

INFLUÊNCIA DE DIFERENTES TÉCNICAS DE MODELAGEM NO DESEMPENHO DE VIGAS DE MLC DA ESPÉCIE PARICÁ

João Gustavo Caldeira Chaves (Universidade Federal de Rondônia) E-mail:
caldeirachaves@hotmail.com

Thiago Pereira Fonseca (Universidade Federal de Rondônia) E-mail:
thiagopf6@gmail.com

Pedro Ignácio Lima Gadêlha Jardim (Universidade Federal de Rondônia) E-mail:
pedro@unir.br

André Luis Christoforo (Universidade Federal de São Carlos) E-mail:
alchristoforo@ufscar.br

Diego Henrique de Almeida (Universidade Federal de Rondônia) E-mail:
diegoalmeida@unir.br

Resumo: Apesar dos avanços na modelagem de estruturas de madeira, persiste uma lacuna na comparação de técnicas aplicadas a vigas de madeira lamelada colada (MLC) com madeiras amazônicas, agravada pela escassez de dados físico-mecânicos. Este estudo avalia o impacto de diferentes estratégias de modelagem numérica no desempenho estrutural de vigas de MLC de paricá. Para isso, foram consideradas três técnicas: dois modelos de seção lamelar com comportamento ortotrópico e isotrópico e seção unificada ortotrópica. A geometria e as propriedades foram selecionadas a partir da literatura e complementadas por correlações normativas, com validação frente a ensaios de flexão a quatro pontos e estudo de sensibilidade de malha. Entre as discretizações avaliadas, a viga com elementos de 10 mm apresentou o melhor equilíbrio entre acurácia e tempo computacional. Considerando os valores da referência experimental, os modelos lamelar e unificado reproduziram satisfatoriamente as respostas globais, com erros de 0,75% e 0,76%, respectivamente, enquanto a hipótese isotrópica elevou artificialmente a rigidez à flexão e gerou um erro de 7,25%. As distribuições das tensões confirmam que a ortotropia foi determinante para capturar gradientes e concentrações locais, ao passo que a seção unificada manteve boa fidelidade com menor tempo de processamento.

Palavras-chave: Madeira lamelada colada, madeiras tropicais, análise computacional, método dos elementos finitos.

INFLUENCE OF DIFFERENT MODELING TECHNIQUES ON THE PERFORMANCE OF PARICÁ GLULAM BEAMS

Abstract: Despite advances in timber structure modeling, a gap remains in the comparative assessment of techniques applied to glued laminated timber (glulam) beams made from Amazonian species, aggravated by the scarcity of physical-mechanical data. This study evaluates the impact of different numerical modeling strategies on the structural performance of Paricá glulam beams. Three approaches were considered: two layered-section models with orthotropic and isotropic behavior, and a unified orthotropic section. Geometry and properties were selected from the literature and complemented by normative correlations, with validation against four-point bending tests and a mesh sensitivity analysis. Among the discretizations evaluated, the beam with 10 mm elements presented the best balance between accuracy and computational time. Considering the values from the experimental reference, the layered and unified models satisfactorily reproduced the global responses, with errors of 0.75% and 0.76%, respectively, whereas the isotropic assumption artificially increased flexural stiffness and resulted in a 7.25% error. The stress distributions confirmed that orthotropy was crucial to capture gradients and local concentrations, while the unified section maintained good agreement with reduced processing time.

Keywords: Glued laminated timber, tropical hardwoods, computational analysis, finite element method.

1. Introdução

A madeira é um material milenar amplamente disponível e de fácil processamento, o que historicamente tem favorecido seu emprego (RAMAGE *et al.*, 2017; DUKARSKA; MIRSKI, 2023). Com a industrialização, porém, seu uso estrutural foi gradualmente substituído por outros materiais, como aço e concreto, impulsionados pela imagem de maior durabilidade e resistência (ABED *et al.*, 2022). Esse ofuscamento consolidou uma percepção equivocada entre profissionais e usuários, especialmente no Brasil, de menor desempenho da madeira (ENCINAS *et al.*, 2024; SOTSEK; SANTOS, 2018). No entanto, a madeira, quando corretamente selecionada e processada, pode superar outros materiais em diversos aspectos, especialmente na relação resistência/peso e densidade (PFEIL; PFEIL, 2017).

Por sua natureza orgânica, a madeira apresenta um padrão anisotrópico de suas propriedades, porém, a fim de viabilizar seu uso em aplicações de engenharia, considera-se como um material ortotrópico, onde suas propriedades variam nos três eixos principais em relação às fibras: longitudinal (1), radial (2) e tangencial (3) (CALIL JÚNIOR *et al.*, 2019).

Embora as estruturas de madeira apresentem desempenho satisfatório, o uso do material tem evoluído com o desenvolvimento de diferentes tecnologias. Nesse contexto, a madeira lamelada colada (MLC) é um produto engenheirado formado pela colagem de duas ou mais lamelas com as fibras paralelas, capaz de gerar peças retas ou curvas, superando limitações de dimensão e forma típicas da madeira maciça (UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE, 2010). A MLC diferencia-se da madeira maciça por permitir a combinação e seleção de lamelas com melhor qualidade, permitindo a remoção ou distribuição de defeitos, como nós e trincas, o que pode elevar as propriedades mecânicas quando comparada ao elemento serrado (KYTKA *et al.*, 2024; DERKOWSKI *et al.*, 2022).

Destaca-se a utilização de espécies de reflorestamento, como Pinus e Eucalipto, são mais comuns na produção de MLC por conta da sua difusão e conhecimento tecnológico das espécies (RODRIGUES, 2023). Todavia, no Brasil, existem espécies amazônicas com potencial para utilização de MLC, como o paricá (*Schizolobium amazonicum*), onde Almeida *et al.* (2011) e Terezo e Szücs (2010) verificaram que as vigas de MLC com essa espécie apresentam bom desempenho mecânico, principalmente por ser uma madeira de baixa densidade ($0,49 \text{ g/cm}^3$) e ter uma boa relação peso resistência, e podem ser utilizadas, assim como as madeiras de reflorestamento, em elementos de MLC.

O emprego de ferramentas numéricas, como o Método dos Elementos Finitos (MEF), consolidou-se para descrever o comportamento de vigas de MLC e validá-los com resultados experimentais (SZCZECINA, 2023; UZEL *et al.*, 2018; PEIXOTO *et al.*, 2024). Essa abordagem viabiliza avaliações de fenômenos cuja análise é difícil ou mesmo inviável por meios analíticos ou experimentais, como a heterogeneidade entre lamelas, a interação adesivo-madeira, estados de tensões tridimensionais e não linearidades, além de estudos paramétricos e de sensibilidade em larga escala. Szczecina (2023), por exemplo, modelou vigas de MLC reforçadas com polímeros reforçados com fibras e concluiu que um modelo elástico linear ortotrópico com seções divididas por lamelas reproduziu adequadamente o comportamento real para pequenas deformações. Jończyk (2021) conduziu uma análise comparativa do desempenho de vigas de MLC reforçadas com diferentes materiais.

Apesar desses avanços e da existência de distintas estratégias de simulação, ainda há

uma lacuna na avaliação comparativa de técnicas de modelagem aplicadas a vigas de MLC produzidas com madeiras nativas amazônicas. Essa lacuna é agravada pela escassez de dados físico-mecânicos dessas espécies para calibração e validação de modelos (NEVES, 2023; MASTELA, 2023).

Diante desse cenário, o presente trabalho propõe uma análise numérica do desempenho estrutural de vigas de MLC fabricadas com madeira amazônica, da espécie paricá (*Schizolobium amazonicum*), comparando três abordagens de modelagem e, por conseguinte, seu tempo de processamento e variação de erro.

2. Materiais e Métodos

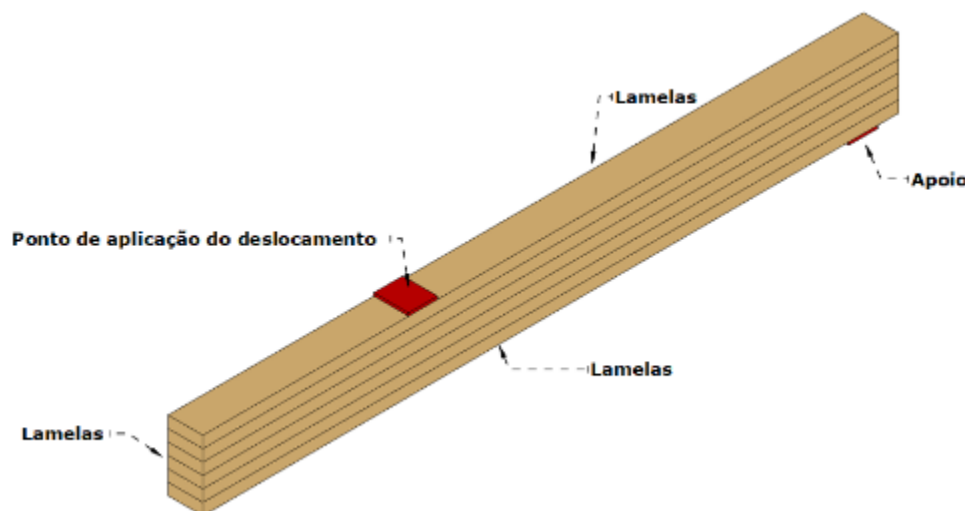
O presente estudo foi realizado com o auxílio do *software ABAQUS*. Foi adotado como referência o ensaio realizado por Terezo e Szücs (2010), onde foi analisado o desempenho de vigas em MLC de paricá. Destaca-se que os autores realizaram vinte e um ensaios de flexão a quatro pontos, sendo 14 de MLC e 7 de madeira serrada, da mesma espécie.

A fim de realizar a modelagem, levou-se em consideração os parâmetros físico-mecânicos apresentados pelos autores e, para complementação dos dados, foram adaptadas as recomendações da literatura e parâmetros normativos da NBR 7190 (ABNT, 2022). Por fim, com os parâmetros baseados na literatura dos autores, um modelo inicial foi elaborado com o objetivo de validar a eficácia do modelo simulado em relação ao seu tempo de processamento e variação do erro entre os resultados.

As simulações numéricas foram executadas em um equipamento com as seguintes configurações: processador Intel Core i5-12500H, placa gráfica RTX 2050, 16 GB de memória RAM e 12 núcleos lógicos disponíveis para o processamento paralelo.

2.1 Configuração do modelo numérico

O modelo numérico foi elaborado conforme apresentado na Figura 1, onde é possível observar a construção do modelo juntamente com seus elementos e dimensões. Com o objetivo de reduzir o tempo de processamento, este estudo considerou a simetria longitudinal do elemento, sendo efetivamente modelada metade da viga e introduzindo um plano de simetria na seção transversal central do elemento. O atuador e o apoio foram representados por superfícies rígidas discretas, adotando-se a mesma configuração do ensaio experimental de flexão a quatro pontos.



(a)

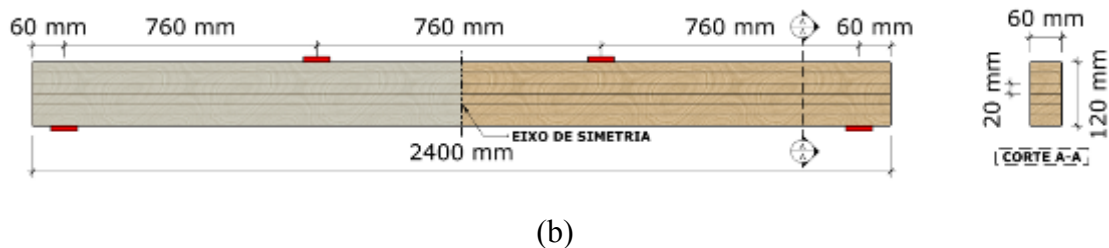


Figura 1 - Detalhe esquemático (a), vista lateral e corte transversal do modelo (b) (Adaptado de Terezo e Szűcs, 2010).

Em relação às propriedades físico-mecânicas (Tabela 1) empregadas na simulação, foi considerado o comportamento ortotrópico da madeira com seção isotrópica, abordagem comumente empregada na literatura (ALVES *et al.*, 2024; ASSIS *et al.*, 2024), tendo em vista a baixa probabilidade em se obter uma seção verdadeiramente ortotrópica no desdobro pelo alinhamento da direção radial (ARZOLA-VILLEGAS *et al.*, 2025), conforme Equações e , que apresentam as correlações adotadas para obter os valores do módulo de elasticidade (E) e módulo de cisalhamento (G), conforme NBR 7190 (ABNT, 2022). Destaca-se que os valores do módulo de ruptura (MOR) e de E_1 foram obtidos do estudo de Terezo e Szűcs (2010).

Tabela 1 - Propriedades do modelo numérico

MOR (MPa)	E_1 (MPa)	E_2 (MPa)	E_3 (MPa)	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}	G_{12} (MPa)	G_{13} (MPa)	G_{23} (MPa)
56,2	8200	410	410	0,292	0,449	0,39	512,5	512,5	512,5

Nota: MOR = módulo de ruptura à flexão; E = módulo de elasticidade longitudinal; G = módulo de elasticidade transversal; ν = coeficiente de poisson.

$$E_2 = E_3 = \frac{E_1}{20}$$

$$G_{12} = G_{13} = G_{23} = \frac{E_1}{16}$$

Para representar a não-linearidade do comportamento mecânico da madeira, utilizou-se o critério de plasticidade anisotrópico de Hill (HILL, 1950), apresentado conforme Equação , onde σ_0 e σ_{90} correspondem às tensões axiais, paralela e perpendicular às fibras da madeira, respectivamente, e σ_{eq} corresponde à tensão de escoamento.

$$\left\{ \begin{array}{l} R_1 = \frac{\sigma_0}{\sigma_{eq}} = 1 \\ R_2 = R_3 = \frac{\sigma_{90}}{\sigma_{eq}} = 0,05 \\ R_{12} = R_{13} = R_{23} = \frac{\sigma_v \cdot \sqrt{3}}{\sigma_{eq}} = 0,16 \end{array} \right.$$

Adicionalmente ao modelo numérico de referência, realizaram-se duas simulações

complementares para avaliar a influência de diferentes configurações do modelo. Primeiramente, elaborou-se uma simulação alternativa considerando a madeira como material isotrópico, utilizando a configuração da malha de 10 mm. Outrossim, a segunda simulação complementar foi conduzida considerando a seção transversal da viga como unificada, ou seja, sem a divisão em lamelas, eliminando a interação entre as superfícies das lamelas. Além disso, adotou-se a interação do tipo *tie*, em que pressupõe aderência perfeita e não representa a rigidez própria da linha de cola entre as lamelas, hipótese consolidada na modelagem de MLC (SZCZECINA, 2023; UZEL et al., 2018).

A Tabela 2 reúne todas as simulações realizadas, incluindo o modelo numérico de referência e as variações propostas, concebidas para avaliar mudanças nos parâmetros de caracterização mecânica, como a adoção da isotropia, além de alterações geométricas, considerando a viga como elemento unificado e como impactam no tempo de processamento, distribuição das tensões internas e o erro em relação ao modelo experimental.

Tabela 2 - Descrição das configurações dos modelos numéricos simulados

Nome do modelo	Seção transversal	Comportamento do material	Quantidade de lamelas	Tamanho da malha (mm)
C3D8-5	Particionada (lamelas)	Ortotrópico	6	5
C3D8-10	Particionada (lamelas)	Ortotrópico	6	10
C3D8-15	Particionada (lamelas)	Ortotrópico	6	15
C3D8-20	Particionada (lamelas)	Ortotrópico	6	20
C3D8-I	Particionada (lamelas)	Isotrópico	6	10
C3D8-U	Unificada (sem divisões)	Ortotrópico	N/A	10

2.2 Validação do modelo numérico

Foram adotados elementos sólidos tridimensionais do tipo C3D8, ou seja, elementos hexaédricos com oito nós. Com o objetivo de validar a influência do tamanho da malha na precisão e no desempenho computacional, foram analisados quatro tamanhos distintos de elementos, identificados respectivamente como C3D8-5, C3D8-10, C3D8-15 e C3D8-20, correspondendo aos tamanhos máximos das malhas de 5 mm, 10 mm, 15 mm e 20 mm.

Para as interfaces entre lamelas adjacentes, adotou-se uma interação do tipo *tie*, que representa uma adesão perfeita entre os elementos. Já o contato entre as lamelas extremas e as superfícies rígidas (atuador e apoio) foi representado por meio de interações do tipo *surface-to-surface*, assumindo comportamento de contato com coeficiente de atrito igual a 0,4, visando a reprodução da interação aço-madeira.

Ademais, foi aplicado um deslocamento no atuador para reproduzir a curva força-deslocamento, enquanto os apoios permaneceram fixos, sem deslocamentos ou rotações. Destaca-se, ainda, que não houve quaisquer gráficos ou informações relacionadas à curva força-deslocamento na parte experimental.

A fim de avaliar quantitativamente o erro entre o modelo numérico e o experimental e, por fim, validá-lo, utilizou-se a comparação dos módulos de elasticidade obtidos em cada particularidade. O módulo de elasticidade dos modelos numéricos foi obtido por meio da Equação (adaptada de TIMOSHENKO, 1940) e comparado ao valor da propriedade experimental, determinando a variação de erro entre as vigas.

$$E_{num} = \frac{P \cdot a}{24 \cdot \delta} \cdot (3 \cdot L^2 - 4 \cdot a^2) / I$$

Onde, L é o comprimento da viga, P corresponde ao valor da carga responsável pelo deslocamento $\delta = L/350$, I é o momento de inércia da seção transversal e a é a distância entre os pontos de aplicação da carga no ensaio de flexão estática a quatro pontos.

Cabe destacar que essa mesma metodologia de validação foi aplicada às simulações adicionais realizadas, ou seja, para o modelo C3D8-I e C3D8-U. Para isso, em todas as simulações realizadas, as curvas força-deslocamento também foram registradas e utilizadas para obtenção dos valores do módulo de elasticidade por meio da Equação .

Registra-se, ainda, que a validação cumpre como verificação de consistência da rigidez global entre estratégias de modelagem, visto que não foram realizados quaisquer modelos numéricos no estudo de referência.

3. Resultados e discussões

Para os modelos que buscaram a formulação de uma simulação semelhante ao modelo de referência, observa-se na Figura 2 a curva força-deslocamento obtida, a fim de verificar a influência da sensibilidade das malhas. Observa-se que todas as curvas apresentaram tendência linear semelhante, similar a outros estudos sobre o tema, como os de Uzel *et al.* (2018) e İşleyen e Peker (2020). O modelo C3D8-10 apresentou o melhor alinhamento com o comportamento médio esperado, sendo a mais próxima do modelo de referência. Por outro lado, a malha C3D8-5, apesar de mais refinada, demonstrou um comportamento mais rígido, resultando em um valor de propriedade maior e, por conseguinte, uma variação acima das demais.

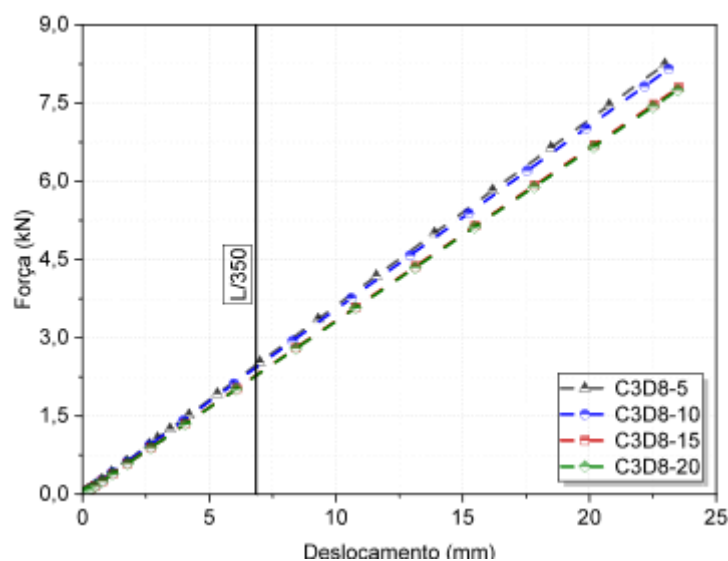


Figura 2 - Curva força-deslocamento no teste de sensibilidade das malhas

Na Figura 3, são apresentados os valores do tempo de processamento e do erro

percentual do módulo de elasticidade em relação ao valor experimental. Nota-se que a malha com 10 mm obteve o menor erro percentual dentre todas as configurações, aliando a precisão com um tempo de processamento relativamente baixo, o que a torna a opção mais eficiente do ponto de vista computacional.

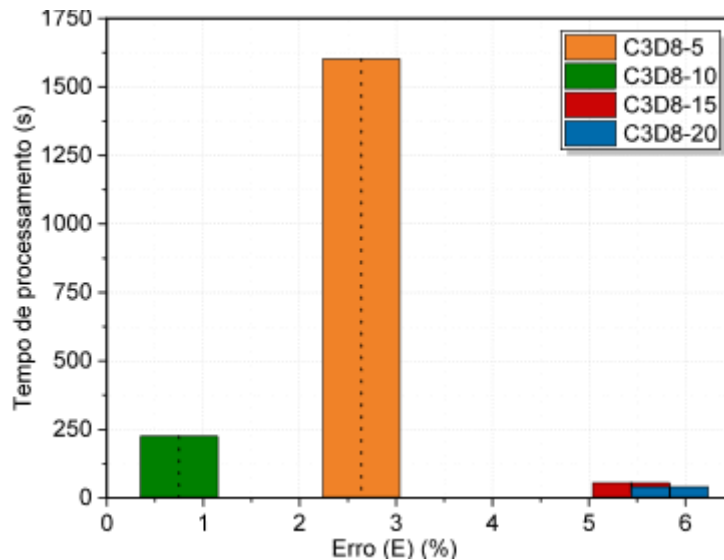


Figura 3 - Tempo de processamento × variação do erro do teste de sensibilidade das malhas

De acordo com Bathe (1996), ao escolher por elementos hexaédricos, as malhas grosseiras tendem a enrijecer artificialmente a resposta em flexão por travamento ao cisalhamento, efeito progressivamente aliviado pelo refino. No presente caso, o sentido da convergência apenas sugere que o deslocamento que fora registrado não depende apenas da flexão global, mas também da discretização das regiões de contato com as superfícies rígidas do atuador e dos apoios, nas quais malhas grosseiras admitem indentação local irregular e reduzem o módulo aparente.

Sob essa leitura, o menor erro da malha de 10 mm não decorre de maior acurácia numérica, mas de uma compensação parcial entre o erro de discretização remanescente e as idealizações do modelo, como a ausência de defeitos naturais, propriedades transversais estimadas por correlação e aderência perfeita entre as lamelas. Assim, a malha de 5mm, ainda que mais próxima da solução convergida, afasta-se do valor experimental justamente por não se beneficiar dessa compensação e, por conseguinte, a malha de 10 mm é recomendada pela melhor relação entre custo computacional e reprodução do ensaio de referência.

A Figura 4 apresenta as curvas força-deslocamento obtidas para os modelos C3D8-10, C3D8-I e C3D8-U, sendo eles o modelo de referência com melhor processamento, modelo isotrópico e unificado, respectivamente. Observa-se que o modelo C3D8-10 é o modelo comparativo entre os outros dois, servindo como referência comparativa. Em relação ao modelo isotrópico, observou-se um comportamento mais rígido ao longo de toda a curva, com deslocamentos inferiores para uma mesma carga aplicada, o que é consistente com a simplificação de propriedades que ignora as direções principais da madeira. Já o modelo unificado, obteve valores similares a viga C3D8-10, variando valores irrisórios.

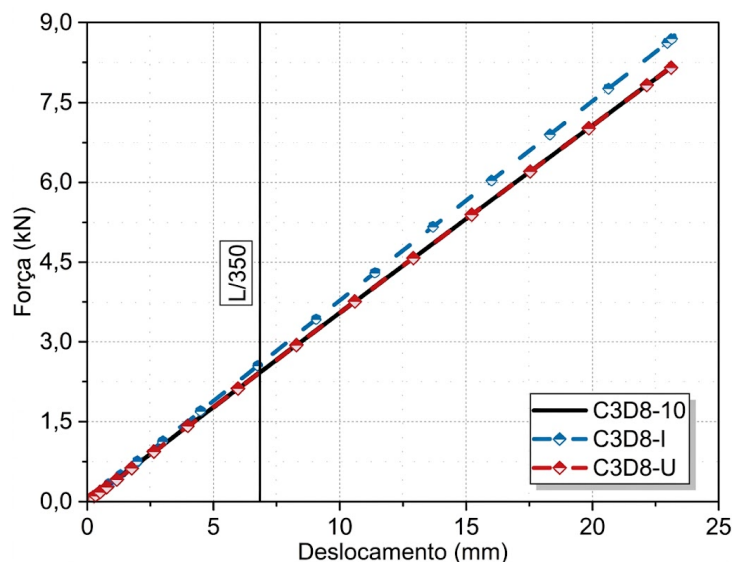


Figura 4 - Curva força-deslocamento dos modelos numéricos adicionais

Essa análise é corroborada pelos dados apresentados na Tabela 3, que reuniu os valores de carga correspondente ao deslocamento admissível de $L/350$ e o respectivo erro percentual entre o modelo numérico e os dados experimentais, onde o módulo de elasticidade médio do estudo de referência foi de 19343,43 MPa. O modelo C3D8-10 apresentou o menor erro, seguido de muito perto pelo C3D8-U, enquanto o modelo C3D8-I apresentou o maior desvio percentual, com erro de 7,25%, evidenciando que o uso de propriedades isotrópicas simplifica a análise, trazendo uma condição mais rígida e divergente à anisotropia natural da madeira (SANDHAAS; VAN DE KUILEN, 2013; ARRIAGA *et al.*, 2023).

Tabela 3 - Variação do erro na validação dos modelos numéricos

Modelo	$P_{L/350}$ (kN)	E (MPa)	Erro _E (%)
C3D8-5	1,92	19853,53	2,64%
C3D8-10	2,12	19489,33	0,75%
C3D8-15	2,03	18291	5,44%
C3D8-20	2,02	18213,33	5,84%
C3D8-I	2,56	20746,12	7,25%
C3D8-U	2,12	19490,43	0,76%

Cumprir destacar que a proximidade entre os modelos C3D8-10 e C3D8-U decorre das próprias hipóteses adotadas, visto que a interação do tipo tie impõe continuidade plena de deslocamentos entre as faces das lamelas.

Além disso, a Figura 5 ilustra a relação entre o tempo de processamento e o erro percentual de cada modelo. Nota-se que, embora o modelo isotrópico tenha exigido um tempo de simulação relativamente baixo, esse ganho computacional é acompanhado de um aumento expressivo do erro. Por outro lado, o modelo unificado além de manter um processamento reduzido, apresentou um erro percentual similar ao modelo de referência.

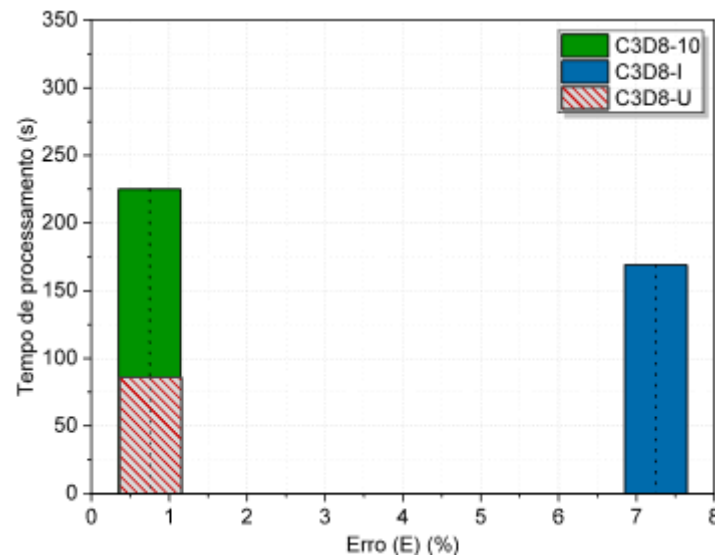


Figura 5 - Tempo de processamento $\times$ erro dos modelos numéricos adicionais

Em relação a distribuição das tensões nas vigas adicionais, foi feita uma análise comparativa entre as tensões normais e cisalhantes das vigas C3D8-10, C3D8-I e C3D8-U. Na Figura 6a, observa-se que o modelo C3D8-10 apresenta uma distribuição de tensões normais com gradiente contínuo ao longo da altura da seção, com variação simétrica entre as regiões tracionadas e comprimidas, com o campo de tensões linear, comportamento comum em vigas submetidas à flexão (BEER *et al.* 2014).

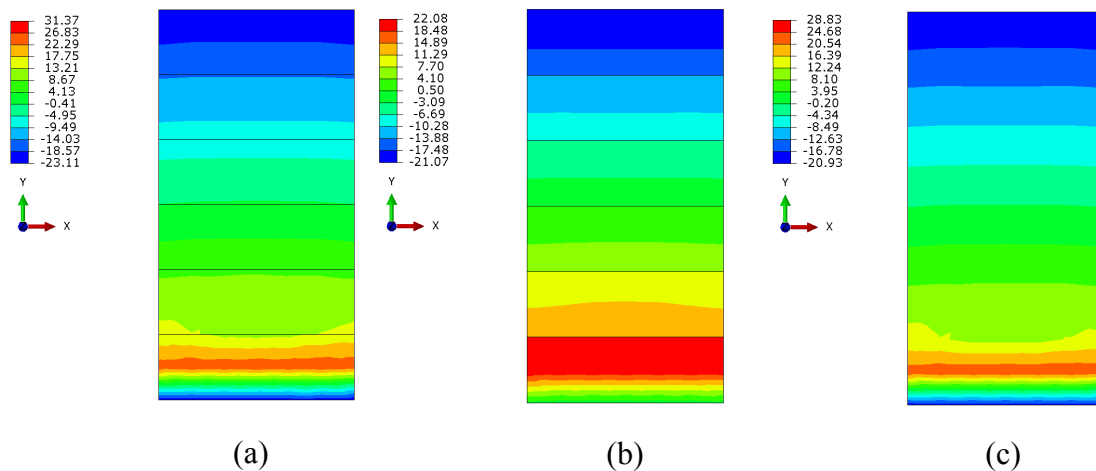
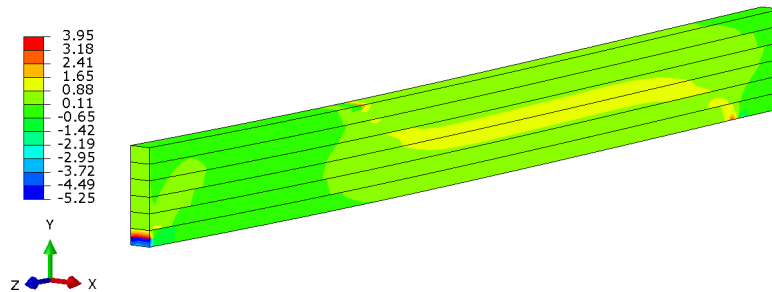


Figura 6 - Tensão normal na seção crítica nos modelos: C3D8-10 (a), C3D8-I (b) e C3D8-U (c)

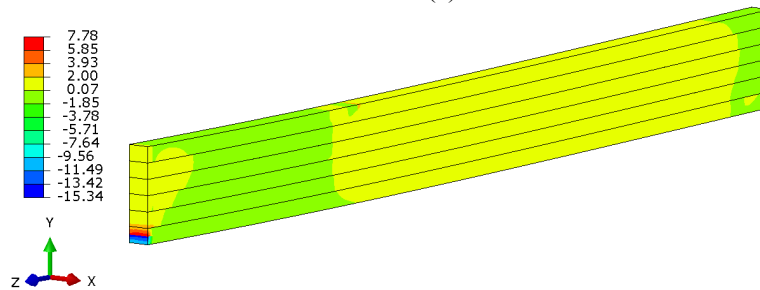
Na Figura 6b, o modelo C3D8-I apresenta um comportamento divergente, com intensas concentrações de tensão na região tracionada e um gradiente de tensões menos linear, sobretudo próximo à extremidade inferior da seção, com um valor máximo inferior aos demais modelos, onde esse desvio é consistente com a hipótese isotrópica aplicada à madeira, por ser um material altamente anisotrópico (CHAKKOUR; PERRE, 2024). Ademais, a Figura 6c mostra que, apesar da ausência de subdivisão em lamelas, o modelo C3D8-U apresenta uma distribuição de tensões normais próxima àquela obtida com o modelo C3D8-10, com um comportamento que representa a seção unificada com a interação *tie*.

Quanto às tensões de cisalhamento, a Figura 7 evidencia a diferença na forma de propagação do esforço ao longo da alma da viga. Em vigas retangulares em regime

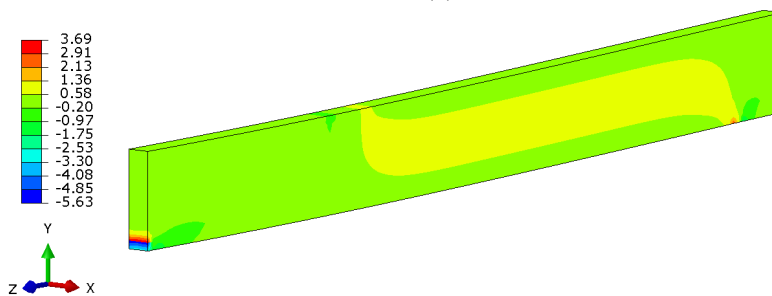
elástico, a tensão de cisalhamento apresenta distribuição parabólica com valores máximos no eixo neutro e tendem a se dissipar ao longo do vão (ZHOU; FU; AN, 2020). Na Figura 7a, o modelo C3D8-10 apresenta picos de cisalhamento localizados nas proximidades dos apoios e da aplicação do deslocamento, com uma propagação gradual da tensão ao longo do eixo longitudinal, com uma maior presença do esforço nas camadas das lamelas.



C3D8-10 (a)



C3D8-I (b)



C3D8-U (c)

Figura 7 - Tensão cisalhante nos modelos numéricos: C3D8-10 (a), C3D8-I (b) e C3D8-U (c)

A Figura 7b destaca que, no modelo C3D8-I, a concentração de tensões cisalhantes é mais difusa e apresenta maior espalhamento pela seção transversal, com valores máximos aproximadamente duas vezes superiores ao modelo C3D8-10. Por fim, a Figura 7c, referente ao modelo C3D8-U, demonstrou uma distribuição de tensões de cisalhamento semelhante à do modelo C3D8-10, mesmo sem a representação lamelar, houve apenas pequenas diferenças entre a distribuição desse esforço com uma transição mais gradual entre os níveis de tensão ao longo da altura da seção e sem o aumento desse esforço devido à discretização da viga, por conta da adoção da interação do tipo *tie* nos modelos.

4. Conclusão

A partir dos dados obtidos, foi possível identificar a influência de diversas técnicas de modelagem de vigas de MLC no desempenho desse elemento. O tempo de processamento e a resposta do modelo são sensíveis às diversas configurações e

simplificações necessárias para a simulação deste tipo de elemento. Portanto, com base nos resultados encontrados, pode-se concluir que:

- A viga C3D8-10 apresentou a melhor relação entre precisão e tempo, reproduzindo a resposta de referência com erro baixo e tempo moderado;
- Refinamento excessivo da viga C3D8-5 elevou o tempo de processamento e ainda aumentou o erro, o que pode ser justificado pela presença de imperfeições no modelo de referência que não foram consideradas neste estudo. Ademais, as maiores malhas das vigas C3D8-15 e C3D8-20 reduziram o tempo, porém com perda de fidelidade frente ao modelo de referência se comparada ao melhor resultado, sendo a malha de 10 mm.
- O elemento linear C3D8-I, modelo isotrópico, acelerou a simulação, porém trouxe maior rigidez e, por conseguinte, ampliou o erro, reforçando a teoria da alta anisotropia da madeira. A viga C3D8-U, modelo unificado, manteve erro semelhante ao de referência com tempo de processamento menor, sendo uma alternativa simplificada;
- Cabe registrar que a validação se apoiou nos dados de Terezo e Szücs (2010), restritos ao módulo de elasticidade, sem o registro da curva força-deslocamento dos ensaios. Sugere-se que trabalhos futuros avancem sobre ensaios com registro da curva força-deslocamento, a fim de estender a comparação entre as estratégias de modelagem e aos modos de ruptura, bem como replicar a metodologia aqui apresentada para outras espécies amazônicas com potencial de uso em MLC.

Referências

- ABED, J. *et al.* *A review of the performance and benefits of mass timber as an alternative to concrete and steel for improved sustainability of the built environment*. Sustainability, Basel, v. 14, n. 9, p. 1–24, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su14095570>.
- ALMEIDA, D. H. de *et al.* *Madeira laminada colada (MLC) da espécie Paricá*. Revista Madeira: Arquitetura e Engenharia, n. 14, p. 71–82, jul. 2011.
- ALVES, L. F. *et al.* *Numerical Evaluation of the Influence of Using Carbon-Fiber-Reinforced Polymer Rebars as Shear Connectors for Cross-Laminated Timber–Concrete Panels*. Buildings, v. 14, n. 7, p. 2178, 15 jul. 2024.
- ARRIAGA, F. *et al.* *Mechanical properties of wood: a review*. Forests, Basel, v. 14, p. 1202, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/f14061202>.
- ASSIS, L. F. *et al.* *Análise de vigas de madeira reforçadas com barras de FRP pela técnica NSM*. Matéria (Rio de Janeiro), v. 29, n. 2, 2024.
- ARZOLA-VILLEGAS, X. *et al.* *Moisture-dependent transverse isotropic elastic constants of wood S2 secondary cell wall layers determined using nanoindentation*. Forests, Basel, v. 16, n. 5, p. 712, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/f16050712>.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 7190-1: Projeto de estruturas de madeira. Parte 1: Critérios de dimensionamento*. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.
- BATHE, K. -J. *Finite element procedures*. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1996.
- BEER, F. P. *et al.* *Mechanics of Materials*. 7. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014. 896 p. ISBN 978-0-07-339823-5.
- CALIL JÚNIOR, C. *et al.* *Estruturas de Madeira: projetos, dimensionamento e exemplos de cálculo*.

Rio de Janeiro: Elsevier, 2019.

CHAKKOUR, T.; PERRÉ, P. *Developing the orthotropic linear-elastic model for wood applications using the FE method.* Materials Advances, v. 5, n. 19, p. 7747-7765, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1039/d4ma00554f>.

DERKOWSKI, A. et al. *Selected Mechanical Properties of Glue-Laminated Timber Produced from Locally Repaired Timber.* Materials, [s. l.], v. 15, n. 22, p. 8112, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma15228112>.

DUKARSKA, D.; MIRSKI, R. *Wood-based materials in building.* Materials, v. 16, n. 8, p. 2987, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma16082987>.

ENCINAS, F. et al. *Perceptions, tensions, and contradictions in timber construction: insights from end-users in a Chilean mass timber housing complex.* Buildings, Basel, v. 14, n. 9, p. 1–20, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/buildings14092813>.

HILL, R. *The mathematical theory of plasticity.* New York: Oxford University Press, 1950.

IŞLEYEN, Ü. K.; PEKER, I. *Effects of layer number and finger direction on bending behavior of glulam beams.* BioResources, v. 15, n. 2, p. 4217–4233, 2020.

JOŃCZYK, D. *A comparative numerical analysis of glued laminated timber beams reinforced with bars made of various materials.* Budownictwo o Zoptimalizowanym Potencjale Energetycznym, v. 10, n. 1, p. 151–159, 2021. DOI: 10.17512/bozpe.2021.1.16.

KYTKA, T. et al. *Predicted and Experimental Bending Behaviour of Glulam Bonded by RPF Adhesive.* Materials, [S.l.], v. 17, n. 2, p. 514, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma17020514>.

MASTELA, L. C. *Avaliação experimental, teórica e numérica de vigas em madeira lamelada colada de eucalipto.* 2023. 159 f. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Espírito Santo. Disponível em: <https://repositorio.ufes.br/handle/10/16990>.

NEVES, P. H. L. *Aplicação de madeiras amazônicas em elementos de madeira lamelada colada (MLC).* 2023. 80 f. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Pará, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Belém, 2023.

PEIXOTO, L. S. et al. *Numerical study on the serviceability performance of reinforced glulam beams with different steel reinforcements.* Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 24, n. 1, p. 263–289, 2024. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212024000100759>.

PFEIL, W.; PFEIL, M. *Estruturas de Madeira.* 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

RAMAGE, M. H. et al. *The wood from the trees: The use of timber in construction.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, [s. l.], v. 68, p. 333–359, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.107>.

RODRIGUES, R.A de. *Elementos estruturais MLC confeccionados com madeira de Jacaranda copaia e reforçados externamente com perfis GFRP: Avaliação Experimental.* 2023. 70 f. Dissertação (Mestrado) — Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2023.

SANDHAAS, C.; VAN DE KUILEN, J. W. G. *Material model for wood.* HERON, Delft, v. 58, n. 2/3, p. 171–192, 2013.

SOTSEK, N. C.; SANTOS, A. P. L de. *Panorama do sistema construtivo light wood frame no Brasil.* Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 18, n. 3, p. 179–199, jul./set. 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212018000300283>.

SZCZECINA, M. *Study of complexity of numerical models of a strengthened timber beam.* Materials, v. 16, n. 9, p. 3466, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16093466>.

TEREZO, R. F.; SZÜCS, C. A. *Análise de desempenho de vigas em madeira laminada colada de parica (Schizolobium amazonicum Huber ex. Ducke).* Scientia Forestalis, Piracicaba, v. 38, n. 87, p. 471–480, set. 2010.

TIMOSHENKO, S. *Strength of materials.* vol. 1. 2nd ed. New York: D. Van Nostrand Company, 1940.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. *Wood handbook: wood as an engineering material.* General Technical Report FPL-GTR-190. Madison: USDA, Forest Service, 2010. 508 p.

UZEL, M. et al. *Experimental investigation of flexural behavior of glulam beams reinforced with different bonding surface preparation methods.* Construction and Building Materials, [s. l.], v. 158, p. 149–163, 2018.

ZHOU, M.; FU, H.; AN, L. *Distribution and Properties of Shear Stress in Elastic Beams with Variable Cross Section: Theoretical Analysis and Finite Element Modelling.* KSCE J Civ Eng v. 24, p. 1240–1254, 2020.