamento por compressão, os painéis produzidos com *Eucalyptus spp.* apresentaram resistência média ao cisalhamento rolante superior à dos painéis de *Pinus spp.*, diferença confirmada pelo teste U de Mann–Whitney ($p=0,006$). O mesmo comportamento foi observado para o módulo de rigidez ao cisalhamento rolante, G_{vt} , para o qual o *Eucalyptus spp.* apresentou valores superiores, com diferença estatisticamente significativa ($p=0,001$).

Na configuração de flexão longitudinal, o *Eucalyptus spp.* também apresentou resistência e rigidez superiores às obtidas para o *Pinus spp.*. Os testes U de Mann–Whitney indicaram diferenças significativas tanto para a resistência ao cisalhamento rolante ($p=0,001$) quanto para o módulo de rigidez ($p<0,001$). Esses resultados evidenciam que, em condições nas quais a ação composta entre as lamelas é menos pronunciada, as diferenças intrínsecas entre as espécies permanecem expressivas no desempenho do painel.

Em contrapartida, na flexão transversal, não foram identificadas diferenças estatisticamente significativas entre as espécies, nem para a resistência ($p = 0,347$) nem para a rigidez ($p = 0,713$). Nessa configuração, a participação das lamelas longitudinais externas na transferência de esforços promove o confinamento e o enrijecimento da camada transversal, reduzindo a manifestação das diferenças anatômicas e mecânicas entre *Eucalyptus spp.* e *Pinus spp.*

Conclui-se, portanto, que a influência da espécie sobre o cisalhamento rolante não é uniforme, mas condicionada pela configuração de solicitação e pelo grau de mobilização da camada transversal. A escolha da espécie torna-se especialmente relevante para o controle da deformabilidade e da capacidade resistente em situações nas quais a camada transversal é solicitada de modo mais isolado ou em que a contribuição das camadas longitudinais para a rigidez global do painel é reduzida.

c) Avaliar as diferenças entre os ensaios de flexão e de cisalhamento por compressão

A análise dos modos de ruptura e dos resultados quantitativos evidenciou que

a metodologia de ensaio exerce influência determinante sobre a resposta ao cisalhamento rolante dos painéis de MLCC. No ensaio de cisalhamento por compressão, foram observados comportamentos distintos entre as espécies: para o *Eucalyptus spp.*, predominou um modo de falha combinado, caracterizado pela ocorrência de cisalhamento rolante associado à delaminação; para o *Pinus spp.*, predominou o cisalhamento rolante puro. Essa diferença indica que a configuração de compressão é sensível tanto às propriedades da camada transversal quanto às particularidades anatômicas e à integridade das interfaces coladas.

Na flexão transversal, o cisalhamento rolante puro constituiu o mecanismo de ruptura predominante, com maior uniformidade entre os corpos de prova. Essa configuração mobiliza a ação composta das camadas longitudinais externas e, por isso, representa de forma mais direta a resposta global do painel sob flexão fora do plano. Em contraste, na flexão longitudinal, o modo de ruptura predominante foi governado pela flexão, com tração na face inferior do painel, e não pelo cisalhamento rolante. Portanto, essa configuração não se mostrou apropriada para a caracterização direta da resistência ao cisalhamento rolante.

Do ponto de vista quantitativo, a flexão transversal apresentou os maiores valores de resistência e rigidez entre as configurações avaliadas. Os testes U de Mann–Whitney indicaram diferenças estatisticamente significativas em relação ao ensaio de cisalhamento por compressão e à flexão longitudinal. A rigidez aparente determinada na flexão transversal alcançou valores de 333,66 MPa para o *Eucalyptus spp.* e 326,65 MPa para o *Pinus spp.*, ao passo que os valores obtidos por compressão foram de 56,67 MPa e 43,64 MPa, respectivamente. Essa diferença decorre da participação das lamelas longitudinais na rigidez do painel, e não deve ser interpretada como uma propriedade intrínseca isolada da camada transversal.

O ensaio de cisalhamento por compressão apresentou resultados intermediários, superiores aos da flexão longitudinal e inferiores aos da flexão transversal. Embora essa configuração não reproduza um estado de cisalhamento puro, em razão da presença de tensões normais, restrições de borda e efeitos localizados, ela se mostrou útil como procedimento complementar por revelar com maior sensibilidade as diferenças entre as espécies quando a camada transversal é solicitada de forma mais direta.

A análise de concordância de Bland–Altman confirmou a ausência de intercambialidade entre os métodos, para ambas as espécies. Em particular, a flexão

transversal apresentou o maior viés sistemático em relação às demais configurações, associado à incorporação da inércia e da rigidez das camadas adjacentes; em relação ao ensaio de compressão, a rigidez pode ser superestimada em até onze vezes. Assim, valores obtidos por uma metodologia não devem ser empregados como substitutos diretos dos obtidos por outra.

Conclui-se que a flexão transversal é a configuração mais adequada para caracterizar a resposta global do painel de MLCC ao cisalhamento rolante em condições de flexão fora do plano. O ensaio de cisalhamento por compressão deve ser entendido como uma avaliação complementar, particularmente útil para discriminar a influência da espécie na resposta da camada transversal. A flexão longitudinal, por não induzir predominantemente a ruptura por cisalhamento rolante, não é recomendada para a determinação dessa propriedade. A escolha do método de ensaio deve, portanto, ser compatível com a propriedade de interesse e com a condição estrutural que se pretende representar.

d) Avaliar a eficácia dos métodos analíticos de cálculo da resistência ao cisalhamento rolante propostos na literatura.

O Método K e a Analogia de Cisalhamento exibiram excelente capacidade preditiva para ambas as metodologias de flexão, fornecendo estimativas com erros percentuais negativos controlados (cerca de 5 a 10%), ideais para o design prático e seguro de placas e vigas. Em contrapartida, o Método Gamma subestimou a resistência à flexão em aproximadamente 30%, revelando-se excessivamente penalizador para as razões geométricas adotadas.

e) Avaliar o uso de folhosas como madeira principal na produção de painéis de MLCC

O emprego do gênero *Eucalyptus spp.* como matéria-prima principal para painéis estruturais de MLCC demonstrou elevado potencial técnico e comercial. A folhosa apresentou resistência elevada ao cisalhamento rolante, superando tanto em resistência quanto na rigidez, o *Pinus spp.* nos ensaios de cisalhamento por compressão e flexão longitudinal. Assim, o uso de uma folhosa de maior desempenho pode contribuir para reduzir deformações de serviço e para viabilizar seções

transversais mais esbeltas, desde que o dimensionamento considere corretamente a diferença entre as propriedades intrínsecas da madeira e a resposta aparente do painel.

Embora a análise fenomenológica visual tenha revelado maior suscetibilidade do eucalipto à delaminação interfacial (presente em 11 de 12 amostras sob compressão) devido à restrição à penetração profunda do adesivo em lenhos densos, essa fragilidade secundária não comprometeu a sua superioridade de carga e pode ser contornada industrialmente mediante ajustes na gramatura do adesivo e aumentando pressão de prensagem.

Em síntese, o *Eucalyptus spp.* constitui alternativa promissora ao *Pinus spp.* para a produção de MLCC estrutural. Essa conclusão, contudo, é delimitada pelos materiais, pela arquitetura do painel e pelos procedimentos experimentais adotados nesta pesquisa. A transferência dos resultados para outras classes de madeira, espessuras de lamela, geometrias de painel e condições de umidade requer validação experimental adicional.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o intuito de expandir o domínio de conhecimento sobre a temática e preencher as lacunas técnicas remanescentes na engenharia de produtos engenheirados nacionais, sugerem-se os seguintes desdobramentos de pesquisa:

- **Mapeamento de adesivos alternativos:** Investigar o desempenho de diferentes formulações químicas de adesivos estruturais associadas a variações de gramatura e pressões de prensagem, visando mitigar o efeito secundário de delaminação observado nas lamelas de *Eucalyptus*.
- **Desenvolvimento de fatores de ajuste para parâmetros de flexão em ELS:** Propor coeficientes de correção que calibrem a transição entre o módulo de cisalhamento rolante intrínseco (obtido por compressão normativa) e o aparente (obtido por flexão transversal), mitigando o mascaramento provocado pela rigidez flexural das capas longitudinais externas, de modo a prevenir subestimativas e superestimativas severas na predição de flechas em condições de serviço (ELS).

- **Formulação de modelos analíticos multiaxiais para ensaios de compressão:** Adequar as equações unidimensionais de viga consagradas pela literatura (Métodos Gamma, K e Analogia de Cisalhamento) para que passem a computar os efeitos de confinamento cinemático e esmagamento perpendicular concomitante decorrentes do encapsulamento.

REFERÊNCIAS

ABED, Joseph *et al.* A Review of the Performance and Benefits of Mass Timber as an Alternative to Concrete and Steel for Improving the Sustainability of Structures. **Sustainability (Switzerland)**, v. 14, n. 9, 1 maio 2022.

ABNT. **NBR 7190-7**. BrasilABNT, , 2022a. Disponível em: <www.abnt.org.br>

ABNT. **NBR 7190**. BrasilAssociação Brasileira de Normas Técnicas, , 2022b. Disponível em: <www.abnt.org.br>

AICHER, Simon; CHRISTIAN, Zachary; HIRSCH, Maren. Rolling shear modulus and strength of beech wood laminations. **Holzforschung**, v. 70, n. 8, p. 773–781, 1 ago. 2016.

AICHER, Simon; DILL-LANGER, Gerhard. BASIC CONSIDERATIONS TO ROLLING SHEAR MODULUS IN WOODEN BOARDS. **Otto-Graf**, v. 11, p. 1–10, 2000.

AKTER, Shaheda T.; BINDER, Eva; BADER, Thomas K. Moisture and short-term time-dependent behavior of Norway spruce clear wood under compression perpendicular to the grain and rolling shear. **Wood Material Science and Engineering**, v. 18, n. 2, p. 580–593, 2023.

ALFONSO LARA PALMA, Hernando; WAGNER BALLARIN, Adriano. PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE PAINÉIS LVL DE EUCALYPTUS GRANDIS. **Ciência Florestal**, v. 21, n. 3, p. 559–566, 2011.

AMMANN, Samuel *et al.* Quality assessment of glued ash wood for construction engineering. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 74, n. 1, p. 67–74, 1 jan. 2016.

AMORIM, Silvia Teixeira Andrade; MANTILLA, Judy Norka Rodo; CARRASCO, Edgar Vladimiro Mantilla. A madeira laminada cruzada: Aspectos tecnológicos, construtivos e de dimensionamento. **Revista Materia**, v. 22, 2017.

APRE. **Estudo Setorial APRE 2024**. Curitiba, PR: [S.n.].

ASTM. ASTM D198-15. . dez. 2015, p. 1–28.

BADER, Thomas K.; EBERHARDSTEINER, Josef; DE BORST, Karin. Shear stiffness and its relation to the microstructure of 10 European and tropical hardwood species. **Wood Material Science & Engineering**, p. 1–10, 14 abr. 2015.

BAEK, Seung-Youp; SONG, Yo-Jin; HONG, Soon il. Shear Strength of Cross Laminated Timber Based on Larch Lamina Combination. **BioResources**, v. 19, n. 3, p. 4366–4380, 2024.

BALLARIN, ADRIANO WAGNER; PALMA, HERNANDO ALFONSO LARA. PROPRIEDADES DE RESISTÊNCIA E RIGIDEZ DA MADEIRA JUVENIL E ADULTA

DE Pinus taeda L. v. 27, n. 3, p. 371–380, 12 maio 2003.

BARROS, Cassiano; MASCIA, Nilson Tadeu; VILELA, Ramon. Sobre o efeito Rolling Shear em elementos de Cross Laminated Timber: Uma breve revisão de literatura. *In*: Goiânia: out. 2022. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/374113702>>

BIDAKOV, Andrii *et al.* Rolling shear strength of timber boards. **Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University**, v. 0, n. 89, p. 82, 19 dez. 2020.

BRANDNER, R. *et al.* Cross laminated timber (CLT): overview and development. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 74, n. 3, p. 331–351, 1 maio 2016.

BSI, BRITISH STANDARD INSTITUTION. **BS EN 16351:2015**. Inglaterra, 31 out. 2015.

BÜYÜKSARI, Ümit; AS, Nusret; DÜNDAR, Türker. Mechanical Properties of Earlywood and Latewood Sections of Scots Pine Wood. **BioResources**, v. 12, n. 2, p. 4004–4012, 17 abr. 2017.

CAO, Yawei *et al.* Evaluation of the effect of knots on rolling shear strength of cross laminated timber (CLT). **Construction and Building Materials**, v. 222, p. 579–587, 20 out. 2019.

CHERRY, Rebecca *et al.* **Out-of-grade sawn pine: A state-of-the-art review on challenges and new opportunities in cross laminated timber (CLT)**. **Construction and Building Materials** Elsevier Ltd, , 30 jun. 2019.

CHURKINA, Galina *et al.* Buildings as a global carbon sink. **Nature Sustainability** **2020 3:4**, v. 3, n. 4, p. 269–276, 27 jan. 2020.

CRISTINA, Vanessa *et al.* A STUDY OF THE BONDING OF WOOD FROM Eucalyptus grandis W. Hill ex Maiden USING RESORCINOL-FORMALDEHYDE ADHESIVE ESTUDO DA COLAGEM DA MADEIRA DE Eucalyptus grandis W. Hill ex Maiden COM ADESIVO RESORCINOL-FORMALDEÍDO. **Cerne**, v. 16, n. 4, p. 443–449, 29 jul. 2010.

DAS, Atanu Kumar *et al.* Physical and mechanical properties of Albizia procera glulam beam. **Heliyon**, v. 9, n. 8, 1 ago. 2023.

DE ARAÚJO, ROSANNE TEIXEIRA. Alternativas sustentáveis de uso da madeira na construção civil. v. 1, p. 1–15, jan. 2013.

DE ARAUJO, Victor Almeida *et al.* Importância da madeira de florestas plantadas para a indústria de manufaturados. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 37, n. 90, p. 189, 30 jun. 2017.

DE ARAUJO, Victor; CHRISTOFORO, André. The Global Cross-Laminated Timber (CLT) Industry: A Systematic Review and a Sectoral Survey of Its Main Developers.

Sustainability (Switzerland), v. 15, n. 10, 1 maio 2023.

DE VECHI, Anderson; MAGALHÃES JÚNIOR. ASPECTOS POSITIVOS E NEGATIVOS DA CULTURA DO EUCALIPTO E OS EFEITOS AMBIENTAIS DO SEU CULTIVO. **Revista Valore**, v. 3, n. 1, p. 496–506, jun. 2018.

EHRHART, T.; BRANDNER, R. Rolling shear: Test configurations and properties of some European soft- and hardwood species. **Engineering Structures**, v. 172, p. 554–572, 1 out. 2018.

EHRHART, Thomas ;. *et al.* Rolling Shear Properties of some European Timber Species with Focus on Cross Laminated Timber (CLT): Test Configuration and Parameter Study. *In*: Zurich: ETHZurich, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010548168>>

ESPINOZA, Omar *et al.* Cross-laminated timber. **BioResources**, v. 11, n. 1, p. 281–295, 2016.

ESTABROOKS, Daniel. **Pinus elliotti**. Disponível em: <<https://www.inaturalist.org/photos/65103591?size=medium>>. Acesso em: 16 fev. 2026.

ETTELAEI, Azin *et al.* Rolling Shear Properties of Cross-Laminated Timber Made from Australian Plantation Eucalyptus nitens under Planar Shear Test. **Forests**, v. 13, n. 1, 1 jan. 2022.

ETTELAEI, Azin; TAOUM, Assaad; NOLAN, Gregory. Rolling shear properties of cross-laminated timber made of fibre-managed plantation eucalyptus under short-span bending. **Wood Material Science & Engineering**, v. 17, n. 6, p. 744–751, 2 nov. 2022.

FRANZONI, Lorenzo *et al.* Influence of orientation and number of layers on the elastic response and failure modes on CLT floors: modeling and parameter studies. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 2, n. 2, p. 671–684, 25 abr. 2016.

GERMANO VASQUES, André *et al.* UMA SÍNTESE DA CONTRIBUIÇÃO DO GÊNERO Pinus PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL NO SUL DO BRASIL. **FLORESTA**, v. 37, n. 3, p. 445–450, 26 abr. 2007.

GONÇALVES, RAQUEL; NÉRI, ANTÔNIO CARLOS. ORTHOGONAL CUTTING FORCES IN JUVENILE AND MATURE PINUS TAEDA WOOD FORÇAS DE CORTE ORTOGONAL NA MADEIRA JUVENIL E ADULTA DE PINUS TAEDA. **Sci. Agric**, v. 4, p. 310–318, ago. 2005.

GREEN, David W.; WINANDY, Jerrold E.; KRETSCHMANN, David E. **Mechanical Properties of Wood**. [S.l.: S.n.].

GUI, Tao *et al.* Influence of aspect ratio on rolling shear properties of fast-grown small diameter eucalyptus lumber. **Journal of Renewable Materials**, v. 8, n. 9, p. 1053–

1066, 2020.

GUTIERREZ, Mateo *et al.* Structural Properties of Commercial Australian Plantation Hardwood CLT. **Buildings**, v. 13, n. 1, 1 jan. 2023.

HASSAN, Osama A. B.; ÖBERG, Fredrik; GEZELIUS, Emil. **Cross-laminated timber flooring and concrete slab flooring: A comparative study of structural design, economic and environmental consequences**. **Journal of Building Engineering** Elsevier Ltd, , 1 nov. 2019.

HE, Minjuan; SUN, Xiaofeng; LI, Zheng. Bending and compressive properties of cross-laminated timber (CLT) panels made from Canadian hemlock. **Construction and Building Materials**, v. 185, p. 175–183, 10 out. 2018.

HUANG, Zirui *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**, v. 69, n. 1, 1 dez. 2023.

IBÁ. **Relatório Anual 2024**. Disponível em: <<https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio2024.pdf>>. Acesso em: 11 jan. 2025.

JELEČ, Mario; VAREVAC, Damir; RAJČIĆ, Vlatka. **Križno lamelirano drvo (CLT) - pregled stanja područja**. **Gradjevinar** Union of Croatian Civil Engineers and Technicians, , 2018.

JONASSON, Johannes; PERSSON, Peter; DANIELSSON, Henrik. Mitigating footfall-induced vibrations in cross-laminated timber floor-panels by using beech or birch. **Journal of Building Engineering**, v. 86, 1 jun. 2024.

JUNIOR, CLAUDIO NUERNBERG. **ANÁLISE NUMÉRICA DE PAINÉIS DE MADEIRA LAMINADA COLADA CRUZADA SOLICITADOS À FLEXÃO PERPENDICULAR AO PLANO**. Dissertação—Maringá: Universidade Estadual de Maringá, 2020.

KARACABEYLI, Erol; GAGNON, Sylvain. **Canadian CLT Handbook**. 2019. ed. Québec: FPIInnovations, 2019. v. 1

KELLY, CK. **Pinus Taeda**. Disponível em: <<https://www.inaturalist.org/photos/91188120?size=medium>>. Acesso em: 16 fev. 2026.

KLOCK, Umberto. **QUALIDADE DA MADEIRA JUVENIL DE Pinus maximinoi H. E. MOORE**. Tese—Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 23 nov. 2000.

KRAUSS, Andrzej *et al.* DIFFERENCES IN THE MECHANICAL PROPERTIES OF EARLY AND LATEWOOD WITHIN INDIVIDUAL ANNUAL RINGS IN DOMINANT PINE TREE (PINUS SYLVESTRIS L.). **Wood Research**, v. 1, n. 56, p. 1–12, 2011.

KUMAR, Chandan *et al.* Investigating Factors Influencing Rolling Shear Performance

of Australian CLT Feedstock. **Forests**, v. 14, n. 4, 1 abr. 2023.

LEITE, T. M.; SÁNCHEZ, J. M.; BLUMENSCHNEIN, R. O processo produtivo de painéis estruturais em cross laminated timber: potencialidades e desafios de implantação na construção civil brasileira. *In*: São Carlos: Clem, 2018. Disponível em:

<https://www.researchgate.net/publication/324441211_O_processo_produtivo_de_painéis_estruturais_em_cross_laminated_timber_potencialidades_e_desafios_de_implantacao_na_construcao_civil_brasileira>. Acesso em: 21 abr. 2024

LI, Hao *et al.* **Cross-laminated Timber (CLT) in China: A State-of-the-Art**. **Journal of Bioresources and Bioproducts** KeAi Communications Co., , 1 fev. 2019.

LI, Minghao. Evaluating rolling shear strength properties of cross-laminated timber by short-span bending tests and modified planar shear tests. **Journal of Wood Science**, v. 63, n. 4, p. 331–337, 1 ago. 2017.

LI, Xin *et al.* Experimental and numerical study on bending properties of heterogeneous lamella layups in cross laminated timber using Australian Radiata Pine. **Construction and Building Materials**, v. 247, 30 jun. 2020.

LI, Xin *et al.* Rolling shear properties of cross-laminated timber (CLT) made from Australian Radiata Pine – An experimental study. **Structures**, v. 33, p. 423–432, 1 out. 2021.

LI, Yuan; LAM, Frank. Low cycle fatigue tests and damage accumulation models on the rolling shear strength of cross-laminated timber. **Journal of Wood Science**, v. 62, n. 3, p. 251–262, 1 jun. 2016.

LOIOLA, Pedro Lício *et al.* PHYSICAL PROPERTIES OF THE WOOD *Pinus caribaea* var. *caribaea*, *Pinus caribaea* var. *hondurensis* AND *Pinus oocarpa* for pencil production. **FLORESTA**, v. 51, n. 2, p. 354–362, 10 dez. 2019.

LUEDTKE, Jan *et al.* 1C-PUR-bonded hardwoods for engineered wood products: influence of selected processing parameters. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 73, n. 2, p. 167–178, 1 mar. 2015.

MANIA, P.; NOWICKI, M. Nanohardness and elasticity of cell walls of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) juvenile and mature wood. **BULLETIN OF THE POLISH ACADEMY OF SCIENCES TECHNICAL SCIENCES**, v. 68, n. 5, p. 1237–1241, out. 2020.

MANSFIELD, Shawn D. *et al.* Revisiting the transition between juvenile and mature wood: a comparison of fibre length, microfibril angle and relative wood density in lodgepole pine. **Holzforschung**, v. 63, n. 4, p. 449–456, 1 jul. 2009.

MANTILLA CARRASCO, Edgar Vladimiro; BREMER, Cynara Fiedler; RODO DE MANTILLA, Judy Norka. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO ESTRUTURAL DE PAREDES DE MADEIRA LAMINADA COLADA. **MIX Sustentável**, v. 6, n. 3, p. 83–90, 18 jun. 2020.

MARINI, Lucas José *et al.* Estimation of mechanical properties in Eucalyptus woods towards physical and anatomical parameters. **Construction and Building Materials**, v. 352, 17 out. 2022.

MELO JÚNIOR, João Carlos Ferreira de; BOLGENHAGEN, Adriano; SELLIN, Noeli. Avaliação comparada dos parâmetros físico anatômicos que influenciam na colagem lateral de painéis de madeira de Pinus Elliottii e Pinus Taeda. **Revista Brasileira de Contabilidade e Gestão**, v. 10, n. 19, p. 031–048, 22 dez. 2021.

MICROSOFT CORPORATION. **Microsoft Excel 365**. Microsoft, , jan. 2026.

MILLER, Z. D. *et al.* Anatomical, physical, and mechanical properties of transgenic loblolly pine (*Pinus taeda* L.) modified for increased density. **Wood and Fiber Science**, v. 51, n. 2, p. 173–182, 2019.

MIOTTO, Karolinne. **ANÁLISE NUMÉRICA DO EFEITO ROLLING SHEAR EM LAMELAS DE PAINÉIS DE CLT**. Dissertação—[S.l.]: UEM - Universidade Estadual de Maringá, 2023.

MOLINA, Julio Cesar *et al.* **RESISTÊNCIA E RIGIDEZ AO ROLLING SHEAR EM ELEMENTOS DE CLT SEGUNDO O MÉTODO DE ENSAIO ABNT NBR 7190-7:2022**. São Paulo: [S.n.].

MUSTEFAGA, Erick Chagas *et al.* Physico-mechanical characterization of pine juvenile wood. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, v. 47, n. 123, p. 472–481, 2019.

NARLOCH, Tamyres Blenke; LIBRELOTTO, Lisiane Ilha. Sustentabilidade e industrialização: os impactos da pré-fabricação no consumo de madeira Sustainability and industrialization: the impacts of prefabrication on wood consumption. **Mix sustentável**, v. 4, n. 1, p. 51–58, 2018.

NASCIMENTO, Alexandre Miguel Do *et al.* **ADHESION QUALITY OF GLUED JOINTS FROM DIFFERENT COMMERCIAL WOOD SPECIES**. Lavras: [S.n.].

NERO, Richard; CHRISTOPHER, Philip; NGO, Tuan. Investigation of rolling shear properties of cross-laminated timber (CLT) and comparison of experimental approaches. **Construction and Building Materials**, v. 316, 17 jan. 2022.

OLIVEIRA, S. L. **INTERAÇÃO DA ESPÉCIE DE MADEIRA E DO TIPO DE ADESIVO NA QUALIDADE DA MADEIRA LAMINADA COLADA**. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2016.

PALERMO, G. P. de M. *et al.* Anatomical properties of Eucalyptus grandis wood and transition age between the juvenile and mature woods. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 73, n. 6, p. 775–780, 1 nov. 2015.

PAN, Yude *et al.* A large and persistent carbon sink in the world's forests. **Science**, v. 333, n. 6045, p. 988–993, 2011.

PANGH, Halimeh *et al.* Flexural performance of cross-laminated timber constructed from fibre-managed plantation eucalyptus. **Construction and Building Materials**, v. 208, p. 535–542, 30 maio 2019.

PASSARELI, Rafael Novais. **CROSS LAMINATED TIMBER: DIRETRIZES PARA PROJETO DE PAINEL MACIÇO EM MADEIRA NO ESTADO DE SÃO PAULO**. Dissertação—São Paulo: Universidade de São Paulo, 2013.

PASTERNAK, Rachel *et al.* What Is the Impact of Mass Timber Utilization on Climate and Forests? **Sustainability (Switzerland)**, v. 14, n. 2, 1 jan. 2022.

PEREIRA, Marcos Cesar de Moraes; CALIL JUNIOR, Carlito. Strength and Stiffness of Cross Laminated Timber (CLT) panels produced with Pinus and Eucalyptus: experimental and analytical comparisons. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 24, n. 4, 2019.

POPOVSKI, M. *et al.* **Canadian CLT Handbook**. [S.l.]: FPIInnovations, 2019. v. 1

PRADHAN, Suman *et al.* The effects of densification on rolling shear performance of southern yellow pine cross-laminated timber. **Construction and Building Materials**, v. 392, 15 ago. 2023.

PRADHAN, Suman *et al.* Influence of densification on structural performance and failure mode of cross-laminated timber under bending load. **BioResources**, v. 19, n. 2, p. 2342–2352, 2024.

RAMAGE, Michael H. *et al.* **The wood from the trees: The use of timber in construction**. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** Elsevier Ltd, , 1 fev. 2017.

RAMOS, Letícia Maria Alves *et al.* Radial variation of wood anatomical characters of Eucalyptus grandis W. Hill Ex Maiden and age of transition between adult and juvenile Wood. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, n. 39, p. 411–418, dez. 2011.

REN, Honghao *et al.* Literature Review on Development and Implementation of Cross-Laminated Timber. *In*: Gavle: Springer, maio 2023.

REN, Honghao *et al.* **A state-of-the-art review on connection systems, rolling shear performance, and sustainability assessment of cross-laminated timber**. **Engineering Structures** Elsevier Ltd, , 15 out. 2024.

RUAN, Gengmu; XIONG, Haibei; CHEN, Jiawei. Bending and rolling shear properties of cross-laminated timber fabricated with Canadian hemlock. **SDHM Structural Durability and Health Monitoring**, v. 13, n. 2, p. 227–246, 2019.

RUSSELL, Ann E. *et al.* Impacts of individual tree species on carbon dynamics in a moist tropical forest environment. **Ecological Applications**, v. 20, n. 4, p. 1087–1100, jun. 2010.

RUSSELL, Ann E.; KUMAR, B. Mohan. Forestry for a Low-Carbon Future: Integrating Forests and Wood Products Into Climate Change Strategies. **Environment**, v. 59, n. 2, p. 16–23, 4 mar. 2017.

SADEGH, Abassali Nouri; KIAEI, Majid. Formation of Juvenile/Mature Wood in *Pinus eldarica* medw and Related Wood Properties. **World Applied Sciences Journal**, v. 12, n. 4, p. 460–464, 2011.

SANDOLI, Antonio; CALDERONI, Bruno. The rolling shear influence on the out-of-plane behavior of CLT panels: A comparative analysis. **Buildings**, v. 10, n. 3, 1 mar. 2020.

SANTIAGO, Sabrina Barros *et al.* Colagem de madeira de eucalipto com adesivos naturais. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 23, n. 3, p. e12151, 18 out. 2018.

SHIRMOHAMMADLI, Younes *et al.* **One-component polyurethane adhesives in timber engineering applications: A review**. **International Journal of Adhesion and Adhesives** Elsevier Ltd, , 1 abr. 2023.

SILVA, João Vítor Felipe *et al.* Experimental and numerical analysis of specimen configurations for Cross Laminated timber on rolling shear stiffness and strength response. **Engineering Structures**, v. 284, 1 jun. 2023.

THELANDERSSON, Sven; LARSEN, Hans J. **Timber Engineering**. 1. ed. West sussex: JOHN WILEY & SONS, 2003.

UNEP. **2023 Global Status Report for Buildings and Construction: Beyond foundations - Mainstreaming sustainable solutions to cut emissions from the buildings sector**. Nairobi: United Nations Environment Programme, mar. 2024. Disponível em: <<https://wedocs.unep.org/20.500.11822/45095>>.

URBEM. **CLT - URBEM**. Disponível em: <<https://urbembr.com/madeira-engenheirada/#clt>>. Acesso em: 14 mar. 2025.

USDA. **Silvics Manual Volume 1: Conifers**. [S.l.: S.n.]. Disponível em: <http://na.fs.fed.us/spfo/pubs/silvics_manual/Volume_1/vol1_Table_of_contents.htm>.

VALERI, Sérgio Valiengo; CÉSAR DE PAULA, Rinaldo. **SÍNTESE DAS PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO GÊNERO PINUS**. Jaboticabal, ago. 2009.

VELLA, Rodney; HEITZMANN, Michael T.; REDMAN, Adam. Improving the Adhesion of High-Density Softwoods with Isocyanate Based Adhesives through Surface Incision. **BioResources**, v. 4, n. 14, p. 7751–7762, 2019.

VILELA, Ramon. Desempenho estrutural de placas de Cross Laminated Timber submetidas à flexão. 30 jan. 2020.

VILELA, Ramon; TADEU MASCIA, Nilson. **DESEMPENHO ESTRUTURAL DE PLACAS DE CROSS LAMINATED TIMBER SUBMETIDAS À FLEXÃO**.

Dissertação—Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 30 jan. 2020.

WIERUSZEWSKI, Marek; MAZELA, Bartłomiej. Cross Laminated Timber (CLT) as an Alternative Form of Construction Wood. **Drvna Industrija**, v. 68, n. 4, p. 359–367, 2017.

WU, Guofang; ZHONG, Yong; REN, Haiqing. Effects of grain pattern on the rolling shear properties of wood in cross-laminated timber. **Forests**, v. 12, n. 6, 1 jun. 2021.

YANG, Xiaobo *et al.* Effect of Eucalyptus forests on understory vegetation and soil quality. **Journal of Soils and Sediments**, v. 17, n. 9, p. 2383–2389, 1 set. 2017.

ZAIONTZ, Charles. **Real Statistics Resource Pack**. , jul. 2026.