

RESSALVA

Atendendo a solicitação do autor, o texto completo desta dissertação será disponibilizado somente a partir de 28/07/2026.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

SILVIO CESAR DE OLIVEIRA

**PROPOSTA DE CORREÇÃO AO MÉTODO GAMA PARA ESTIMATIVA DO
DESLOCAMENTO DE PLACAS DE CLT**

Ilha Solteira - SP
2025



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

SILVIO CESAR DE OLIVEIRA

**PROPOSTA DE CORREÇÃO AO MÉTODO GAMA PARA ESTIMATIVA DO
DESLOCAMENTO EM PLACAS DE CLT**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira, para obtenção do título de Mestre(a) em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Engenharia de Construção Civil

Orientador(a): Prof. Dr. Vinícius Borges de Moura Aquino

Ilha Solteira – SP

2025

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

- O48p Oliveira, Silvio Cesar de.
Proposta de correção ao método gama para estimativa do deslocamento de placas de CLT / Silvio Cesar de Oliveira. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2025
77 f. : il.
- Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira, 2025
- Orientador: Vinícius Borges De Moura Aquino
- Inclui bibliografia
1. Madeira laminada cruzada (CLT). 2. Correção do método gama. 3. Simulação numérica. 4. Estimativa de deslocamentos. 5. Cisalhamento transversal.

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

A proposta de correção do Método Gamma em placas de CLT busca avançar no conhecimento técnico, contribuindo para estimativas mais precisas e estruturas eficientes. Valoriza o uso sustentável da madeira e pode motivar revisões normativas alinhadas à evolução científica.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

The proposed correction to the Gamma Method for CLT panels aims to advance technical knowledge by contributing to more accurate estimates and efficient structural solutions. It reinforces the sustainable use of timber and may encourage normative revisions aligned with scientific developments.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Proposta de correção ao método gama para estimativa do deslocamento de placas CLT

AUTOR: SILVIO CESAR DE OLIVEIRA

ORIENTADOR: VINICIUS BORGES DE MOURA AQUINO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil, área: Engenharia de Construção Civil pela Comissão Examinadora:

 Documento assinado digitalmente
VINICIUS BORGES DE MOURA AQUINO
Data: 28/07/2025 11:44:16-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. VINICIUS BORGES DE MOURA AQUINO (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

 Documento assinado digitalmente
ANDRÉ LUIS CHRISTOFORO
Data: 28/07/2025 11:41:31-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. ANDRÉ LUIS CHRISTOFORO (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Civil / Universidade Federal de São Carlos - UFSCar

 Documento assinado digitalmente
JULIO CESAR MOLINA
Data: 28/07/2025 11:38:17-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. JULIO CESAR MOLINA (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia de Estruturas / Escola de Engenharia de São Carlos - USP

Ilha Solteira, 28 de julho de 2025

RESUMO

Esta dissertação propõe uma equação corretiva ao Método Gama para estimativa dos deslocamentos em painéis de CLT (Cross Laminated Timber), visando superar limitações relacionadas à ortotropia da madeira, à variabilidade geométrica dos painéis e à consideração unidimensional da rigidez à flexão. A equação tradicional presente na NBR 7190-1, apesar de consagrada, desconsidera efeitos tridimensionais da laminação cruzada, o que pode comprometer a precisão em casos com proporções geométricas elevadas ou carregamentos complexos. Para suprir essa lacuna, foram realizadas 240 simulações numéricas com Elementos Finitos tridimensionais (Abaqus®), considerando duas espécies de madeira (*Pinus taeda* e *Eucalyptus grandis*), três configurações de camadas, cinco comprimentos distintos e dois tipos de carregamento (concentrado e distribuído). A equação foi ajustada por regressão multivariável e verificada com base em métricas estatísticas como MAPE (erro percentual médio absoluto), RMSE (raiz do erro quadrático médio) e CV (coeficiente de variação), com desempenho médio robusto (MAPE < 2%; CV < 16,5%). A análise gráfica dos resíduos confirmou a ausência de viés sistemático. Além disso, a análise de Pareto demonstrou que variáveis geométricas, como espessura total e número de camadas, têm influência significativa sobre o fator de ajuste α , utilizado para correção da rigidez efetiva à flexão. A equação proposta apresentou desempenho superior ao Método Gama tradicional, especialmente para painéis de *Pinus taeda*, evidenciando que sua aplicação pode ser uma alternativa viável em análises estruturais de CLT, respeitando o intervalo das espécies e tipos de carregamento testado. Os resultados indicam que a abordagem corrigida oferece maior precisão para estimativas de deslocamento, contribuindo para maior confiabilidade em projetos com CLT.

Palavras-chave: Cross laminated timber (CLT); Correção do Método Gama; Simulação Numérica; Rigidez à Flexão; Regressão Estatística; Estimativa de Deslocamentos.

Palavras-chave: madeira laminada cruzada (CLT); correção do método gama; simulação numérica; estimativa de deslocamentos; cisalhamento transversal.

ABSTRACT

This dissertation proposes a corrective equation to the Gamma Method for estimating deflections in CLT (Cross-Laminated Timber) panels, aiming to overcome limitations related to the wood's orthotropy, the geometric variability of panels, and the one-dimensional consideration of bending stiffness. The traditional equation established in NBR 7190-1, although widely recognized, disregards the three-dimensional effects of cross lamination, which may compromise accuracy in cases with high geometric proportions or complex loading conditions. To address this gap, 240 three-dimensional Finite Element simulations (Abaqus®) were performed, considering two wood species (*Pinus taeda* and *Eucalyptus grandis*), three layer configurations, five distinct panel lengths, and two loading types (concentrated and distributed). The equation was fitted through multivariable regression and verified using statistical metrics such as MAPE (Mean Absolute Percentage Error), RMSE (Root Mean Square Error), and CV (Coefficient of Variation), achieving robust average performance (MAPE < 2%; CV < 16.5%). The residual plots confirmed the absence of systematic bias. Furthermore, the Pareto analysis demonstrated that geometric variables, such as total thickness and number of layers, have significant influence on the adjustment factor α , used for correcting the effective bending stiffness. The proposed equation showed superior performance compared to the traditional Gamma Method, especially for *Pinus taeda* panels, indicating that its application can be a viable alternative in CLT structural analyses, within the tested species and loading conditions. The results suggest that the corrected approach provides greater accuracy in displacement estimates, contributing to increased reliability in CLT design projects.

Keywords: cross-laminated timber (CLT); gamma method correction; numerical simulation; displacement estimation; transverse shear.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Placa CLT	21
Figura 2 - Ortotropia	25
Figura 3 – Rolling Shear.....	40
Figura 4 - Fluxograma se atividades	50
Figura 5 - Carregamento concentrado	54
Figura 6 - carregamento distribuído	55
Figura 7 - Malha do elemento finito.....	55
Figura 8 - Orientações das camadas	56
Figura 9 - Condição de Contorno	56
Figura 10 – Carregamento Concentrado.....	56
Figura 11 - Carregamento Distribuído	57
Figura 12 – Deslocamentos (mm)	58
Figura 13 - <i>Pinus taeda</i>	66
Figura 14 - <i>Eucalyptus grandis</i>	66
Figura 15 – Valores de α considerando G_{RT} das Tabela 1 e Tabela 2.....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades mecânicas da espécie <i>Pinus taeda</i>	53
Tabela 2 - Propriedades mecânicas da espécie <i>Eucalyptus grandis</i>	53
Tabela 3 - Configurações das Camadas	58
Tabela 4 – Distribuição das Simulações	58
Tabela 5 - Número de Simulações	59
Tabela 6 – Parâmetros Estatísticos.....	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CLT	Cross Laminated Timber
DOE	Design of Experiments
ANOVA	Análise de Variância
MPa	Mega Pascal
PUR	Poliuretano
ER	Resina Epóx

LISTA DE SÍMBOLOS

γ	gama
α	alfa
μ	micro
π	pi
L_{ef}	Comprimento efetivo
h_j	Espessura da camada
G_{vt}	Módulo cortante
b	Largura da placa
P	Carregamento
E_{eff}	Rigidez efetiva
n	Número de camadas;
i	Índice referente as camadas longitudinais;
E_i	Módulo de elasticidade longitudinal da i -ésima camada;
I_i	Inércia da i -ésima camada;
γ_i	Fator redutor gama;
A_i	Área da seção transversal da i -ésima camada;
a_i	Distância entre o centro de gravidade da peça ao centro de gravidade a c da i -ésima camada.
γ	Fator redutor
w	Deslocamento
h	Altura total
L	Longitudinal
T	Transversal
N_c	Número de camadas
X	Direção
Y	Direção
L_{maior}	Maior dimensão da placa
L_{menor}	Menor dimensão da placa
n	Espessura total da placa
n_{camada}	Número de camadas
e_{min}	Menor espessura entre as camadas

$(f_{c,0})$	Resistência à compressão paralela as fibras
(E_{c0})	Módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras
$(f_{t,0})$	Resistência à tração paralela as fibras
$(f_{c,90})$	Resistência a compressão perpendicular às fibras
(E_{c90})	Módulo de elasticidade na compressão perpendicular às fibras
$(f_{t,90})$	Resistência a tração perpendicular às fibras
$(f_{v,0})$	Resistência ao cisalhamento paralela às fibras
$(f_{e,0})$	Resistência de embutimento paralelo às fibras
$(f_{e,90})$	Resistência de embutimento perpendicular às fibras
(f_{s0})	Resistência ao fendilhamento
(f_M)	Resistência a flexão
(ρ_{ap})	Densidade aparente
E_L	Módulo de Elasticidade
E_T	Módulo elástico tangencial
E_R	Módulo elástico radial
G_{LR}	Módulo de cisalhamento na direção longitudinal-radial
G_{LT}	Módulo de cisalhamento no plano longitudinal-tangencial
G_{RT}	Módulo de cisalhamento no plano radial-tangencial
ν_{LR}	Coefficiente de Poisson longitudinal-radial
ν_{LT}	Coefficiente de Poisson longitudinal-tangencial
ν_{RT}	Coefficiente de Poisson Radial-tangencial
σ_{ult}	Resistência Última

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVOS	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
1.1.1	Geral	18
1.1.2	Específicos	18
1.2	JUSTIFICATIVAS	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	CROSS LAMINATED TIMBER (CLT): FUNDAMENTOS, EVOLUÇÃO E RELEVÂNCIA DOS ESTUDOS SELECIONADOS.....	20
2.2	MÉTODO DE ANÁLISE ESTRUTURAL PARA PLACAS CLT: ABORDAGENS, LIMITAÇÕES E CONTRIBUIÇÕES DAS PESQUISAS UTILIZADAS.....	24
2.3	MÉTODO GAMA E SUA APLICAÇÃO: FUNDAMENTOS, EVIDÊNCIAS E PONTOS DE APRIMORAMENTO IDENTIFICADOS NA LITERATURA..	30
2.4	DESLOCAMENTOS EM PLACAS CLT: ANÁLISE DOS FATORES QUE INFLUENCIAM E COMO FORAM ABORDADOS NOS ESTUDOS UTILIZADOS	34
2.5	ROLLING SHEAR EM PLACAS CLT: IMPACTO ESTRUTURAL, MÉTODOS DE AVALIAÇÃO E CONTRIBUIÇÃO DOS ESTUDOS ANALISADOS.....	39
2.6	ELEMENTOS FINITOS EM CLT: ESTRATÉGIA DE MODELAGEM, VALIDAÇÃO E RAZÕES DA SELEÇÃO DAS REFERÊNCIAS	46
2.7	CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	48
3	MATERIAIS E MÉTODOS	50
3.1	MÉTODO GAMA E EQUAÇÃO DE DEFLEXÃO	51
3.2	PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS ESPÉCIES DE MADEIRA	53
3.3	TESTE DA MALHA E ELEMENTO FINITO.....	53
3.4	SIMULAÇÕES	57
3.5	DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE CORREÇÃO ALFA.....	59
3.6	MODELO DE REGRESSÃO DE MÚLTIPLAS VARIÁVEIS.....	60
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	62

4.1	MODELO DE REGRESSÃO MULTIVARIÁVEL	62
4.2	ANÁLISE POR ESPÉCIE E TIPO DE CARREGAMENTO.....	64
4.3	ANÁLISE GRÁFICA DOS RESÍDUOS	65
4.4	ANÁLISE POR GRÁFICO DE PARETO.....	67
4.5	AVALIAÇÃO DO COEFICIENTE ALFA NO MÉTODO GAMA	68
5	CONCLUSÕES	73
	REFERÊNCIAS.....	74

1 INTRODUÇÃO

A madeira sempre foi um dos materiais mais utilizados na construção civil, sendo amplamente empregada devido à sua abundância e facilidade de manuseio. Desde suas primeiras aplicações como abrigo para civilizações antigas até seu uso moderno, a madeira se consolidou como um material essencial na engenharia estrutural Possa *et al.* (2022). No entanto, a crescente industrialização levou a um aumento na exploração dos recursos florestais, acarretando desmatamentos e impactos ambientais significativos, especialmente no Brasil, onde a extração de madeira foi historicamente predominante D'Alarime Gimenez e Marin (2023).

Com o advento do cimento Portland, a madeira perdeu espaço como principal material estrutural, sendo relegada a funções secundárias, como formas, escoras e móveis, Cordeiro e Rocha (2019). Além disso, a formação acadêmica dos engenheiros raramente enfatizava a utilização da madeira como material estrutural, o que contribuiu para sua marginalização nas construções modernas (Pons; Knop, 2020).

No entanto, a conscientização ambiental e as regulamentações de proteção florestal impulsionaram o uso de madeiras de reflorestamento como alternativa sustentável. A madeira engenheirada, em particular, apresenta diversas vantagens, incluindo baixo impacto ambiental, eficiência energética e excelentes propriedades mecânicas (Calil Junior; Rocco e Dias, 2003). Dentre os produtos derivados, destaca-se a Cross Laminated Timber (CLT), um material composto por camadas ortogonais de madeira coladas sob alta pressão, proporcionando elevada resistência e rigidez estrutural (Yusoh *et al.* 2021).

Os painéis CLT vêm ganhando destaque na engenharia civil, sendo utilizados em lajes, paredes e sistemas estruturais modulares. Suas propriedades ortotrópicas permitem que as cargas sejam distribuídas bidirecionalmente, aumentando a eficiência estrutural e reduzindo a dependência de reforços adicionais (Almeida; Silva; Moura, 2023; Van Gilst; Foster, 2024). Entretanto, a previsão dos deslocamentos em placas de CLT ainda apresenta desafios, uma vez que os métodos tradicionais frequentemente consideram os elementos apenas em 2D, desconsiderando os efeitos tridimensionais da laminação cruzada.

Para estimar os deslocamentos em painéis CLT, diversas abordagens têm sido utilizadas, entre elas o Método Gama (γ). Esse método busca determinar a rigidez efetiva da seção transversal por meio de um fator de eficiência (γ_i), permitindo uma

melhor representação do comportamento estrutural. O Método Gama já é utilizado em normas técnicas, como a norma europeia EN 1995-1-1 (Eurocode 5 CEN, 2004) e a norma brasileira NBR 7190-1 (ABNT, 2022), para o cálculo da rigidez em painéis CLT. No entanto, devido à complexidade da anisotropia da madeira (longitudinal, radial e tangencial), essa abordagem pode apresentar limitações quando aplicada ao CLT, especialmente na consideração dos efeitos bidirecionais e das interações entre camadas, o que pode impactar a precisão na estimativa dos deslocamentos. (Mascia; Lahr, 2006)

Por outro lado, o Método Gama busca determinar a inércia efetiva da seção transversal por meio de um fator de eficiência (γ_i), permitindo uma estimativa mais precisa do comportamento estrutural D'Alarime Gimenez e Marin (2023). Entretanto, esse método apresenta limitações, pois considera a rigidez da seção transversal apenas em um plano, desconsiderando efeitos tridimensionais e a interação completa entre as camadas. Essa simplificação pode levar a imprecisões, especialmente em estruturas sujeitas a carregamentos complexos e com geometrias variadas, restringindo sua aplicabilidade em análises mais detalhadas de placas CLT.

Com o avanço dos recursos computacionais, a simulação numérica se tornou uma ferramenta indispensável para a análise estrutural, possibilitando a avaliação detalhada do comportamento dos painéis CLT em três dimensões. O MEF permite a consideração dos efeitos da laminação cruzada e das interações entre camadas, oferecendo resultados mais realistas e reduzindo a necessidade de ensaios experimentais dispendiosos e limitados por restrições físicas (Santos; Miotto, 2024).

A escolha da madeira utilizada na confecção das placas de CLT é um fator determinante para seu desempenho estrutural e impacto ambiental. Espécies como *Pinus taeda* e *Eucalyptus grandis* são amplamente empregadas devido à sua disponibilidade, características mecânicas e facilidade de processamento. Além de apresentarem crescimento rápido e boas propriedades estruturais, essas espécies são utilizadas em programas de reflorestamento para restaurar áreas degradadas e aumentar o sequestro de carbono no solo. O *Pinus taeda*, frequentemente empregado na América do Norte e no Brasil, destaca-se pela sua adaptabilidade e resistência, enquanto o *Eucalyptus grandis*, além de sua alta densidade e resistência mecânica, tem sido cada vez mais explorado como alternativa sustentável, contribuindo tanto para a engenharia estrutural quanto para a mitigação dos impactos ambientais do desmatamento. (Guedes; Olsson; Karlun, 2016)

O deslocamento em placas de CLT, no estado limite de serviço (ELS), é regulado pela NBR 7190-1(ABNT, 2022) que define o limite instantâneo como o máximo deslocamento permitido durante a aplicação das cargas em serviço, sem prejudicar o conforto ou a segurança. Esse limite considera o peso próprio e ações variáveis, e, é fundamental para garantir que a estrutura atenda aos requisitos funcionais, como a minimização de vibrações excessivas. Portanto, o limite instantâneo mais restritivo previsto em norma ($L/500$) foi adotado como parâmetro para avaliar o comportamento das placas de CLT, considerando as especificações da norma para assegurar o desempenho adequado da estrutura.

Este trabalho está estruturado da seguinte forma: inicialmente, são apresentados os fundamentos do Método Gama e sua formulação para determinação da rigidez efetiva. Em seguida, são discutidas as parametrizações e os dados empregados na modelagem numérica, incluindo a caracterização das espécies de madeira adotadas, a escolha do elemento finito e a realização de um estudo paramétrico e estatístico. Por fim, são analisados os resultados obtidos, destacando as contribuições da pesquisa para o avanço da engenharia estrutural em madeira.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Geral

Aprimorar o Método Gama na estimativa do deslocamento em placas de CLT, incorporando os efeitos tridimensionais da laminação cruzada e a rigidez ortotrópica das camadas, com o objetivo de propor uma equação corretiva calibrada por meio de simulações numéricas e validação estatística visando ampliar a precisão e a aplicabilidade do método conforme os parâmetros da NBR 7190.

1.1.2 Específicos

- Avaliar as limitações da formulação tradicional do Método Gama, com foco na ausência de consideração tridimensional e na simplificação das interações entre camadas.
- Considerar as propriedades físicas do *Pinus taeda* e *Eucalyptus grandis* na estimativa dos deslocamentos em placas de CLT incluindo altura, largura,

comprimento e número de camadas de modo a refletir suas influências no comportamento estrutural.

- Realizar 240 simulações numéricas tridimensionais utilizando Elementos Finitos *Abaqus®) com base no modelo validado por (Silva *et al.*, 2024).
- Desenvolver e validar uma equação corretiva para o fator α por meio de regressão multivariável e análise estatística (MAPE, RMSE, CV e Desvio padrão).
- Comparar a equação proposta com o Método Gama tradicional, avaliando o desempenho e os ganhos de precisão alcançados.

1.2 JUSTIFICATIVAS

Apesar dos avanços no uso da madeira engenheirada, ainda persistem lacunas na literatura quanto à precisão das estimativas de deslocamento em painéis de CLT, especialmente no contexto brasileiro. A NBR 7190-1, ao adotar o Método Gama para a determinação da rigidez efetiva à flexão, não contempla de forma explícita os efeitos tridimensionais decorrentes da laminação cruzada, tampouco a influência conjunta da ortotropia da madeira e da variabilidade geométrica dos painéis. Essa limitação pode levar a estimativas menos precisas. Com o objetivo de suprir essas lacunas, esta pesquisa propõe uma formulação corretiva ao Método Gama, obtida a partir de 240 simulações numéricas via Método dos Elementos Finitos tridimensionais e validada por métricas estatísticas. Embora ainda sejam necessárias investigações adicionais para consolidação e eventual incorporação normativa, os resultados obtidos indicam potencial para aprimorar a precisão das estimativas de deslocamento e a confiabilidade dos projetos estruturais em madeira.

5 CONCLUSÕES

Esta pesquisa teve como objetivo aprimorar o Método Gama na estimativa de deslocamentos em placas de CLT, incorporando os efeitos tridimensionais da laminação cruzada e a interação entre camadas por meio de um modelo de regressão multivariável. Foram realizadas 240 simulações numéricas com diferentes geometrias, espécies de madeira e tipos de carregamento, o que proporcionou uma base sólida para o desenvolvimento e validação da equação de correção proposta.

Os resultados mostraram que a **formulação tradicional do Método Gama apresentou limitações**, com **MAPE médio de 2,03%, RMSE de 0,03, CV de 15,95% e desvio padrão de 0,03**. Em contraste, a **equação ajustada reduziu significativamente os erros**, alcançando **MAPE médio de 1,70%, RMSE de 0,02, CV de 13,22%**, além de apresentar estabilidade confirmada pelas análises gráficas de resíduos. Essa comparação evidencia que o modelo proposto foi capaz de capturar de forma mais precisa os efeitos da ortotropia e das variáveis geométricas, aproximando-se mais fielmente do comportamento estrutural observado em placas de CLT.

Além de fornecer uma opção para estimativas mais confiáveis de rigidez à flexão, a equação desenvolvida amplia a aplicabilidade do Método Gama, aproximando-o das realidades complexas enfrentadas na prática estrutural sem, necessariamente, recorrer a modelagens tridimensionais de alto custo computacional. Contudo, como todo modelo científico, esta proposta não se pretende definitiva. Seus resultados e aplicações são válidos dentro do escopo e das variáveis analisadas. O avanço do conhecimento exige constante reavaliação, refinamento e validação frente a novas configurações, materiais e demandas. Portanto, este trabalho não encerra uma questão, mas contribui com mais uma peça ao complexo mosaico da engenharia da madeira, reforçando a necessidade contínua de pesquisa, revisão crítica e aprimoramento dos métodos de cálculo estrutural.

Sugere-se, para estudos futuros: (1) validação experimental; (2) extensão para CLT híbrido; (3) análise sob fluência e umidade; (4) integração com sistemas mistos. A equação proposta representa um avanço metodológico relevante para o dimensionamento confiável de estruturas em CLT.

REFERÊNCIAS

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

ALMEIDA, A. C. de; HIROSAWA, J. L.; MARIANO, I. M.; SILVA, R. D. Panorama internacional e nacional do uso e aplicação do sistema construtivo Cross Laminated Timber – CLT. **Conjecturas**, [s.l.], v. 22, n. 13, p. 672–701, 28 set. 2022.

ALMEIDA, A. C. DE; SILVA, R. D.; MOURA, J. D. DE M. Wooden building systems: imminent growth or exponential problem? **Concilium**, v. 23, n. 10, p. 381–390, 1 jun. 2023.

ALOISIO, A.; PASCA, D. P.; SANTIS, Y. DE; HILLBERGER, T.; GIORDANO, P. F.; ROSSO, M. M.; TOMASI, R.; LIMONGELLI, M. P.; BEDON, C. Vibration issues in timber structures: A state-of-the-art review. **Journal of Building Engineering**, Amsterdã, v. 76, p. 107098, out. 2023.

ARAUJO, V. DE; CHRISTOFORO, A. The Global Cross-Laminated Timber (CLT) Industry: A Systematic Review and a Sectoral Survey of Its Main Developers. **Sustainability**, Basel, Suíça, v. 15, n. 10, p. 7827, 10 maio 2023.

BAHMANZAD, A.; CLOUSTON, P. L.; ARWADE, S. R.; SCHREYER, A. C. Shear Properties of Symmetric Angle-Ply Cross-Laminated Timber Panels. **Journal of Materials in Civil Engineering**, Reston, v. 32, n. 9, set. 2020.

BERGAMIN, R. V.; MASCIA, N. T.; DONADON, B. F. Short cross-laminated timber plates subjected to out-of-plane loads. **Caderno Pedagógico**, Curitiba, v. 21, n. 12, p. e10510, 12 nov. 2024.

CALIL JUNIOR, C.; ROCCO, F. A.; DIAS, A. A. **Dimensionamento de elementos estruturais de madeira**. Barueri: Editora Manole LTDA, 2003.

CORDEIRO JÚNIOR, C. R.; ROCHA SILVA, W. C.; TARSO MACHADO LEITE SOARES, P. DE. USO DA MADEIRA NA CONSTRUÇÃO CIVIL. **Projectus**, Rio de Janeiro, v. 2, n. 4, p. 79–93, 8 abr. 2019.

CRIADO, T. C.; SOUZA, C. G. F. DE; TARRILLO, J. L. S.; CHRISTOFORO, A. L.; MOLINA, J. C. A review of test methods to evaluate rolling shear properties in CLT Panels. **Caderno Pedagógico**, Curitiba, v. 22, n. 5, p. e14609, 10 mar. 2025.

D'ALARME GIMENEZ, M. H.; MARIN, C. P. Comparação de métodos de cálculo para elementos de madeira laminada cruzada (clt) submetidos à flexão. **RECIMA21 - Revista Científica Multidisciplinar - ISSN 2675-6218**, Jundiaí, v. 4, n. 4, p. e443036, 15 abr. 2023.

_____. Comparação de métodos de cálculo para elementos de madeira laminada cruzada (clt) submetidos à flexão. **RECIMA21 - Revista Científica Multidisciplinar - ISSN 2675-6218**, Jundiaí, v. 4, n. 4, p. e443036, 15 abr. 2023b.

DAS, S.; GAŠPARÍK, M.; SETHY, A. K.; NIEMZ, P.; MAHAPATRA, M.; LAGAÑA, R.; LANGOVÁ, N.; KYTKA, T. Comparative Analysis of Bending and Rolling Shear Performance of Poplar and Hybrid Maple–Poplar Cross-Laminated Timber (CLT). **Journal of Composites Science**, Basel, v. 9, n. 3, p. 134, 13 mar. 2025.

DOBEŠ, P.; LOKAJ, A.; VAVRUŠOVÁ, K. Stiffness and Deformation Analysis of Cross-Laminated Timber (CLT) Panels Made of Nordic Spruce Based on Experimental Testing, Analytical Calculation and Numerical Modeling. **Buildings**, Basel, v. 13, n. 1, p. 200, 11 jan. 2023.

EUROCODE 5 CEN. EN 1995-1-1. Bruxelas: CEN, 2004.

FAKHRZAREI, M.; DANESHVAR, H.; CHUI, Y. H. Numerical parametric study of cross-laminated timber diaphragms under in-plane loading. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 429, p. 136387, maio 2024.

GLASNER, D.; RINGHOFER, A.; BRANDNER, R.; SCHICKHOFER, G. Rolling Shear Strength of Cross Laminated Timber (CLT)—Testing, Evaluation, and Design. **Buildings**, [s.l.], v. 13, n. 11, p. 2831, 11 nov. 2023.

GOODMAN, J. R.; BODIG, J. Orthotropic Elastic Properties of Wood. **Journal of the Structural Division**, [s.l.], v. 96, n. 11, p. 2301–2319, nov. 1970.

GUEDES, B. S.; OLSSON, B. A.; KARLTUN, E. Effects of 34-year-old *Pinus taeda* and *Eucalyptus grandis* plantations on soil carbon and nutrient status in former miombo forest soils. **Global Ecology and Conservation**, Reino Unido, v. 8, p. 190–202, out. 2016.

HUANG, Z.; BIAN, Y.; NI, C. A rolling shear analysis-based method for determining the apparent stiffness and bending capacity of CLT panel under out-of-plane load. **Journal of Wood Science**, Japão, v. 70, n. 1, p. 8, 24 jan. 2024.

HUANG, Z.; HUANG, D.; CHUI, Y.-H.; CHEN, Z. A layered beam-based model for analyzing the stress of rolling shear for the cross-laminated timber panels under out-of-plane bending. **Engineering Structures**, Reino Unido, v. 289, p. 116290, ago. 2023a.

HUANG, Z.; JIANG, L.; NI, C.; CHEN, Z. 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**, Japão, v. 69, n. 1, p. 14, 16 mar. 2023.

HUBER, C.; DEIX, K. Comparison of Calculation Methods of Elastic Bonding: Limits of the Gamma Method Using an Example of a Wood–Concrete Composite Floor with Single Loads. **Materials**, Suíça, v. 14, n. 23, p. 7211, 26 nov. 2021.

HUBER, J. A. J.; MPIDI BITA, H.; TANNERT, T.; BERG, S. Finite element analysis of alternative load paths to prevent disproportionate collapse in platform-type CLT floor systems. **Engineering Structures**, Oxford, v. 240, p. 112362, ago. 2021.

KRETSCHMANN, David. Mechanical properties of wood. Wood handbook: **wood as an engineering material: chapter 5. Centennial ed. General technical report FPL; GTR-190. Madison, WI: US Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory**, Madison, 2010: p. 5.1-5.46., v. 190, p. 5.1-5.46, 2010.

KURZINSKI, S.; PETRULIUS, P. Overview of Cross-Laminated Timber (CLT) and Timber Structure Standards Across the World. **Mass Timber Construction Journal**, [s.l.], v. 5, n. 1, p. 1-13, 2022.

LI, C.; LI, S.; YUE, K.; WU, P.; XIAO, Z.; ZHANG, J. Analytical solutions and optimization design for bending behavior of cross-laminated timber beams considering orthotropy and interface slip. **Case Studies in Construction Materials**, Holanda, v. 18, p. e01948, jul. 2023.

LI, X.; ASHRAF, M.; SUBHANI, M.; KREMER, P.; KAFLE, B.; GHABRAIE, K. Experimental and numerical study on bending properties of heterogeneous lamella layups in cross laminated timber using Australian Radiata Pine. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 247, p. 118525, jun. 2020.

LIANG, Y.; TAOUM, A.; KOTLAREWSKI, N.; CHAN, A. Bending performance of cross-laminated timber constructed from fibre-managed Eucalyptus nitens under short-term and long-term serviceability loads. **European Journal of Wood and Wood Products**, Berlim, v. 82, n. 5, p. 1637–1650, 26 out. 2024.

MASCIA, N. T.; LAHR, F. A. R. Remarks on orthotropic elastic models applied to wood. **Materials Research**, São Paulo, v. 9, n. 3, p. 301–310, set. 2006.

MASTELA, L. DA C.; SEGUNDINHO, P. G. DE A.; CHRISTOFORO, A. L.; GONÇALVES, F. G.; SOUZA, C. G. F. DE; LAHR, F. A. R.; TAQUETTI, V. B. Aplicação do método dos elementos finitos (MEF) em madeira lamelada colada cruzada (CLT). **Em: Tecnologias Avançadas e Suas Abordagens -V1**. [s.l.] Seven Editora, 2023.

MOHD YUSOF, N.; MD TAHIR, P.; LEE, S. H.; KHAN, M. A.; MOHAMMAD SUFFIAN JAMES, R. Mechanical and physical properties of Cross-Laminated Timber made from Acacia mangium wood as function of adhesive types. **Journal of Wood Science**, Tóquio, v. 65, n. 1, p. 20, 9 dez. 2019.

NERO, R.; CHRISTOPHER, P.; NGO, T. Investigation of rolling shear properties of cross-laminated timber (CLT) and comparison of experimental approaches. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 316, p. 125897, jan. 2022.

OBRADOVIĆ, N.; TODOROVIĆ, M.; MARJANOVIĆ, M.; DAMNJANOVIĆ, E. DIAGRAMS FOR STRESS AND DEFLECTION PREDICTION IN CROSS-LAMINATED TIMBER (CLT) PANELS WITH NON-CLASSICAL BOUNDARY

CONDITIONS. **Contemporary Theory and Practice in Construction**, Banja Luka, v. 14, n. 1, p. 0–0, 1 dez. 2019.

OLIVEIRA, G. L.; OLIVEIRA, F. L. DE. Proposta de índices de racionalização do processo construtivo de estruturas de Mass Timber. **Gestão & Tecnologia de Projetos**, Recife, v. 19, n. 2, p. 153–173, 21 ago. 2024.

OLSSON, A.; ABDELJABER, O. Predicting out-of-plane bending strength of cross laminated timber: Finite element simulation and experimental validation of homogeneous and inhomogeneous CLT. **Engineering Structures**, Oxford, v. 308, p. 118032, jun. 2024.

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

PIZZINI, Paulo Roberto. **Determinação experimental das constantes elásticas da madeira de Eucalyptus grandis e chapas de OSB**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 29 jul. 2017.

PONS, C.; KNOP, A. Construções utilizando estruturas de madeira. **Cippus: Revista de Iniciação Científica**, São Carlos, v. 8, n. 1, p. 79–96, 2020.

POSSA, D. C.; PETRAUSKI, A.; PETRAUSKI, S. M. F. C.; SAVARIS, G.; JORDAN, R. A.; AZEVEDO, R. L.; POSSA, D. C.; PADILHA, V. H. L.; TOMÉ, K. T.; PETRAUSKI, M. C.; TORRE, A. LLL E. LA. Construção e ensaio de pórticos com tirante em madeira laminada colada. **Research, Society and Development**, [s.l.], v. 11, n. 2, p. e52711226109, 4 fev. 2022.

RAHMAN, M.; ASHRAF, M.; GHABRAIE, K.; SUBHANI, M. Evaluating Timoshenko Method for Analyzing CLT under Out-of-Plane Loading. **Buildings**, Basel, v. 10, n. 10, p. 184, 14 out. 2020.

RAO, F.; ZHU, X.; ZHANG, Y.; JI, Y.; LEI, W.; LI, N.; ZHANG, Z.; CHEN, Y.; YU, W. Water resistance and mechanical properties of bamboo scrimber composite made from different units of Bambusa chungii as a function of resin content. **Construction and Building Materials**, Oxford, v. 335, p. 127250, jun. 2022.

SANDOLI, A.; CALDERONI, B. The Rolling Shear Influence on the Out-of-Plane Behavior of CLT Panels: A Comparative Analysis. **Buildings**, Basel, v. 10, n. 3, p. 42, 3 mar. 2020.

SANTOS, C. I. DOS; MIOTTO, J. L. Análise de tensões, normais e de cisalhamento, e deslocamentos verticais em painéis de madeira lamelada colada cruzada via teorias de placas, métodos numéricos e simplificados. **Ambiente Construído**, Belo Horizonte, v. 24, p. e128046, 2024, dez. 2024.

SHAHNEWAZ, M.; DICKOF, C.; ZHOU, J.; TANNERT, T. Vibration and flexural performance of cross-laminated timber – glulam composite floors. **Composite Structures**, Oxford, v. 292, p. 115682, jul. 2022.

SILVA, G. DOS S.; OLIVEIRA, S. C. DE; JARDIM, P. I. L. G.; AQUINO, V. B. DE M.; CHRISTOFORO, A. L. Correção do método gama: estimativa da rigidez de placas CLT sob carga concentrada. **Ambiente Construído**, Belo Horizonte, v. 25, 2025.

SILVA, G. DOS S.; OLIVEIRA, S. C. DE; JARDIM, P. I. L. G.; REIS, E. D.; AQUINO, V. B. DE M.; CHRISTOFORO, A. L. Proposed correction to the Gamma method for estimating the bending stiffness of CLT panels. **Structures**, Oxford, v. 68, p. 107214, out. 2024.

SILVA GOMES, D. R. DA; KOHLMAN RABBANI, E. R.; ALMEIDA DE OLIVEIRA, R. Propriedades Mecânicas das Madeiras utilizadas na construção: Uma Revisão Sistemática de Literatura. **Revista Brasileira de Geografia Física**, São Paulo, v. 17, n. 3, p. 1596–1619, 7 maio 2024.

SILVA, J. V. F.; MORAES PEREIRA, M. C. DE; SILVA, M. F. F.; MOLINA, J. C. Experimental and numerical analysis of specimen configurations for Cross Laminated timber on rolling shear stiffness and strength response. **Engineering Structures**, Oxford, v. 284, p. 115973, jun. 2023.

SILVA, M. L. DE J. S.; LOBO, M. V. F.; CUNHA, R. D. A.; CÉSAR, S. F. Viabilidade do uso de madeira clonal de *Eucalyptus urophylla* de rápido crescimento para produção de madeira lamelada colada (MLC) com adesivo poliuretano à base de mamona. **Matéria** (Rio de Janeiro), v. 28, n. 2, 2023.

SIQUEIRA, J. M.; MASCIA, N. T.; BERGAMIN, R. V.; SIQUEIRA, G. H. Análise de vibração em placas compostas de Cross Laminated Timber e concreto para pisos de edificações. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 24, dez. 2024.

SOLOVEV, S.; PUCHKOV, V.; SOLOVEVA, A. PROBABILISTIC DESIGN OF FLEXURAL CROSS-LAMINATED TIMBER STRUCTURAL ELEMENTS. **International Journal for Computational Civil and Structural Engineering**, [s.l.], v. 20, n. 2, p. 99–108, 28 jun. 2024.

SVOBODOVÁ, H.; HLAVÁČKOVÁ, P. Forest as a source of renewable material to reduce the environmental impact of buildings. **Journal of Forest Science**, [s.l.], v. 69, n. 10, p. 451–462, 30 out. 2023.

TEIXEIRA, M. Z.; TEREZO, R. F.; CUNHA, A. B. DA; 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**, [s.l.] v. 15, n. 5, p. 881, 19 maio 2024.

TURESSON, J.; SHARIFI, Z.; BERG, S.; EKEVAD, M. Influence of laminate direction and glue area on in-plane shear modulus of cross-laminated timber. **SN Applied Sciences**, [s.l.], v. 2, n. 12, p. 2126, 1 dez. 2020.

VAN GILST, D. L. VAN; FOSTER, R. M. Experimental investigation of cross-laminated timber deep beams with and without large openings. **Structures**, [s.l.], v. 67, p. 106942, set. 2024.

VESSBY, J.; ENQUIST, B.; PETERSSON, H.; ALSMARKER, T. Experimental study of cross-laminated timber wall panels. **European Journal of Wood and Wood Products**, Heidelberg, v. 67, n. 2, p. 211–218, 19 maio 2009.

VILELA, R. B. T. M. N. T.; B. C. **Reações de apoio em elementos estruturais de Cross Laminated Timber sob a influência do efeito Rolling Shear** Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira. **Anais...**Goiânia: out. 2022

VILELA, R.; MASCIA, N. T. Avaliação de propriedades mecânicas da madeira de Pinustaeda provenientes de placas de cross laminated timber. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 21, n. 4, p. 89–110, out. 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**, Hunan, v. 13, n. 4, p. 132–142, ago. 2020.

YAU, Y.; OCHOLI, A.; KAURA, J. M.; LAWAN, A.; SULAIMAN, T. A. **Evaluation of Shear Strength and Durability of Adhesive Bond in Cross-Laminated Timber (Clt) Panels Made from Nigerian Gmelina Arborea Timber**, [s.l.], v. 21, p. e04026, 2024.

YE, J.; MOJTABAEI, S. M.; HAJIRASOULIHA, I.; SHEPHERD, P.; PILAKOUTAS, K. Strength and deflection behaviour of cold-formed steel back-to-back channels. **Engineering Structures**, [s.l.], v. 177, p. 641–654, dez. 2018.

YUSOH, A. S.; MD TAHIR, P.; ANWAR UYUP, M. K.; LEE, S. H.; HUSAIN, H.; KHAIDZIR, M. O. Effect of wood species, clamping pressure and glue spread rate on the bonding properties of cross-laminated timber (CLT) manufactured from tropical hardwoods. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 273, p. 121721, mar. 2021.

ZHANG, X.; XUAN, L.; LI, W.; TANNERT, T. **EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS ON CLT PANELS WITH OPENINGS**World Conference on Timber Engineering (WCTE 2023). **Anais...**As, Norway: World Conference on Timber Engineering (WCTE 2023), 2023

ZHUANG, B.; LIU, Y.; YANG, F. Experimental and numerical study on deformation performance of Rubber-Sleeved Stud connector under cyclic load. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 192, p. 179–193, dez. 2018.