REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 13/02/2026
Vol: 02.01
DOI: 10.66104/cjp37k13
Pages: 1-23

ANÁLISE NUMÉRICA DA RIGIDEZ DE VIGAS T MISTAS DE CONCRETO E MADEIRA LAMELADA COLADA EM REGIME ELÁSTICO LINEAR: UMA ABORDAGEM ORTOTRÓPICA PARA A MADEIRA

NUMERICAL ANALYSIS OF THE STIFFNESS OF CONCRETE–GLULAM COMPOSITE T-BEAMS IN THE LINEAR ELASTIC REGIME: AN ORTHOTROPIC APPROACH FOR TIMBER

ANÁLISIS NUMÉRICO DE LA RIGIDEZ DE VIGAS COMPUESTAS EN SECCIÓN T DE HORMIGÓN Y MADERA LAMINADA ENCOLADA EN RÉGIMEN ELÁSTICO LINEAL: ENFOQUE ORTOTRÓPICO DE LA MADERA

Sidnei Marcondes de Jesus
Mestrando em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Brasil
E-mail: sidneimarcondes@alunos.utfpr.edu.br

Guilherme Santos da Silveira
Mestre em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Brasil
E-mail: gsilveira_s@outlook.com.br

Gustavo de Miranda Saleme Gidrão
Professor e Doutor em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Brasil
E-mail: gidrao@utfpr.edu.br

Rúbia Mara Bosse
Professora e Doutora em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Brasil
E-mail: rubiamgbosse@utfpr.edu.br

Rodrigo Scoczynski Ribeiro
Professor e Doutor em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Brasil
E-mail: rodrigosribeiro@professores.utfpr.edu.br

Rodrigo de Souza Nogueira
Professor e Pós-Doutor em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Brasil
E-mail: rodrigosouzan@hotmail.com

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 13/02/2026
Vol: 02.01
DOI: 10.66104/cjp37k13
Pages: 1-23

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento, calibração e validação de um modelo numérico tridimensional em regime elástico linear para vigas mistas madeira–concreto em seção T, implementado no software Abaqus. A madeira lamelada colada foi modelada como material ortotrópico tridimensional, com definição explícita das constantes elásticas nas direções longitudinal, radial e tangencial e adequada transformação para o sistema global da estrutura. O concreto foi representado como material isotrópico no regime pré-fissuração. O modelo foi validado com base em resultados experimentais da literatura no trecho linear da curva força–deslocamento, apresentando diferença percentual de 6% na rigidez inicial após a consideração da flexibilidade dos apoios. Foi conduzida análise de convergência de malha e estudo paramétrico envolvendo diferentes espécies de madeira (Larício e *Eucalyptus grandis*) e classes de concreto (C37 e UHPC). Os resultados indicam que ambos os materiais influenciam a rigidez global; entretanto, para a geometria analisada, a substituição do Larício por *Eucalyptus grandis* (mantido C37) promoveu incremento aproximado de 13% na rigidez, enquanto a substituição do C37 por UHPC (mantido Larício) resultou em aumento da ordem de 6%. Conclui-se que, no regime elástico linear considerado, a influência da madeira mostrou-se mais pronunciada que a da classe do concreto. O estudo reforça a importância da modelagem ortotrópica tridimensional para previsão adequada da rigidez de sistemas híbridos madeira–concreto.

Palavras-chave: Vigas mistas; Madeira lamelada colada; Ortotropia; Método dos Elementos Finitos; Rigidez estrutural.

ABSTRACT

This study presents the development, calibration, and three-dimensional finite element analysis of timber–concrete composite T-beams in the linear elastic regime, implemented in Abaqus. Glued laminated timber was modeled as a fully orthotropic material, with explicit definition of elastic constants in the longitudinal, radial, and tangential directions and proper transformation to the global structural coordinate system. Concrete was represented as an isotropic material within the pre-cracking elastic range. The numerical model was validated against experimental results reported in the literature, achieving 6% deviation in initial stiffness after accounting for support flexibility. A mesh convergence study and a parametric investigation were conducted considering different timber species (larch and *Eucalyptus grandis*) and concrete classes (C37 and UHPC). Results show that both materials affect global stiffness; however, for the analyzed geometry, replacing larch with *Eucalyptus grandis* (with C37 concrete) increased stiffness by approximately 13%, whereas replacing C37 with UHPC (with larch) led to an increase of about 6%. These findings indicate that, in the linear elastic regime and under perfect bond assumption, timber properties exert a more pronounced influence on initial stiffness than concrete class. The study highlights the importance of full orthotropic modeling for accurate stiffness prediction in hybrid timber–concrete systems.

Keywords: Timber–concrete composite beams; Glulam; Orthotropic materials; Finite element modeling; Structural stiffness.

RESUMEN

Este estudio presenta el desarrollo, calibración y análisis numérico tridimensional mediante elementos finitos de vigas compuestas madera–hormigón en sección T, en régimen elástico lineal, implementado en Abaqus. La madera laminada encolada fue modelada como material completamente ortotrópico, con definición explícita de las constantes elásticas en las direcciones longitudinal, radial y tangencial y adecuada transformación al sistema global de coordenadas estructurales. El hormigón fue representado como material isotrópico en el rango elástico previo a la fisuración. El modelo numérico fue validado con resultados experimentales reportados en la literatura, presentando una diferencia de

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 13/02/2026
Vol: 02.01
DOI: 10.66104/cjp37k13
Pages: 1-23

6% en la rigidez inicial tras considerar la flexibilidad de los apoyos. Se realizó un estudio de convergencia de malla y un análisis paramétrico considerando diferentes especies de madera (laricio y *Eucalyptus grandis*) y clases de hormigón (C37 y UHPC).
Los resultados indican que ambos materiales influyen en la rigidez global; sin embargo, para la geometría analizada, la sustitución del laricio por *Eucalyptus grandis* (con hormigón C37) produjo un incremento aproximado del 13% en la rigidez, mientras que la sustitución del C37 por UHPC (con laricio) generó un aumento cercano al 6%. Se concluye que, en el régimen elástico lineal y bajo la hipótesis de adherencia perfecta, la influencia de la madera resulta más significativa que la del hormigón en la rigidez inicial del sistema compuesto.
Palabras clave: Vigas compuestas; Madera laminada encolada; Ortotropía; Elementos finitos; Rigidez estructural.

1. Introdução

A combinação entre madeira lamelada colada (MLC) e concreto tem se mostrado uma alternativa eficiente e sustentável para sistemas estruturais híbridos. Vigas mistas madeira–concreto em seção T apresentam vantagens relevantes em termos de rigidez e capacidade resistente, contribuindo para soluções inovadoras na engenharia estrutural (Ceccotti, 2002; Fragiacomo; Lukaszewska, 2015; Shi; Liu; Yang, 2024). Estudos recentes demonstram que esses sistemas compósitos combinam a alta resistência à tração da madeira com a elevada resistência à compressão do concreto, resultando em maior eficiência estrutural e redução do impacto ambiental quando comparados a soluções totalmente em concreto (Du et al., 2022; Forti et al., 2015).

Nesse contexto, a utilização do Método dos Elementos Finitos (MEF) constitui uma etapa fundamental para a análise tridimensional do comportamento estrutural de sistemas híbridos madeira–concreto, uma vez que permite a representação explícita da formulação constitutiva de cada material e da interação mecânica entre componentes com naturezas distintas(Bathe, 2006; Oudjene et al., 2018; Tao et al., 2022). No âmbito da elasticidade linear, o MEF possibilita a implementação direta das matrizes constitutivas anisotrópicas, assegurando a correta relação entre tensões e deformações em cada ponto do domínio discretizado.

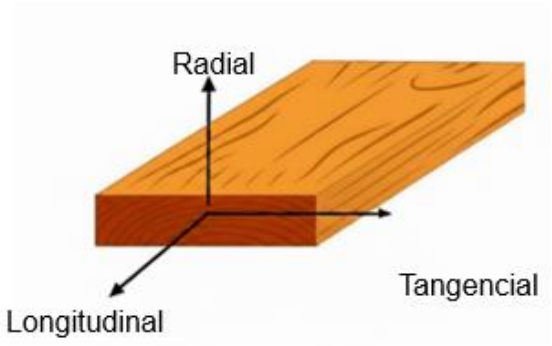
Para materiais ortotrópicos, como é o caso da madeira lamelada colada, a resposta mecânica é governada por propriedades elásticas distintas nas direções longitudinal, radial e tangencial (vide Fig. 1), o que implica a definição de uma matriz constitutiva dependente da orientação dos eixos materiais (Tashakori; Salem, 2024).

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 13/02/2026
Vol: 02.01
DOI: 10.66104/cjp37k13
Pages: 1-23

Dessa forma, a correta atribuição das direções principais de elasticidade e sua consistente associação ao sistema de coordenadas local do modelo numérico tornam-se aspectos determinantes para a coerência física da simulação 3D. Portanto, a transformação tensorial entre o sistema global da estrutura e o sistema local do material influencia diretamente os campos de tensão previstos, a rigidez global da viga e a redistribuição interna de esforços entre concreto e madeira.

Figura 1 - Ortotropia da madeira.



Assim, no regime elástico linear, a madeira pode ser descrita como um sólido ortotrópico com três eixos principais L(longitudinal), R(radial) e T(tangencial), para o qual a relação tensão–deformação no sistema local é dada pela Eq. 1:

$$\boldsymbol{\sigma}^{(LRT)} = \mathbf{C}_0\, \boldsymbol{\varepsilon}^{(LRT)}, \textit{ (1)}$$

Ou então:

$$\boldsymbol{\varepsilon}^{(\mathrm{LRT})} = \mathbf{S}_0\, \boldsymbol{\sigma}^{(\mathrm{LRT})}, \text{ (2)}$$

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 13/02/2026
Vol: 02.01
DOI: 10.66104/cjp37k13
Pages: 1-23

Em que:

$\varepsilon^{(\mathrm{LRT})} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{\mathrm{L}} \\ \varepsilon_{\mathrm{R}} \\ \varepsilon_{\mathrm{T}} \\ \gamma_{\mathrm{RT}} \\ \gamma_{\mathrm{LT}} \\ \gamma_{\mathrm{LR}} \end{bmatrix}$ e $\sigma^{(\mathrm{LRT})} = \begin{bmatrix} \sigma_{\mathrm{L}} \\ \sigma_{\mathrm{R}} \\ \sigma_{\mathrm{T}} \\ \tau_{\mathrm{RT}} \\ \tau_{\mathrm{LT}} \\ \tau_{\mathrm{LR}} \end{bmatrix}$ são respectivamente os vetores de deformações e tensões nas direções L, R e T.

Com a matriz S_0 de flexibilidade dada pela Eq. (3):

$$\mathbf{S}_0 = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_L} & -\frac{\nu_{RL}}{E_R} & -\frac{\nu_{TL}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LR}}{E_L} & \frac{1}{E_R} & -\frac{\nu_{TR}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LT}}{E_L} & -\frac{\nu_{RT}}{E_R} & \frac{1}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RT}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LT}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LR}} \end{bmatrix}, \nu_{ij}\frac{1}{E_i} = \nu_{ji}\frac{1}{E_j}. \quad (3)$$

A matriz $\mathbf{C}_0 = \mathbf{S}_0^{-1}$ depende das constantes elásticas do material $\{E_L, E_R, E_T, G_{LR}, G_{LT}, G_{RT}, \nu_{LR}, \nu_{LT}, \nu_{RT}\}$. Em um modelo tridimensional por MEF, os campos de tensão e deformação são formulados no sistema global (x, y, z), de modo que a orientação dos eixos materiais deve ser introduzida por uma rotação $\mathbf{R}$(definida por ângulos de Euler ou cossenos diretores). A relação constitutiva no sistema global assume a forma da Eq. 4:

$$\boldsymbol{\sigma}^{(xyz)} = \mathbf{C}^{(xyz)}\,\boldsymbol{\varepsilon}^{(xyz)}, \mathbf{C}^{(xyz)} = \mathbf{T}^{-1}(\mathbf{R})\,\mathbf{C}_0\,\mathbf{T}^{-T}(\mathbf{R}), \textit{(4)}$$

Onde $\mathbf{T}(\mathbf{R})$é o operador de transformação para tensores de segunda ordem (na notação vetorial de Voigt). Portanto, erros na atribuição de $\mathbf{R}$(por exemplo, permutas entre L, Re T ou rotações indevidas) alteram a matriz $\mathbf{C}^{(xyz)}$e, consequentemente, a rigidez global e a redistribuição de esforços entre madeira e

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 13/02/2026
Vol: 02.01
DOI: 10.66104/cjp37k13
Pages: 1-23

concreto, mesmo em regime linear.

Cabe salientar que a determinação experimental das constantes elásticas ortotrópicas da madeira $\{E_L, E_R, E_T, G_{LR}, G_{LT}, G_{RT}, \nu_{LR}, \nu_{LT}, \nu_{RT}\}$ é realizada através de um conjunto de ensaios mecânicos padronizados. Os módulos de elasticidade longitudinal, radial e tangencial (E_L, E_R, E_T) são obtidos principalmente por meio de ensaios de compressão, tração e flexão nas três direções principais, sendo que ensaios de compressão estática em corpos de prova prismáticos são amplamente utilizados além de serem obtidos por métodos ultrassônicos (Gonçalves; Trinca; Cerri, 2011; Hering; Keunecke; Niemz, 2012). Os módulos de cisalhamento (G_{LR}, G_{LT}, G_{RT}) são determinados através de ensaios específicos, como torsão, ensaio de Iosipescu e ensaios de tração/compressão fora do eixo, que permitem a caracterização do comportamento ao cisalhamento nos três planos materiais(Nadir et al., 2014). Os coeficientes de Poisson são medidos diretamente por extensometria durante ensaios quasi-estáticos, utilizando configurações de strain gauges em ponte de Wheatstone completa para registrar deformações em múltiplas direções (Mantilla Carrasco et al., 2022), ou indiretamente através de métodos dinâmicos como ultrassom e ressonância, embora a geometria do corpo de prova influencie significativamente a confiabilidade dos resultados (Gonçalves; Trinca; Pellis, 2014; Xu et al., 2023). Métodos não destrutivos, incluindo ultrassom, ondas de tensão e análise de vibrações, são frequentemente empregados como alternativas validadas aos ensaios estáticos, fornecendo estimativas de rigidez em elementos estruturais de madeira lamelada colada sem comprometer a integridade do material (Dackermann et al., 2016; Teles et al., 2010; Vorobyev et al., 2016).

Outra complexidade relevante na modelagem de vigas mistas madeira–concreto está associada ao sistema de conexão entre os materiais, responsável pela transferência dos esforços de cisalhamento na interface e, consequentemente, pela eficiência da ação composta. A ligação pode ser realizada por diferentes dispositivos mecânicos, como pregos e placas metálicas, cuja eficiência estrutural como conectores de cisalhamento foi discutida por Aicher et. al (2003)Estudos mais recentes analisaram conectores discretos e contínuos, demonstrando que o tipo de ligação influencia diretamente a rigidez global e a

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 13/02/2026
Vol: 02.01
DOI: 10.66104/cjp37k13
Pages: 1-23

ductilidade do sistema estrutural (Naud et al., 2019). Investigações complementares também avaliaram o comportamento de conectores parafusados e soluções alternativas, como entalhes em cauda de andorinha aplicados a sistemas CLT–concreto, evidenciando o impacto da configuração da interface no desempenho mecânico do conjunto (Ouch et al., 2023). No contexto da modelagem numérica em regime elástico, a representação desses conectores pode ser realizada por meio de elementos rígidos, de mola com rigidez equivalente ou por formulações baseadas em contato, conforme discutido por (Khorsandnia; Valipour; Bradford, 2018; Lopes; Jorge; Cruz, 2012).

Diante disso, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver, calibrar e validar um modelo numérico tridimensional no ramo linear elástico de vigas mistas em seção T compostas por concreto e madeira lamelada colada (MLC), implementado no software Abaqus, com base em resultados experimentais disponíveis na literatura (Du et. Al, 2021). Após a validação do modelo de referência, procede-se à substituição das propriedades mecânicas da madeira por diferentes espécies brasileiras amplamente utilizadas na engenharia estrutural, visando realizar uma análise comparativa da rigidez global e da distribuição interna de tensões para cada material. Essa abordagem permite avaliar a influência das propriedades ortotrópicas específicas de cada espécie na resposta estrutural do sistema híbrido, contribuindo para o aprimoramento de critérios de seleção de materiais e para o desenvolvimento de metodologias de projeto mais seguras e eficientes para a realidade brasileira.

2. Modelagem numérica

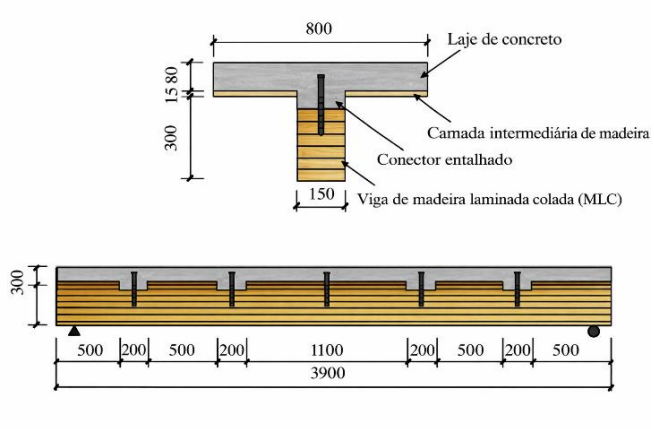
O presente estudo foi desenvolvido por meio de modelagem numérica utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF), implementado no software Abaqus, com o objetivo de representar o comportamento estrutural de vigas mistas em seção T compostas por concreto e madeira lamelada colada (MLC) conforme a Figura 2. A análise numérica foi calibrada e validada a partir de resultados

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 13/02/2026
Vol: 02.01
DOI: 10.66104/cjp37k13
Pages: 1-23

experimentais disponíveis na literatura (Du et al., 2021) permitindo a reprodução da resposta global e dos mecanismos locais de dano do sistema estrutural.

Figura 2- Dimensões da viga mista.



Fonte: DU et al., (2021).

Conforme comentado anteriormente, a madeira é um material natural, heterogêneo e anisotrópico, cujas propriedades mecânicas variam conforme as três direções principais: longitudinal, radial e tangencial (Figueroa; Moraes, 2009). Devido a essa anisotropia, a madeira, inclusive quando utilizada na forma de madeira lamelada colada (MLC), pode ser adequadamente representada como um material ortotrópico na modelagem numérica, com módulos de elasticidade distintos em cada direção principal conforme (Mascia, 1991). Dessa forma, na modelagem numérica dessas vigas mistas, consideram-se propriedades elásticas diferenciadas, conforme os parâmetros elásticos adotados a partir de dados da literatura (Du et al., 2021; Nogueira, 2023). Os valores finais utilizados na modelagem para a espécie brasileira *Eucalyptus grandis* são apresentados na Tabela 1.

No ambiente computacional, o material foi definido no Abaqus por meio da opção *Elastic → Engineering Constants*, que permite a inserção direta das constantes ortotrópicas tridimensionais. Estabeleceu-se a correspondência entre os eixos locais do software e as direções anatômicas da madeira de modo que $E_1 = E_L$(direção longitudinal das fibras), $E_2 = E_R$(direção radial) e $E_3 = E_T$(direção

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 13/02/2026
Vol: 02.01
DOI: 10.66104/cjp37k13
Pages: 1-23

tangencial). De forma análoga, adotou-se $G_{12} = G_{LR}$, $G_{13} = G_{LT}$e $G_{23} = G_{RT}$, bem como $\nu_{12} = \nu_{LR}$, $\nu_{13} = \nu_{LT}$e $\nu_{23} = \nu_{RT}$. A orientação do material foi definida de modo que o eixo 1 coincidisse com o eixo longitudinal da viga, assegurando consistência entre a formulação constitutiva ortotrópica e sua implementação na análise tridimensional.

Tabela 1 - Coeficientes elásticos utilizados na modelagem da madeira.

Espécies	E_L(MPa)	E_T(MPa)	E_R(MPa)	G_{RT} (MPa)	G_{LT}(MPa)	G_{LR} (MPa)	ν_{TR}	ν_{TL}	ν_{LR}
Eucalyptus grandis (Nogueira, 2023)	16030	529	1133	51.94	489.09	507.97	0.22	0.03	0.02
Larício (Du et al., 2021)	10780	359	768	35.2	331.6	344.6	0.22	0.03	0.02

Fonte: (Du et al., 2021; Nogueira, 2023).

No contexto da presente análise, restrita ao regime elástico linear e à avaliação da rigidez global das vigas mistas, a escolha da espécie de madeira exerce influência direta na resposta estrutural. A rigidez à flexão do sistema composto depende da contribuição relativa de cada material, sendo particularmente sensível ao módulo de elasticidade longitudinal da madeira (E_L), uma vez que a alma de MLC atua predominantemente sob tração.

A comparação dos valores apresentados na Tabela 1 evidencia que os parâmetros adotados na literatura correspondem a uma redução aproximadamente uniforme das constantes elásticas da espécie brasileira *Eucalyptus grandis*, com diminuição de 32,75% em E_L(16030 MPa para 10780 MPa), além de reduções da ordem de 32% em E_R, E_Te nos módulos de cisalhamento G_{LR}, G_{LT}e G_{RT}, mantendo-se inalterados os coeficientes de Poisson. Essa variação praticamente proporcional indica a aplicação implícita de um fator de escala uniforme às constantes elásticas, preservando as relações de anisotropia entre as direções principais.

O concreto foi modelado no regime elástico linear como material isotrópico

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 13/02/2026
Vol: 02.01
DOI: 10.66104/cjp37k13
Pages: 1-23

homogêneo, definido unicamente por seu módulo de elasticidade E_ce coeficiente de Poisson ν, conforme apresentado na Tabela 4. A hipótese de isotropia é adotada de forma consistente com a análise restrita ao regime pré-fissuração, no qual o comportamento do concreto pode ser adequadamente representado por uma relação constitutiva linear dependente de apenas duas constantes independentes. Diferentemente da madeira, cuja anisotropia exige a definição explícita de propriedades direcionais, o concreto não apresenta orientação preferencial de suas propriedades mecânicas em escala macroscópica, justificando a utilização de uma matriz constitutiva isotrópica na forma clássica da elasticidade linear.

No ambiente computacional do Abaqus, essa modelagem foi implementada por meio da definição *Elastic* → *Isotropic*, na qual foram inseridos os valores de E_c e ν correspondentes às classes C37 e UHPC(Silveira, 2025), conforme a Tabela 2. Diversos estudos têm empregado essa abordagem com sucesso na modelagem de elementos estruturais com UHPC e concreto convencional (Jabbar; Al-Zuheriy; Hasan, 2024; Tong et al., 2021). Sob essa hipótese, a matriz constitutiva do concreto depende apenas de E_c e ν, conforme demonstrado por (TIAN et al., 2023; Verma; Bajpai, 2022). Considerando que o foco do presente estudo está na avaliação da rigidez global da viga mista em regime elástico, a adoção da isotropia para o concreto é adequada e não compromete a coerência física até a ativação das fissuras.

Tabela 2 - Propriedades mecânicas do concreto adotadas no Abaqus.

Concreto	Coeficiente de Poisson (v)	Módulo de elasticidade (MPa)	Resistência a Compressão (MPa)	Resistência a tração (MPa)
C37	0.2	29317	37	2.01
UHPC (sem fibras)	0.2	43228	135	3.83

Fonte: os autores (2026).

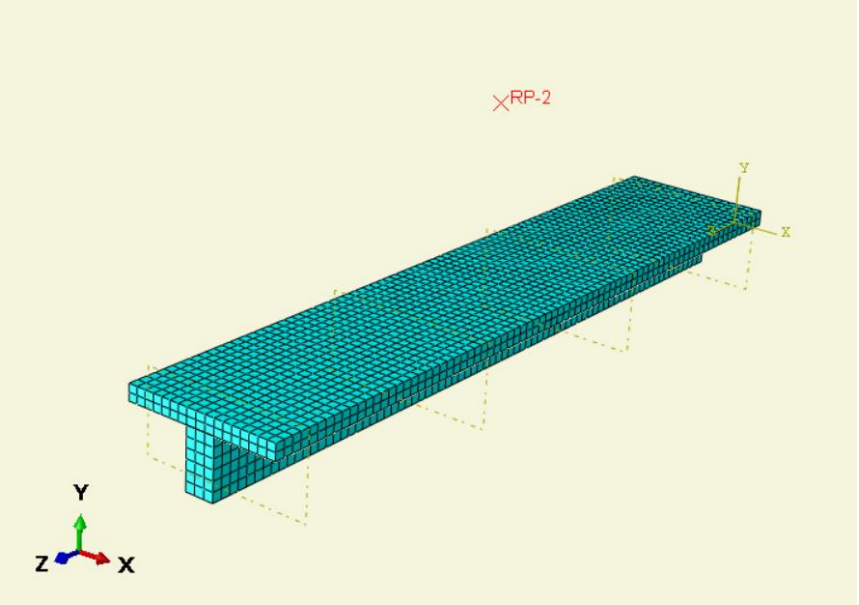
A viga mista madeira–concreto foi modelada tridimensionalmente por meio do método dos elementos finitos, utilizando elementos sólidos hexaédricos lineares de

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 13/02/2026
Vol: 02.01
DOI: 10.66104/cjp37k13
Pages: 1-23

oito nós com integração reduzida (C3D8R), disponíveis na biblioteca *Standard* do Abaqus. Esses elementos apresentam interpolação linear dos deslocamentos e controle automático de distorção (*hourglass control*), sendo adequados para análises estruturais com predominância de flexão, como no caso de vigas esbeltas. A discretização foi realizada com malha predominantemente estruturada e alinhada às direções principais da viga, garantindo boa qualidade geométrica dos elementos e baixa distorção numérica. Adotou-se um tamanho global aproximado de 50 mm, de modo a capturar adequadamente os gradientes de tensão e deformação. A malha foi construída com continuidade nodal entre os materiais, assegurando adequada transferência de esforços na interface quando considerada ligação perfeita (*Tie*), conforme é observado em estudos prévios (Chen et al., 2022). Cabe salientar que a consideração deste tipo de ligação é o limite superior de rigidez para a viga composta. Além disso, a orientação local do material foi devidamente definida para representar o comportamento ortotrópico da madeira, garantindo a correta associação entre as direções e o sistema de coordenadas do modelo numérico. A Figura 3 apresenta a malha da peça:

Figura 3- Malha do problema



As condições de contorno da viga mista madeira–concreto foram definidas de

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 13/02/2026
Vol: 02.01
DOI: 10.66104/cjp37k13
Pages: 1-23

modo a reproduzir um sistema estrutural simplesmente apoiado, conforme ilustrado no modelo numérico da Fig. 4.a e experimental da Fig. 2. Os apoios foram representados por restrições de deslocamento aplicadas nas extremidades inferiores da viga, impedindo a translação vertical na direção Y. Para evitar movimentos rígidos, foi também restringido o deslocamento longitudinal X em um dos apoios, enquanto o outro permaneceu livre nessa direção, permitindo a livre deformação axial da estrutura e evitando a introdução de esforços normais espúrios. O deslocamento transversal Z foi controlado de modo a garantir a estabilidade do modelo.

Com o objetivo de representar a flexibilidade do sistema de apoio experimental, foi introduzida uma mola linear no grau de liberdade vertical (direção Y) em cada apoio, com rigidez equivalente de 10.000 N/mm.

O carregamento foi aplicado por meio de imposição de deslocamento vertical controlado em um ponto de referência (RP-2), posicionado acima da região de aplicação da carga, conforme a Fig. 4.b. Esse ponto de referência foi conectado à superfície superior da viga através de uma restrição do tipo *Multi-Point Constraint* (MPC), distribuindo uniformemente o deslocamento imposto aos nós da área carregada, sendo utilizado para simular a aplicação de carga do atuador hidráulico. Essa estratégia garante aplicação estável do carregamento, melhor convergência numérica e representação adequada de um carregamento distribuído, evitando concentrações artificiais de tensão associadas à aplicação nodal direta.

A utilização de controle por deslocamento, em vez de controle por força, proporciona maior estabilidade numérica, especialmente em análises envolvendo não linearidades geométricas ou de material, além de permitir melhor captura do comportamento pós-pico, quando aplicável.

A análise numérica foi conduzida por meio de um passo do tipo *Static, General*, adequado para simulações quase-estáticas. O período total do passo foi definido como unitário (time period = 1), sendo o carregamento aplicado de forma incremental ao longo desse intervalo. A opção de não linearidade geométrica (*NLGEOM*) não foi considerada.

O controle de incrementação foi definido como automático, com número máximo de 10.000 incrementos, incremento inicial de 0,1, incremento mínimo de 1E-

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 13/02/2026
Vol: 02.01
DOI: 10.66104/cjp37k13
Pages: 1-23

8 e incremento máximo igual a 1.

O sistema de resolução adotado foi o método direto (*Direct Solver*). A técnica de solução empregada foi o método de Newton completo (*Full Newton*), no qual a matriz tangente é atualizada a cada iteração, proporcionando maior estabilidade e precisão na resolução de problemas com não linearidades geométricas ou constitutivas.

O carregamento foi configurado para variar linearmente ao longo do passo (*Ramp linearly over step*), garantindo aplicação gradual e evitando descontinuidades abruptas que poderiam comprometer a convergência. A extrapolação do estado anterior no início de cada incremento foi mantida como linear, contribuindo para acelerar o processo iterativo sem perda significativa de estabilidade.

Figura 4.a - Condições de apoio

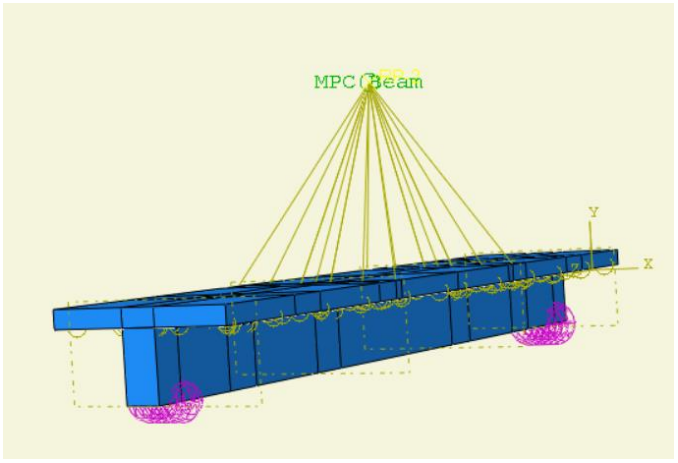
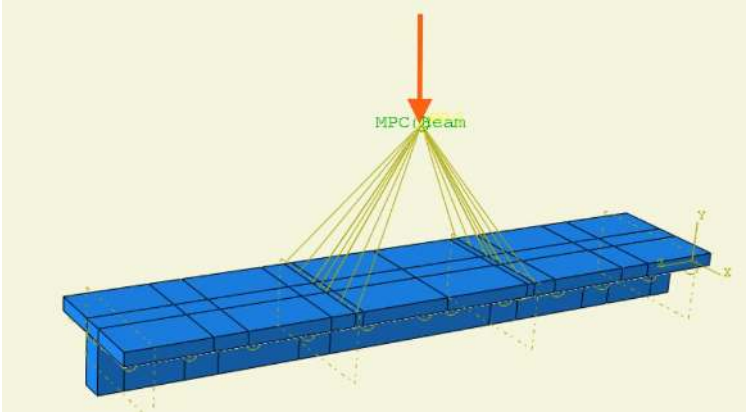


Figura 4.b – Aplicação de Carga



REMUNOM
ISSN 2178-6925

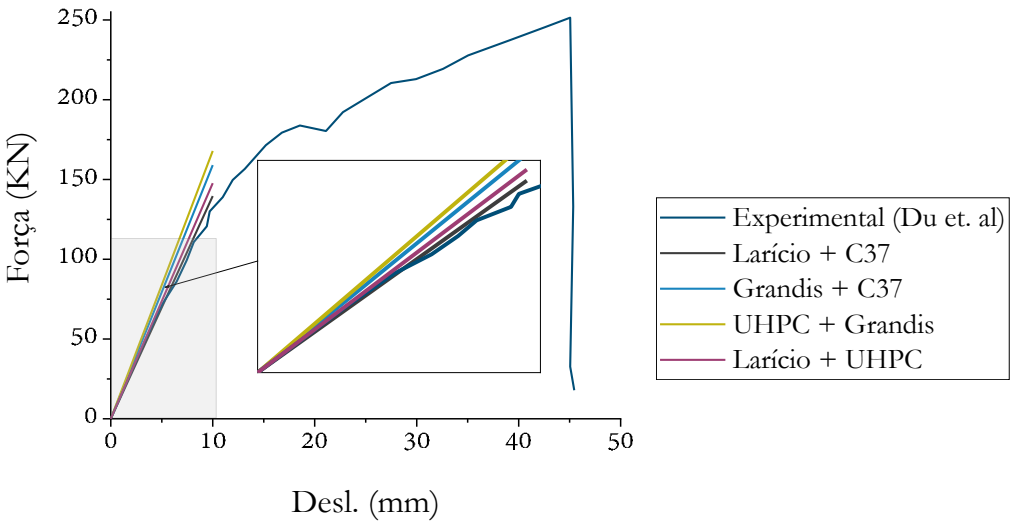
Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 13/02/2026
Vol: 02.01
DOI: 10.66104/cjp37k13
Pages: 1-23

3. Resultados e Discussão

A Figura 5 apresenta as curvas força–deslocamento no trecho linear das vigas T mistas madeira–concreto, comparadas com a curva experimental de referência reportada por Du et al. (2021) para o sistema Larício + C37 (curva preta). A análise foi conduzida considerando o trecho linear inicial da resposta estrutural, correspondente ao regime elástico observado experimentalmente.

Observa-se que o modelo numérico de referência (Larício + C37) reproduz de forma satisfatória a inclinação inicial da curva experimental. A rigidez obtida a partir da inclinação linear da curva experimental foi de aproximadamente 11,44 kN/mm, enquanto o modelo numérico correspondente apresentou 12,16 kN/mm, resultando em diferença absoluta de 0,72 kN/mm, equivalente a cerca de 6,3%. Essa discrepância permanece dentro de um intervalo aceitável para modelagens em regime elástico linear, considerando simplificações inerentes à representação numérica e à variabilidade natural das propriedades da madeira.

Figura 5 - Curvas de carga-deslocamento linear de vigas T compostas de concreto e GLT para diferentes rigidezes



Fonte: Autores (2026).

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 13/02/2026
Vol: 02.01
DOI: 10.66104/cjp37k13
Pages: 1-23

A análise paramétrica de materiais apresentada na Fig. 5 e também na tabela 3 evidencia tendência clara de crescimento da rigidez inicial em função da combinação dos materiais. Para uma mesma espécie de madeira (Larício), a substituição do concreto C37 por UHPC resultou em aumento da rigidez de 12,16 para 12,94 kN/mm, correspondente a acréscimo de 1,50 kN/mm (6%) em relação ao sistema experimental base. De forma análoga, mantendo-se o concreto C37, a substituição do Larício por *Eucalyptus grandis* elevou a rigidez para 13,77 kN/mm, representando incremento de 2,33 kN/mm (6%) em relação ao valor experimental.

A maior rigidez foi obtida para o sistema UHPC + Eucalyptus grandis, com valor de 14,62 kN/mm, correspondendo a aumento absoluto de 3,18 kN/mm quando comparado ao sistema experimental base (aumento de 13%). Esses resultados indicam que, para a geometria analisada, o aumento do módulo de elasticidade longitudinal da madeira produz impacto estrutural superior ao aumento do módulo do concreto.

Tabela 3 – Rigidezes calculadas dos modelos numéricos

Série	k (kN/mm)	Δ (kN/mm)
Experimental – larício + C37 (Du et al., 2021)	**11,44**	0
Larício + C37 (escuro)	12,16	0,72
Larício + UHPC (magenta)	12,94	1,50
C37 + `Grandis (azul claro)	13,77	2,33
UHPC + Grandis (amarelo)	14,62	3.18

A Figura 6 apresenta a distribuição das tensões normais longitudinais (S33) para os sistemas (a) Larício + C37 e (b) Eucalipto + UHPC, evidenciando o comportamento típico de flexão, com compressões predominantes na região superior e trações na região inferior da seção T. Observa-se que, embora ambos os sistemas apresentem padrão qualitativo semelhante, o modelo com Eucalipto +

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 13/02/2026
Vol: 02.01
DOI: 10.66104/cjp37k13
Pages: 1-23

UHPC exibe níveis de tensão ligeiramente mais elevados, refletindo a maior rigidez combinada dos materiais constituintes. A redistribuição de tensões entre madeira e concreto indica adequada compatibilidade de deformações na interface, coerente com a hipótese de ligação perfeita adotada.

Uma análise de convergência considerando os tamanhos de malha de 30 mm, 40 mm e 50 mm indica que a força máxima aumenta de 552,98 kN (30 mm) para aproximadamente 627,32 kN (50 mm), representando um acréscimo da ordem de 13,4%, conforme evidenciado na Fig. 7 a.

Por meio da Eq. 5, pode-se determinar o aumento da energia total de deformação em função do tamanho de malha, conforme observado na Fig. 7.b.

$$E_{tot} = \int_0^{\delta} F \cdot x \cdot dx = \frac{1}{2} F_{max} \cdot \delta \quad (5)$$

Em que: x é o deslocamento no meio do vão, F a força aplicada e δ o deslocamento final do problema estático linear.

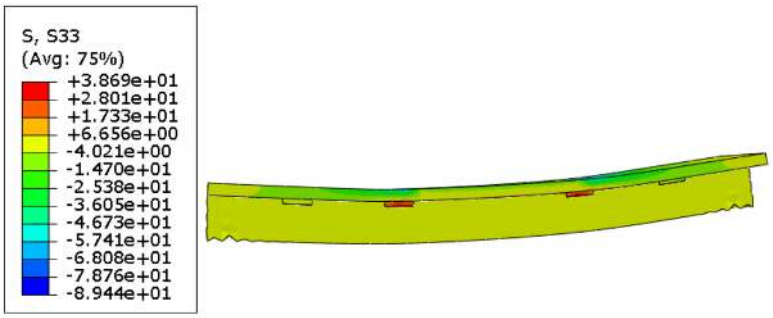
Como o deslocamento máximo permaneceu constante nas análises, o aumento de F_{max} implicou no crescimento proporcional da energia armazenada, conforme observado na Fig. 7(b), corroborando a variação global da ordem de 13,4% entre as malhas analisadas.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

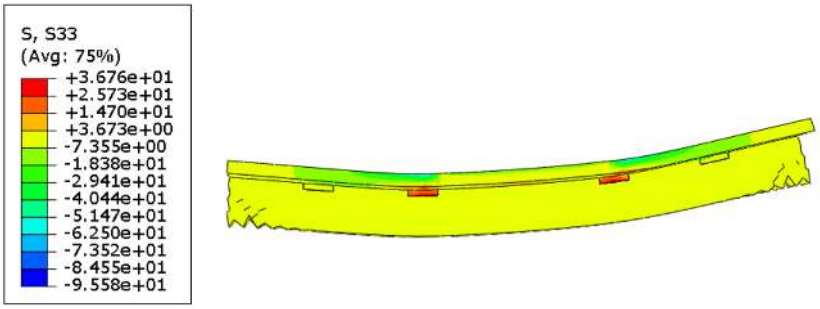
Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 13/02/2026
Vol: 02.01
DOI: 10.66104/cjp37k13
Pages: 1-23

Figura 6 – Tensões lineares nos casos (a) Larício + C37 e (b) Eucalipto + UHPC

(a) Larício + C37



(b) Eucalipto + UHPC

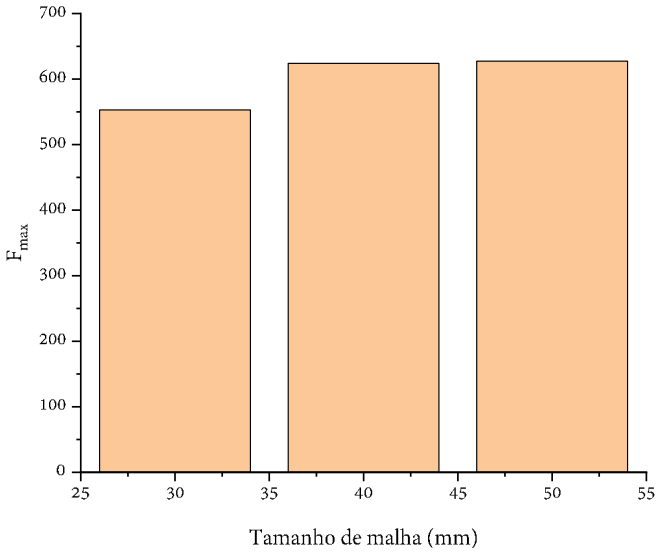


REMUNOM
ISSN 2178-6925

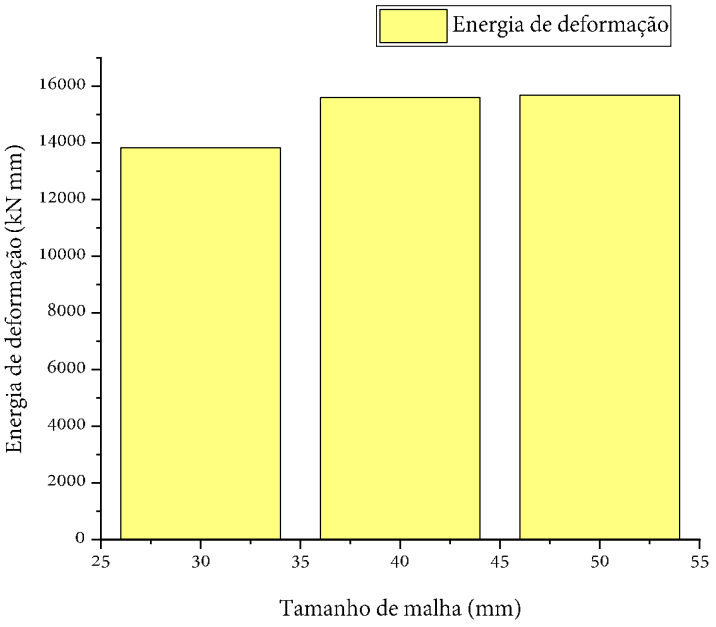
Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 13/02/2026
Vol: 02.01
DOI: 10.66104/cjp37k13
Pages: 1-23

Figura 7 – Estudo de malha em termos de (a) Força máxima (b) Energia de deformação

(a)



(b)



REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 13/02/2026
Vol: 02.01
DOI: 10.66104/cjp37k13
Pages: 1-23

4. Conclusão

O presente estudo apresentou o desenvolvimento, calibração e análise numérica tridimensional de vigas mistas madeira–concreto em regime elástico linear, considerando explicitamente a ortotropia da madeira laminada colada. Com base nos resultados obtidos, podem ser estabelecidas as seguintes conclusões:

- O modelo tridimensional implementado no Abaqus, com representação ortotrópica completa da madeira, reproduziu de forma consistente a resposta força–deslocamento experimental reportada por Du et al. (2021) no regime linear, apresentando diferença de 6% na rigidez inicial após a consideração da flexibilidade dos apoios, confirmando a adequação da formulação constitutiva e das condições de contorno adotadas.
- A correta definição e orientação dos eixos materiais da madeira (longitudinal, radial e tangencial) mostraram-se fundamentais para a coerência física da simulação tridimensional, evidenciando a relevância da modelagem ortotrópica na previsão da rigidez global e na redistribuição interna de tensões entre madeira e concreto.
- A análise paramétrica indicou que tanto o módulo de elasticidade longitudinal da madeira quanto o módulo do concreto influenciam a rigidez global no regime elástico. Entretanto, para a geometria e combinações analisadas, a substituição do Larício por *Eucalyptus grandis* (mantido o concreto C37) resultou em incremento aproximado de 13% na rigidez, enquanto a substituição do concreto C37 por UHPC (mantido o Larício) promoveu aumento da ordem de 6%. Esses resultados evidenciam que, no regime elástico linear considerado, a influência da madeira mostrou-se mais pronunciada do que a da classe do concreto.
- Observou-se que a elevação do módulo longitudinal da madeira impacta diretamente a contribuição da região tracionada da seção composta, aumentando a rigidez equivalente da estrutura. Já o aumento do módulo do concreto, embora contribua para a rigidez da mesa, altera de maneira mais moderada na rigidez global.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 13/02/2026
Vol: 02.01
DOI: 10.66104/cjp37k13
Pages: 1-23

- As tendências estruturais identificadas mantiveram-se consistentes após a análise de convergência de malha, indicando estabilidade numérica e robustez das conclusões no regime elástico linear.

Ressalta-se que as conclusões apresentadas estão restritas ao comportamento elástico pré-fissuração e à hipótese de ligação perfeita na interface. Investigações futuras devem incorporar modelagens com rigidez parcial de ligação, não linearidade geométrica e constitutiva, bem como a consideração de dano e fissuração do concreto, a fim de avaliar o comportamento do sistema em níveis de carregamento mais elevados. De modo geral, os resultados reforçam a importância da modelagem tridimensional com ortotropia completa para a previsão adequada da rigidez de vigas mistas madeira–concreto. Além disso, demonstram o potencial de espécies brasileiras, como o *Eucalyptus grandis*, para aplicação em sistemas híbridos estruturais, indicando que, sob a ótica do desempenho elástico inicial e para as configurações estudadas, a seleção da espécie de madeira constitui estratégia estruturalmente mais eficiente do que a simples elevação da classe do concreto.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao NAPI Wood Tech pelo apoio institucional e pelo incentivo ao desenvolvimento de pesquisas voltadas à inovação em sistemas estruturais em madeira.

Referências

AICHER, S.; HÖFFLIN, L.; BEHRENS, W. A study on tension strength of finger joints in beams of structural timber. Otto-Graf Journal, v. 14, p. 31–60, 2003.

BATHE, K. J. Finite element procedures. *[S.l.]*: Klaus-Jurgen Bathe, 2006.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 13/02/2026
Vol: 02.01
DOI: 10.66104/cjp37k13
Pages: 1-23

CECCOTTI, Ario. Composite concrete–timber structures. Progress in Structural Engineering and Materials, v. 4, n. 3, p. 264–275, 2002.

Chen, Z., Lu, W., Bao, Y., Zhang, J., Wang, L., Yue, K., 2021. Numerical investigation of connection performance of timber–concrete composite slabs with inclined self-tapping screws under high temperature. *Journal of Renewable Materials*, 9(8), 1329–1348. https://doi.org/10.32604/jrm.2021.015925

DACKERMANN, U. *et al.* A comparative study of using static and ultrasonic material testing methods to determine the anisotropic material properties of wood. Construction and Building Materials, v. 102, p. 963–976, 2016.

DU, H. *et al.* Experimental and finite element study on bending performance of glulam-concrete composite beam reinforced with timber board. Materials, v. 15, n. 22, p. 7998, 2022.

DU, Hao *et al.* Experimental and analytical investigation on flexural behaviour of glulam-concrete composite beams with interlayer. Journal of Building Engineering, v. 38, 1 jun. 2021.

FIGUEROA, Manuel Jesús Manriquez; MORAES, Poliana Dias de. Comportamento da madeira a temperaturas elevadas. Ambiente Construído, v. 9, n. 4, p. 157–174, dez. 2009.

FORTI, N. C. S. et. Al.. Finite element analysis of composite concrete-timber beams. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 8, n. 4, p. 507–528, 2015.

FRAGIACOMO, M.; LUKASZEWSKA, E. Influence of construction methods on the long-term behavior of timber-concrete composite structures. Materials and Structures, v. 48, n. 6, p. 1–15, 2015.

GONÇALVES, R.; TRINCA, A. J.; CERRI, D. G. P. Comparison of elastic constants of wood determined by ultrasonic wave propagation and static compression testing. Wood and Fiber Science, v. 43, n. 1, p. 64–75, 2011.

GONÇALVES, R.; TRINCA, A. J.; PELLIS, B. P. Elastic constants of wood determined by ultrasound using three geometries of specimens. Wood Science and Technology, v. 48, n. 2, p. 269–287, 2014.

HERING, S.; KEUNECKE, D.; NIEMZ, P. Moisture-dependent orthotropic elasticity of beech wood. Wood Science and Technology, v. 46, n. 5, p. 927–938, 2012.

JABBAR, Adil M.; AL-ZUHERIY, Ahmed Sh. J.; HASAN, Qais. A numerical investigation of the structural behavior of reinforced concrete beams fully or partially encased with UHPC layers in flexure. Structures, v. 70, p. 107706, 2024.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 13/02/2026
Vol: 02.01
DOI: 10.66104/cjp37k13
Pages: 1-23

KHORSANDNIA, Nima; VALIPOUR, Hamid; BRADFORD, Mark. Deconstructable timber-concrete composite beams with panelised slabs: Finite element analysis. Construction and Building Materials, v. 163, p. 798–811, 2018.

LOPES, S. M. R.; JORGE, L. F. C.; CRUZ, H. Evaluation of non-linear behavior of timber–concrete composite structures using FE model. Materials and Structures, v. 45, n. 5, p. 1–14, 2012.

MANTILLA CARRASCO, E. V *et al.* Fundamentos para fabricação de um medidor de deslocamento para determinação das constantes elásticas da madeira, considerando a sua anisotropia. Research, Society and Development, v. 11, n. 9, p. e31910931910, 2022.

Mascia, N.T., 1991. *Considerações a respeito da anisotropia na madeira*. Ph.D. Thesis, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, Brazil.

NADIR, Y. *et al.* Flexural stiffness and strength enhancement of horizontally glued laminated wood beams with GFRP and CFRP composite sheets. Construction and Building Materials, v. 112, p. 547–555, 2014.

NAUD, Nicolas *et al.* Fostering GLULAM-UHPFRC composite structures for multi-storey buildings. Engineering Structures, v. 188, p. 406–417, 1 jun. 2019.

Nogueira, R.S., 2024. Study of the behaviour of the joint beam–column of glulam with aluminum T-profile. Ph.D. Thesis, Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), University of São Paulo (USP), São Carlos, Brazil.

OUCH, V.; HENG, P.; NGUYEN, Q.-H.; SOMJA, H.; SOQUET, T. An experimental investigation on the dovetail notched connection for cross-laminated-timber-concrete composite slabs. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, v. 27, n. 15, p. 4466–4496, 2023. https://doi.org/10.1080/19648189.2023.2194351

OUDJENE, M. *et al.* Finite element modelling of the nonlinear load-slip behaviour of full-scale timber-to-concrete composite T-shaped beams. Composite Structures, v. 196, p. 117–126, 2018.

SHI, B.; LIU, W.; YANG, H. The influence of notch connection location on the short-term behaviour of timber-concrete composite beams: A comprehensive literature review. Frattura ed Integrità Strutturale, v. 18, n. 67, p. 1–25, 2024.

Silveira, G.S., 2025. Contribuição sobre o comportamento do concreto de altíssimo desempenho reforçado por fibras hibridizadas (HyUHPFRC). M.Sc. Thesis, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Pato Branco, Brazil.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 13/02/2026
Vol: 02.01
DOI: 10.66104/cjp37k13
Pages: 1-23

TAO, H. *et al.* Experimental and finite element studies of prefabricated timber-concrete composite structures with glued perforated steel plate connections. Engineering Structures, v. 268, p. 114778, 2022.

TASHAKORI, J.; SALEM, O. Finite element modelling of CLT-concrete composite sections utilizing wood screws as shear connectors. *In*: Mass Timber Construction. *[S.l.]*: Springer, 2024. p. 371–387.

TELES, R. F. *et al.* Nondestructive evaluation of a tropical hardwood: Interrelationship between methods and physical-acoustical variables. Ciência da Madeira, v. 1, n. 1, p. 1–17, 2010.

TIAN, Xin *et al.* Behavior and constitutive model of ultra-high-performance concrete under monotonic and cyclic tensile loading. Construction and Building Materials, v. 389, 31 jul. 2023.

TONG, Teng *et al.* The role of bond strength in structural behaviors of UHPC-NC composite beams: Experimental investigation and finite element modeling. Composite Structures, v. 255, n. September 2020, p. 112914, 2021.

VERMA, Praveen; BAJPAI, Ayushman. Estimation of Mechanical Behavior of Cementitious Material Using Microstructural Information. *In*: Advances in Structural Integrity. *[S.l.]*: Springer, 2022. p. 307–318.

VOROBYEV, A. *et al.* Characterisation of cubic oak specimens from the Vasa ship and recent wood by means of quasi-static loading and resonance ultrasound spectroscopy (RUS). Holzforschung, v. 70, n. 5, p. 457–465, 2016.

XU, Q. *et al.* Dynamic test study of twelve elastic constants of larch timber. Bioresources, v. 18, n. 4, p. 7805–7817, 2023.