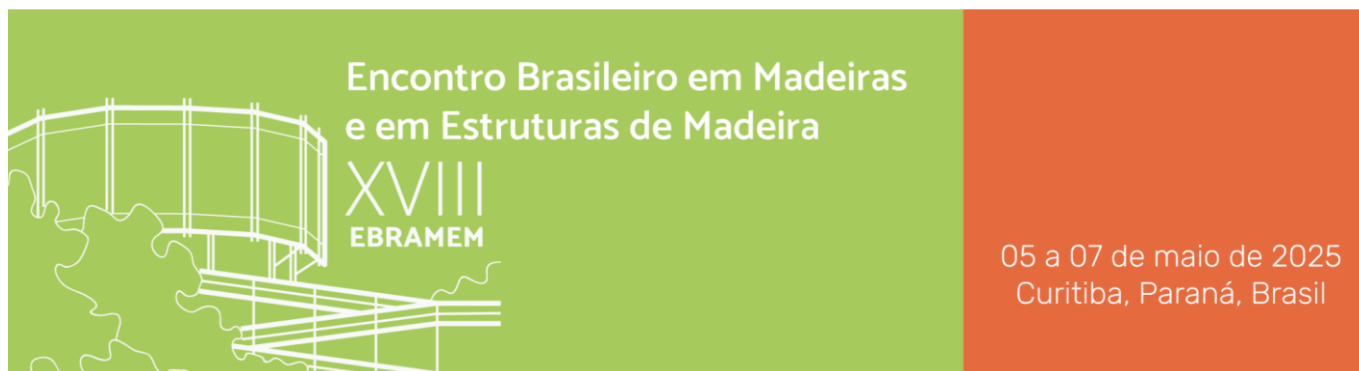




MODELAGEM NUMÉRICA DE MADEIRA LAMELADA COLADA CRUZADA DE *Pinus taeda* PROVENIENTE DE FLORESTAS PLANTADAS BRASILEIRAS

Matheus Zanghelini Teixeira^{1*}, Talitha Oliveira Rosa²; Rodrigo Figueiredo Terezo³; Setsuo Iwakiri², Rosilani Trianoski² e Rafael Holdorf Lopez¹.

*Autor de contato: matheus.zt@posgrad.ufsc.br.

¹ Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, Brasil

² Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR, Brasil

³ Departamento de Engenharia Florestal, Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages-SC, Brasil

RESUMO

A mitigação dos efeitos do aquecimento global é um desafio crítico, com o setor da construção desempenhando um papel fundamental. A Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC) surge como uma alternativa promissora para reduzir as emissões de CO₂ associadas à construção. Este estudo visa validar as propriedades físicas e mecânicas experimentais de painéis de MLCC feitos de *Pinus taeda* utilizando modelagem estrutural via Método dos Elementos Finitos (MEF). Testes experimentais e simulações de ensaios de flexão em quatro pontos foram comparados para avaliar a precisão do modelo numérico. Os resultados indicam que o MEF é uma ferramenta confiável para prever o comportamento estrutural dos painéis de MLCC, com uma diferença média de 13,35% entre os deslocamentos experimentais e numéricos. Os resultados ressaltam a importância da classificação mecânica das lamelas para reduzir a variabilidade, contribuindo para práticas construtivas mais sustentáveis no Brasil.

Palavras-chave: validação de propriedades, estruturas de madeira, simulação computacional, Método dos Elementos Finitos.

ABSTRACT

Mitigating the effects of global warming is a critical challenge, with the construction sector playing a key role. Cross-Laminated Timber (CLT) emerges as a promising alternative to reduce CO₂ emissions associated with construction. This study aims to validate the experimental physical and mechanical properties of CLT panels made from *Pinus taeda* using structural modeling via the Finite Element Method (FEM). Experimental tests and four-point bending test simulations were compared to evaluate the accuracy of the numerical model. The results indicate that FEM is a reliable tool for predicting the structural behavior of CLT panels, with an average difference of 13.35% between the experimental and numerical displacements. These findings highlight the importance of mechanical grading of lamellae to reduce variability, contributing to more sustainable construction practices in Brazil.

Keywords: validation of properties; timber structures; computational simulation; Finite Element Method.

1. INTRODUÇÃO

A mitigação dos efeitos do aquecimento global é um dos desafios mais urgentes da atualidade, e o setor da construção desempenha um papel crucial nesse cenário. Segundo o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP), a construção civil é responsável por cerca de 30% de todo o consumo de energia global e por aproximadamente 27% das emissões de carbono mundial. Para alinhar-se com as metas do Acordo de Paris, que foi assinado por 196 nações e visa limitar o aquecimento global, o setor precisa alcançar a neutralidade de carbono até 2050. Isso implica uma redução de 98% nas emissões de carbono em relação aos níveis de 2020 (UNEP, 2022).

Neste contexto, a Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC) surge como uma alternativa promissora para mitigar as emissões de CO₂ associadas ao setor da construção civil. De acordo com Ruuska (2013), um estudo realizado na Europa demonstrou que o uso de painéis de MLCC pode resultar na absorção de aproximadamente 1,611 kg de CO₂ por kg de material, o que significa que esses painéis podem capturar pelo menos 150% de carbono em relação ao seu peso. Este efeito ocorre devido ao ciclo de crescimento da madeira e ao processo de produção dos painéis, que consome menos energia e gera menos resíduos comparado a materiais convencionais como o aço e o concreto, ambos grandes emissores de CO₂.

Os painéis de MLCC tiveram sua primeira patente registrada em 1985 na França, mas foi durante os anos 1990, na Alemanha e na Áustria, que sua aplicação começou a se difundir amplamente (Fink et al., 2018; Sanborn et al., 2019). No Brasil, essa tecnologia é mais recente, com os painéis sendo produzidos a partir de madeiras oriundas de florestas plantadas sob manejo sustentável. O país, que é o décimo maior produtor mundial de madeira serrada, com 8 milhões de m³, destaca-se no uso do *Pinus*, que ocupa a segunda maior área de florestas plantadas, com 1,9 milhão de hectares (Ibá, 2023).

A alta taxa de crescimento das florestas brasileiras impacta diretamente as propriedades físicas e mecânicas da madeira utilizada, como o *Pinus*, resultando em características que podem diferir das encontradas em madeiras cultivadas em outros locais. Assim, estudos específicos sobre a viabilidade de painéis MLCC feitos de *Pinus spp.* no Brasil, como os realizados por Rosa (2023), Terezo et al. (2023), Vilela e Mascia (2021), Lucena et al. (2019) e Ecker et al. (2017), são essenciais para adaptar a tecnologia às condições nacionais.

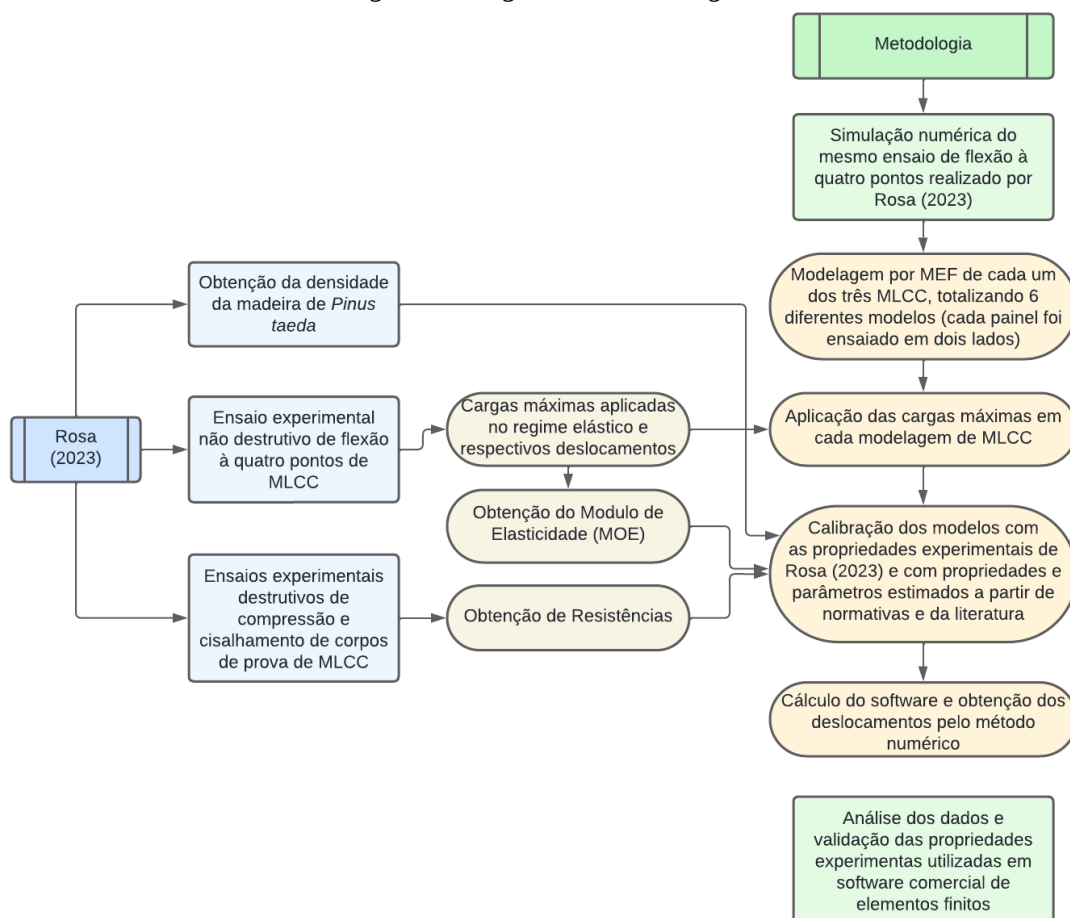
O Método dos Elementos Finitos (MEF) tem sido amplamente utilizado para prever o comportamento estrutural de MLCC, permitindo simulações detalhadas que podem ser comparadas com resultados experimentais, como ensaios de flexão estática, para validar as propriedades dos painéis. Vilela (2020) alerta que o uso de propriedades normativas deve ser feito com cautela, pois estudos demonstraram discrepâncias significativas entre os valores experimentais e aqueles previstos por normas brasileiras e europeias. Portanto, é recomendável a classificação experimental das propriedades físicas e mecânicas dos materiais para garantir a precisão dos modelos numéricos.

Considerando a influência das condições de cultivo nas propriedades da madeira e a falta de estudos abrangentes sobre as espécies brasileiras utilizadas em MLCC, torna-se urgente a realização de pesquisas que explorem esses aspectos. A aplicação do MEF, com sua praticidade e baixo custo computacional, é um recurso valioso, mas deve ser constantemente validado contra métodos experimentais para assegurar a precisão das simulações. O objetivo deste estudo, portanto, é validar as propriedades físicas e mecânicas experimentais de MLCC de *Pinus taeda* utilizando a modelagem estrutural via MEF, contribuindo assim para o desenvolvimento sustentável da construção civil no Brasil.

2. MATERIAL E MÉTODOS

As propriedades físicas e mecânicas da madeira e dos painéis MLCC, utilizadas nas modelagens deste artigo, foram obtidas experimentalmente e são provenientes da tese de doutoramento de Rosa (2023). A modelagem via MEF simulou o ensaio não destrutivo de flexão à quatro pontos dos MLCC em tamanho estrutural, que foi realizado de forma experimental por Rosa (2023), e a validação das propriedades se deu ao comparar os deslocamentos obtidos entre os métodos experimental e de elementos finitos. O diagrama a seguir representa brevemente a metodologia deste trabalho.

Figura 1 – Diagrama da metodologia



Fonte: os autores.

Em 2.1, estão descritos brevemente os procedimentos experimentais de Rosa (2023) para a produção dos MLCC e realização dos ensaios, dando maior ênfase no ensaio de flexão a ser simulado via MEF, e em 2.2 são apresentadas as estimativas de outras propriedades necessárias para a modelagem, a modelagem estrutural dos MLCC e suas especificações em um *software* comercial de elementos finitos.

2.1 Madeira e Painéis MLCC Experimentais de *Pinus taeda*

Neste tópico, constam brevemente a origem da madeira de *Pinus taeda* e a produção e os ensaios dos painéis MLCC realizados por Rosa (2023) para obtenção de parâmetros experimentais utilizados nas modelagens numéricas estruturais.

2.1.1 Origem e densidade da madeira de *Pinus taeda*

A madeira de *Pinus taeda* foi proveniente de 40 toras, com cerca de 30 anos, doadas por uma serraria localizada em Capão Alto, Santa Catarina, Brasil. As toras foram obtidas de florestas comerciais situadas no município de Campo Belo do Sul, Santa Catarina. A área de origem das toras está geograficamente situada na latitude 27° 53' 55" S e longitude 50° 45' 26" W, com classificação climática Cfb segundo a classificação de Köppen. Das 40 toras, cinco possuíam um diâmetro entre 250 e 350 mm; cinco tinham entre 350 e 450 mm; e 30 tinham diâmetro entre 430 e 550 mm. O comprimento das toras variou de 3050 a 3090 mm.

A densidade aparente das tábuas foi determinada no teor de umidade médio de 12% e seguiu as recomendações da EN 384 (2004), a qual resultou num valor médio de 520 kg/m³ (Rosa, 2023).

2.1.2 Produção experimental dos painéis de MLCC

Rosa (2023) buscou avaliar a resistência e a rigidez de MLCC com diferentes configurações das camadas externas e internas, totalizando quatro tratamentos. Para cada tratamento, a autora produziu três painéis MLCC de três camadas de *P. taeda*, cada um composto por uma configuração de lamelas classificadas mecanicamente pelo MOE. As lamelas passaram por teste de flexão não destrutivo à três pontos e foram classificadas nas classes de resistência determinadas pela norma europeia EN 338 (2016).

O processo produtivo dos painéis seguiu as seguintes etapas: (i) classificação mecânica das lamelas de madeira serrada, com largura média de 147 mm, provenientes do desdobro das toras e da secagem em estufa; (ii) aplainamento para calibração das peças em aproximadamente 20 mm; (iii) destopo das peças das camadas externas e da camada interna; (iv) aplicação do adesivo poliuretano (PUR 501.0 da Kleiberit®) em gramatura de 200 g/m² em linha simples; (v) montagem dos painéis de forma cruzada; (vi) prensagem à temperatura ambiente por 24 horas sob pressão de aproximadamente 1,0 MPa; (vii) esquadreamento para regularização das bordas e; (viii) climatização até massa constante, ou seja, até 12% de umidade.

Dentre os quatro tratamentos, selecionou-se, para este artigo, os painéis do Tratamento 3 (T3) para a validação de suas propriedades via MEF, por fazer parte do padrão de configuração de painéis MLCC em algumas empresas europeias certificadas sob o EAD 130005-00-0304 (EAD, 2015). Os MLCC do T3 foram produzidos com lamelas de classe C16 e $\geq$ C18 nas camadas externas e com lamelas de classe C14 e C16 nas camadas internas, conforme a classificação estrutural da EN 338 (2016). O grupo estrutural C14 foi constituído por lamelas que possuem um módulo de elasticidade (MOE) entre 7.000 e 8.000 MPa; o grupo C16 compreendeu lamelas com um MOE variando entre 8.000 e 9.000 MPa; enquanto no grupo $\geq$ C18 foram incluídas lamelas das classes C18, C20 e C22, com valores de MOE entre 9.000 e 11.000 MPa.

A seguir, na Tabela 1, estão as dimensões finais dos MLCC experimentais do T3 feitos por Rosa (2023) e que neste estudo foram modelados via MEF.

Tabela 1 – Dimensões dos painéis MLCC experimentais que foram modelados.

Painel MLCC	Espessura Total (mm)	Comprimento (mm)	Largura (mm)
1	61,20	2060,00	753,00
2	61,00	2060,00	755,00
3	60,50	2030,00	764,00

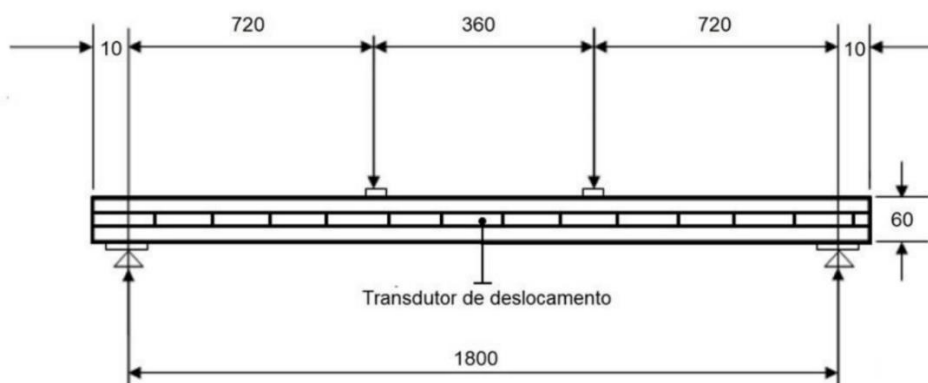
Fonte: Adaptado de Rosa (2023).

Os painéis em tamanho estrutural, conforme a Tabela 1, foram submetidos ao ensaio mecânico não destrutivo de flexão à quatro pontos para obtenção dos deslocamentos verticais e do MOE. Neste artigo, a validação das propriedades se dá pela simulação numérica deste ensaio dos MLCC e comparação entre os deslocamentos obtidos pelos métodos experimental e MEF. Sendo assim, o tópico 2.1.3 apresenta com mais detalhes o ensaio de flexão estática dos painéis.

2.1.3 Ensaio não destrutivo de flexão estática dos MLCC

Os ensaios de flexão não destrutivos à quatro pontos foram conduzidos utilizando dois pontos de suporte e dois pontos de carregamento e seguiram as recomendações da norma EN 16351 (2015). O deslocamento dos painéis foi monitorizado em ambos os lados por meio de transdutores indutivos (WA[®] 50 mm), enquanto a força aplicada foi medida com uma célula de carga (U10M[®] 125 kN). Os dados foram registrados por um sistema de aquisição (Quantum-X[®]) e analisados com o software Catman Easy[®] (versão 1.9.0) da HBM[®] (Darmstadt, Alemanha) (ROSA, 2023). A Figura 2 ilustra a configuração de teste para o ensaio de flexão a quatro pontos nos painéis MLCC.

Figura 2 – Layout de teste de flexão experimental de MLCC à quatro pontos.



Fonte: Rosa (2023).

Conforme a norma EN 408 (2012), o carregamento aplicado foi constante, com uma taxa de $10,8 \text{ mm.min}^{-1}$, limitado a 40% da capacidade total. O valor máximo de carregamento foi determinado com base em resultados de ensaios preliminares com painéis de *Pinus taeda*. Cada painel foi testado duas vezes (lado A e lado B), rotacionando o painel para alternar a camada externa na zona de maior esforço, e o MOE foi calculado pela média dos deslocamentos dos dois ensaios. O MOE médio calculado para cada MLCC do T3 está apresentado na Tabela 2. Os deslocamentos máximos de cada ensaio são apresentados juntamente com os resultados de deslocamentos obtidos pelo MEF, na seção 3.

Tabela 2 – Valores do MOE dos painéis de três camadas com a madeira de *Pinus taeda*.

Painel MLCC	MOE (MPa)
1	9.862,00
2	10.280,00
3	9.704,00

Fonte: Adaptado de Rosa (2023).

2.1.4 Ensaios destrutivos em corpos de prova dos MLCC

Os ensaios destrutivos para a obtenção da resistência à compressão paralela ao plano, da resistência à compressão perpendicular ao plano e do cisalhamento paralelo ao plano do painel foram executados por Rosa (2023), em corpos de prova provenientes dos MLCC ensaiados para obtenção do MOE não destrutivo. Os ensaios de compressão paralela ao eixo do painel e os respectivos corpos de prova seguiram as recomendações da norma EN 408 (2012). Os ensaios de compressão perpendicular ao plano do painel também foram conduzidos com base na norma europeia EN 408 (2012) e os corpos de prova tiveram a sua geometria adaptada com base no estudo de Brandner (2018). Os ensaios de cisalhamento foram conduzidos com base na norma europeia EN 16351 (2015) para ensaios de flexão. No entanto, o vão utilizado foi de 6h, conforme sugerido por estudos de Cao *et al.* (2019), Hosseinzadeh *et al.* (2020), Li (2017) e Li *et al.* (2019), com o objetivo de garantir a ruptura por cisalhamento. Já os ensaios para obter a

resistência à flexão seguiram as premissas da EN 408 (2012) e os corpos de prova foram dimensionados conforme a EN 16351 (2015) e EN 408 (2012). Na Tabela 3 estão os resultados em valores médios e os coeficientes de variação para as propriedades de resistência, conforme Rosa (2023).

Tabela 3 – Resistências de corpos de prova de MLCC que foram utilizados nas modelagens.

Propriedades	MOR	$f_{m,90}$	$f_{c,0}$	$f_{c,90}$	$f_{v,0}$
Valor Médio (MPa)	40,90	6,90	28,80	4,60	2,60
Coefficiente de Variação (%)	15,60	20,50	12,60	3,90	20,40

Legenda: MOR – resistência à flexão paralela ao plano do painel; $f_{m,90}$ – resistência à flexão perpendicular ao plano do painel; $f_{c,0}$ – resistência à compressão paralela ao plano do painel; $f_{c,90}$ – resistência à compressão perpendicular ao plano do painel; $f_{v,0}$ – resistência ao cisalhamento. Fonte: Adaptado de Rosa (2023).

2.2 Modelagem Numérica via Método dos Elementos Finitos

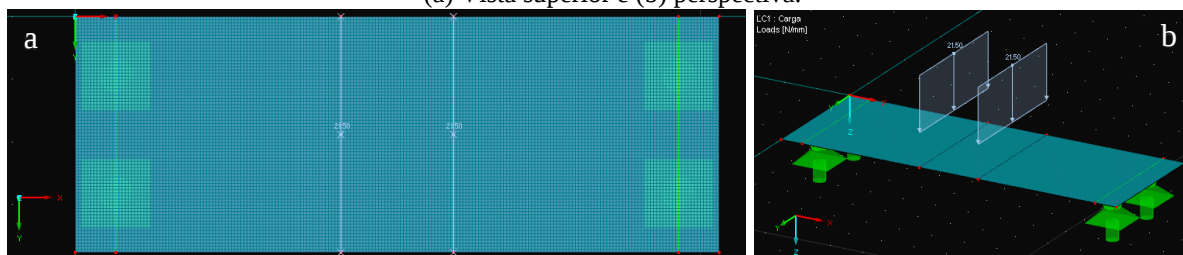
As modelagens numéricas estruturais dos painéis MLCC foram realizadas utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF) no *software* RFEM® da Dlubal®, versão 5.26, juntamente com o módulo adicional RF-Laminate®. Este módulo permite configurar superfícies como elementos lamelados e ortotrópicos. A análise foi conduzida com base na Teoria de Mindlin, recomendada para placas mais espessas, como os painéis MLCC, pois considera o efeito da deformação por cisalhamento ao longo da espessura.

Para simular o ensaio experimental de flexão à quatro pontos, as modelagens estruturais replicaram as condições experimentais, mantendo as mesmas dimensões dos painéis, o mesmo vão entre os apoios articulados e a mesma distância entre os pontos de aplicação de carga. Realizou-se seis modelagens, correspondendo a dois ensaios por painel MLCC, cada ensaio com um lado do painel em maior esforço.

A malha de elementos finitos no *software* foi composta por quadrângulos, com dimensões definidas cuidadosamente para garantir a precisão dos resultados em relação ao modelo real. Definiu-se uma malha de dimensões de 2 cm, pois se verificou que os resultados de deslocamento permaneceram consistentes com estes elementos, dado que malhas mais refinadas tendem a produzir resultados mais precisos.

Figura 3 – Modelo de elementos finitos com malha de 2 cm aplicada (Painel MLCC 1A).

(a) Vista superior e (b) perspectiva.



Fonte: os autores.

Após a definição da malha, foram inseridas no *software* as propriedades físicas e mecânicas obtidas por Rosa (2023), conforme visto nos subtópicos anteriores. Entretanto, a densidade obtida por Rosa (2023) foi a aparente à 12%, sendo que não é a densidade mais adequada para se utilizar em projetos estruturais. Sendo assim, utilizou-se a seguinte relação entre a densidade média aparente (ρ_{med}) e a densidade característica (ρ_k), conforme a NBR 7190-1 (2022):

$$\rho_k = \frac{\rho_{med}}{1,2} \quad (1)$$

Além dessas propriedades, o módulo RF-Laminate® foi alimentado com valores adicionais, como o Coeficiente de Poisson ν_{xy} , adotando o valor de 0,37 para coníferas, conforme sugerido por Bodig e Jayne (1982). Os módulos de rigidez também foram estimados com base nas relações propostas pelos mesmos autores, a partir do módulo de elasticidade na flexão:

$$G_{xy} : G_{xz} : G_{yz} \simeq 10 : 9,4 : 1 \quad (2)$$

$$MOE : G_{xy} \simeq 14 : 1 \quad (3)$$

Onde:

G_{xy} = módulo de rigidez no plano xy (MPa);

G_{xz} = módulo de rigidez no plano xz (MPa);

G_{yz} = módulo de rigidez no plano yz (MPa);

MOE = módulo de elasticidade à flexão paralela às fibras ou ao plano do painel (MPa).

Para as propriedades mecânicas de resistência e rigidez que não foram determinadas experimentalmente, utilizaram-se valores recomendados pela literatura e normas. A norma EN 16351 (2015) sugere um valor de resistência ao cisalhamento por rolamento (f_R) de 1,1 MPa para painéis cujas superfícies laterais das tábuas não são coladas, como no presente estudo. A resistência à tração perpendicular às fibras ($f_{t,90}$) foi estimada com base na EN 338 (2016) e na NBR 7190-1 (2022), utilizando um valor de 0,4 MPa para coníferas. Já a resistência à tração paralela às fibras ($f_{t,0}$), seguiu o cálculo de estimativa conforme a NBR 7190-3 (2022).

Além de definir e inserir estas propriedades, as modelagens consideraram o acoplamento entre as camadas, a ausência de colagem lateral das lamelas dos painéis, e a largura das tábuas de 147 mm. Devido à ausência de colagem lateral, o Eurocode 5 (CEN, 2004) recomenda a aplicação de um fator de redução de rigidez à torção de $K33 = 0,489$ e um fator de redução para as camadas de $K88 = 0,585$.

A seguir, na Tabela 4, está um resumo de todas as propriedades que foram inseridas nas modelagens dos painéis MLCC, incluindo as experimentais obtidas por Rosa (2023), as estimadas a partir das experimentais e as propriedades adotadas da literatura.

Tabela 4 – Resumo de todos os parâmetros utilizados nas modelagens.

Propriedades obtidas experimentalmente por Rosa (2023)					
MOE (MPa)	MOR (MPa)	$f_{m,90}$ (MPa)	$f_{c,0}$ (MPa)	$f_{c,90}$ (MPa)	$f_{v,0}$ (MPa)
9.862,00 (MLCC 1)	40,90	6,90	28,80	4,60	2,60
10.280,00 (MLCC 2)					
9.704,00 (MLCC 3)					
Propriedades estimadas com os parâmetros experimentais					
ρ_k (kg/m³)	$f_{t,0}$ (MPa)	G_{xy} (MPa)	G_{xz} (MPa)	G_{yz} (MPa)	
433,33	37,40	704,43 (MLCC 1)	662,16 (MLCC 1)	70,44 (MLCC 1)	
		734,29 (MLCC 2)	690,23 (MLCC 2)	73,43 (MLCC 2)	
		693,14 (MLCC 3)	651,55 (MLCC 3)	69,31 (MLCC 3)	
Parâmetros normativos e literários					
ν_{xy}	f_R	$f_{t,90}$	K33	K88	
0,37	1,10	0,40	0,489	0,585	

Legenda: MOE - módulo de elasticidade obtido a partir de ensaio à flexão não destrutivo; MOR - resistência à flexão paralela ao plano do painel; $f_{m,90}$ - resistência à flexão perpendicular ao plano do painel; $f_{c,0}$ - resistência à compressão paralela ao plano do painel; $f_{c,90}$ - resistência à compressão perpendicular ao plano do painel; $f_{v,0}$ - resistência ao cisalhamento; ρ_k - densidade característica da madeira; $f_{t,0}$ - resistência à tração paralela ao plano do painel; G_{xz} - módulo de rigidez no plano xz; G_{yz} - módulo de rigidez no plano yz; G_{xy} - módulo de rigidez no plano xy; ν_{xy} - coeficiente de Poisson; f_R - resistência ao cisalhamento por rolamento; $f_{t,90}$ - resistência à tração perpendicular ao plano do painel; k33 — fator de redução da rigidez torcional; K88 — fator de redução da rigidez da camada.

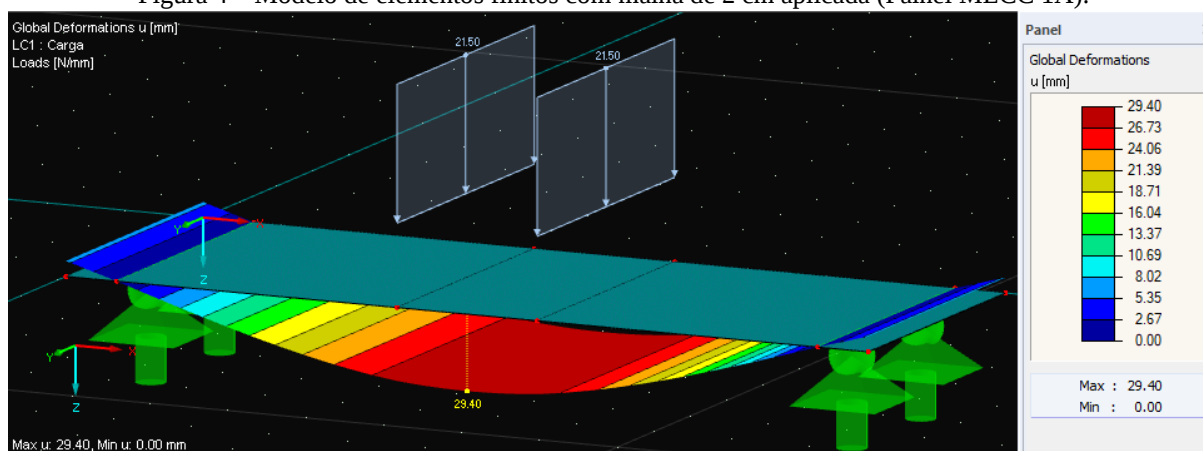
2.3 Análise dos Dados

A normalidade dos dados referentes ao deslocamento vertical, obtidos durante o ensaio experimental e numérico de flexão à quatro pontos, foi analisada utilizando o teste de Shapiro-Wilk e um diagrama quantil-quantil (Q-Q Plot). Para comparar os resultados entre os métodos experimental e numérico, foi aplicado o teste t para amostras independentes no software R[®] (versão 4.1.1), utilizando um nível de confiança de 95%.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os modelos numéricos estruturais desenvolvidos no software RFEM[®] forneceram uma análise detalhada dos deslocamentos verticais nos painéis de MLCC. A representação gráfica desses resultados, conforme um exemplo ilustrado na Figura 4, facilitou a visualização das deflexões nos painéis testados. A Tabela 4 resume as cargas máximas aplicadas no regime elástico e os deslocamentos observados, tanto no método experimental quanto no Método dos Elementos Finitos (MEF).

Figura 4 – Modelo de elementos finitos com malha de 2 cm aplicada (Painel MLCC 1A).



Fonte: os autores.

Tabela 5 – Deslocamentos verticais obtidos na simulação dos ensaios de flexão à quatro pontos pelo MEF em comparação com os obtidos no método experimental.

Painel MLCC	Carga Máxima Aplicada (kN)	Deslocamento Experimental (mm)	Deslocamento Numérico (mm)	Diferença entre métodos (%)
1A	32,376	26,00	29,40	13,08
1B	33,929	23,12	30,81	33,33
2A	35,597	29,00	31,23	7,69
2B	36,000	29,30	31,58	7,78
3A	32,170	33,18	30,21	8,95
3B	39,345	27,74	36,96	33,24
Média		28,06	31,70	13,35
Coefficiente de variação (%)		12,07	8,49	

Fonte: os autores.

Ao analisar os resultados, observou-se que o coeficiente de variação (CV) do método numérico foi relativamente baixo, enquanto o CV do método experimental foi considerado médio, com valor superior a 10%. Esta discrepância pode ser atribuída a várias razões. Primeiramente, a madeira é um material natural e anisotrópico, o que significa que suas propriedades variam em diferentes direções e podem conter defeitos internos, invisíveis externamente, que afetam o comportamento estrutural dos painéis. Além disso, o processo experimental está mais suscetível a erros humanos, tanto na produção quanto na execução dos ensaios, o que pode influenciar a precisão dos resultados obtidos.

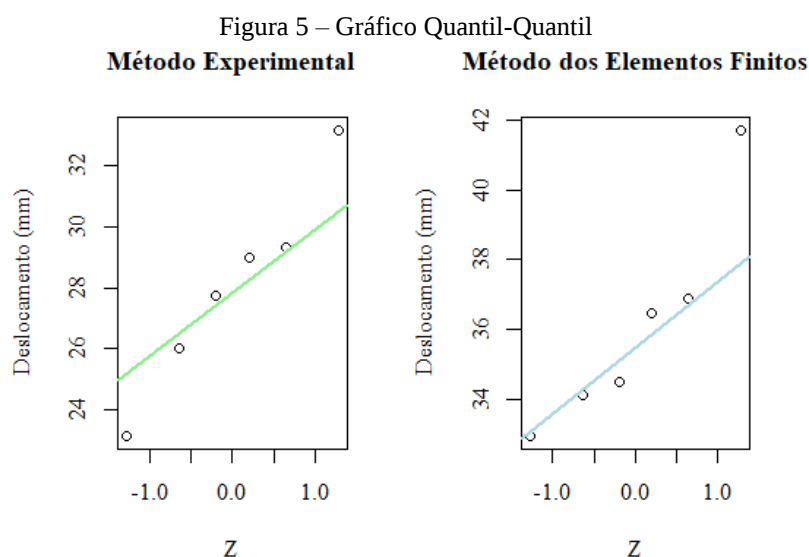
Comparando com outros estudos, Teixeira et al. (2023) realizaram ensaios de flexão em MLCC de *Eucalyptus benthamii* utilizando tanto o método experimental quanto o MEF. Eles relataram altos coeficientes de variação em ambos os métodos (41,36% no experimental e 18,70% no

numérico), atribuídos à falta de classificação mecânica das lamelas antes da composição dos painéis. Em conformidade, os resultados obtidos no presente estudo demonstram que a classificação mecânica das lamelas pode reduzir significativamente a variação, tornando os painéis mais homogêneos e resultando em coeficientes de variação mais baixos.

Adicionalmente, a diferença entre os deslocamentos experimentais e aqueles obtidos via MEF variou entre 7,69% e 33,33%, com uma média de 13,35%. Essa diferença é menor do que a encontrada por Teixeira et al. (2023), que reportaram uma diferença média de 21,61%, e também inferior à observada por Sciomenta et al. (2021), que investigaram painéis MLCC compostos por três camadas e relataram diferenças de 15% para painéis de uma única espécie de madeira e 22% para painéis compostos por duas espécies.

Além disso, de forma consistente com os resultados de Teixeira et al. (2023) e Wang et al. (2020), os deslocamentos médios obtidos pelo modelo numérico foram menores do que aqueles observados no ensaio experimental. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de que os defeitos da madeira não são considerados na modelagem numérica e pela maior precisão dos modelos de elementos finitos, que utilizam propriedades médias das lamelas e não estão sujeitos a erros de manuseio, ao contrário dos experimentos físicos.

Para verificar se havia uma diferença significativa entre os deslocamentos obtidos pelos dois métodos, foi realizada uma análise de normalidade dos dados, evidenciada pela linearidade dos gráficos Q-Q Plot (Figura 5). Para complementar a análise de normalidade, fez-se uma transformação logarítmica dos dados e foi realizado o teste de Shapiro-Wilk, o qual resultou em valores-p iguais a 0.9507 e 0.0518 para as amostras obtidas pelo método experimental e pelo método dos elementos finitos, respectivamente. Como os valores-p resultaram acima de 0.05, aceitou-se a hipótese nula de que não há diferença significativa entre as distribuições das duas amostras.



Fonte: os autores.

Com a normalidade dos dados confirmada, aplicou-se o teste t de Student com um nível de significância de 5%, resultando em um valor de p de 0,067. Isso representa a hipótese nula (H_0) aceita, indicando que não há diferença estatisticamente significativa entre os deslocamentos obtidos pelos métodos experimental e numérico.

4. CONCLUSÃO

Os resultados deste estudo sugerem que, embora existam variações nos valores absolutos dos deslocamentos, os métodos experimental e numérico apresentam resultados equivalentes, com o MEF se mostrando uma ferramenta confiável para prever o comportamento estrutural de painéis MLCC de *Pinus taeda*, especialmente quando as propriedades físicas e mecânicas são previamente validadas experimentalmente. Contudo, a natureza anisotrópica da madeira e as variações intrínsecas das suas propriedades destacam a importância de uma classificação mecânica rigorosa das lamelas para minimizar a variabilidade dos resultados. Este estudo contribui para o desenvolvimento de práticas construtivas mais sustentáveis no Brasil, reforçando o potencial da MLCC como uma alternativa viável e ambientalmente responsável no setor da construção civil.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da Universidade do Estado de Santa Catarina pela estrutura laboratorial, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES e à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação de Santa Catarina – FAPESC pelo apoio à pesquisa.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7190-1: **Projeto de estruturas de madeira - Parte 1: Critérios de dimensionamento**. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7190-3: **Projeto de Estruturas da Madeira - Parte 3: Métodos de Ensaio para Corpos de Prova Isentos de Defeitos para Madeiras de Florestas Nativas**. Rio de Janeiro, Brasil, 2022.

BODIG, J.; JAYNE, B.A. **Mechanics of Wood and Wood Composites**. Van Nostrand: Nova York, NY, EUA, 1982.

BRANDNER, R. Cross laminated timber (CLT) in compression perpendicular to plane: testing, properties, design and recommendations for harmonizing design provisions for structural timber products. **Engineering Structures**, v. 171, p. 944-960, 2018.

CAO, Y.; STREET, J.; LI, M.; LIM, H. Evaluation of the effect of knots on rolling shear strength of cross laminated timber (CLT). **Construction and Building Materials**, v. 222, p. 579-587, 2019.

ECKER, T. W. P.; MIOTTO, J. L.; TURMINA, G. Painéis de madeira laminada colada cruzada para lajes: avaliação experimental mecânica sob diferentes níveis de consumo de adesivo. **Ciência & Engenharia**, v. 26, n. 1, p. 17-25, 2017.

EUROPEAN ASSESSMENT DOCUMENT – EAD 130005-00-0304. **Solid wood slab elements to be used as a structural element in buildings**. EOTA, 14 p. 2015.

EUROPEAN STANDARD. EN 338: **Structural timber – strength classes**. United Kingdom, 16 p. 2016a.

EUROPEAN STANDARD. EN 384: **Structural timber – determination of characteristic values of mechanical properties and density**. United Kingdom, 18 p. 2004.

EUROPEAN STANDARD. EN 408: **Timber Structures – Structural timber and glued laminated timber – determination of some physical and mechanical properties**. United Kingdom, 42 p. 2012.

EUROPEAN STANDARD. EN 16351: **Timber structures: cross laminated timber: requirements**. United Kingdom, 2015.

FINK, G.; KOHLER, J.; BRANDNER, R. Application of european design principles to cross laminated timber. **Engineering Structures**, v. 171, p. 934-943, 2018.

HOSSEINZADEH, S.; MOHEBBY, M.; ELYASI, M. Bending performances and rolling shear strength of nail-cross-laminated timber. **Wood Material Science and Engineering**, v. 17, n. 2, p. 1-8, 2020.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ). **Relatório IBÁ 2023**. IBÁ: São Paulo, Brasil, 2023.

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

LI, M.; DONG, W.; LIM, H. Influence of lamination aspect ratios and test methods on rolling shear strength evaluation of cross laminated timber. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 31, n. 12, 2019.

LUCENA, R.; TEREZO, R.; VALLE, A.; RIGHEZ, J.; MOTTA, G. Confecção e análise de rigidez de painéis de madeira laminada colada cruzada de Pinus taeda. **Brazilian Journal of Technology**, Curitiba, v. 1, n. 2, p. 439-452, 2019.

ROSA, T. O. **Qualidade da madeira de Pinus taeda L. para a produção de painéis de madeira lamelada colada cruzada (MLCC)**. 2023. 273 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2023.

RUUSKA, A. **Carbon footprint for building products: ECO2 data for materials and products with the focus on wooden building products**. Finland: VTT Technology 115, 2013. 126 p.

SANBORN, K.; GENTRY, T.R.; KOCH, Z.; VALKENBURG, A.; CONLEY, C.; STEWART, L.K. Ballistic performance of cross laminated timber (CLT). **International Journal of Impact Engineering**, v. 128, p. 11-23, 2019.

SCIOMENTA, M.; EGIDIO, A.D.; BEDON, C.; FRAGIACOMO, M. Linear model to describe the working of a three layers CLT strip slab: Experimental and numerical validation. **Advances in Structural Engineering**, v. 24, p. 3118–3132, 2021.

TEIXEIRA, M.Z.; TEREZO, R.F.; DA CUNHA, A.B.; TOMIO, G.F.; COELHO, H.B.; CORRÊA, C.A. Validation of the physical and mechanical properties of *Eucalyptus benthamii* Maiden & Cambage wood and cross laminated timber panels using the finite element method. **Forests**, v. 15, p. 881, 2024.

TEREZO, R. F.; SAMPAIO, C. A. P.; CASTRO, A. S.; VALLE, A.; MORAES, P. D. Bending properties of cross-laminated timber panels produced with *Pinus taeda* from a mountain region in Santa Catarina, Brazil. **Floresta**, v. 53, n. 3, p. 299-304, 2023.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). **Global status report for buildings and construction: Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector**. Nairobi, 2022. 100 p.

VILELA, R. **Desempenho estrutural de placas de cross laminated timber submetidos à flexão**. 2020. 249 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2020.

VILELA, R.; MASCIA, N.T. Avaliação de propriedades mecânicas da madeira de *Pinus taeda* provenientes de placas de cross laminated timber. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 21, n. 4, p. 89-110, 2021.

WANG, J.; NING, F.; LI, J.; ZHU, H. Experimental study and finite element simulation analysis of the bending properties of Cross-Laminated Timber (CLT) two-way plates. **Journal of Engineering Science and Technology Review**, v. 13, p. 132–142, 2020.