



Reforço de Vigas de Madeira Lamelada Colada: Uma Revisão sobre Métodos, Materiais e Modelagem Numérica

Reinforcement of Glued Laminated Timber Beams: A Review on Methods, Materials and Numerical Modeling

Eduardo Steffler Werner, Eng., Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)

eduswern@gmail.com

João Pedro Corrêa P. Rodrigues, Acad., Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)

joao.rodrigues@acad.ufsm.br

Almir Barros da S. Santos Neto, Dr., Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)

almir.neto@ufsm.br

André Lübeck, Dr., Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)

andre.lubeck@ufsm.br

Eduardo Cesar Pachla, Dr., Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)

eduardo.pachla@ufsm.br

Resumo

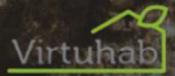
A madeira lamelada colada (MLC) tem sido amplamente utilizada na construção civil devido à sua alta resistência e versatilidade. No entanto, sua ruptura sob flexão pode ser frágil, exigindo reforços estruturais para melhorar seu desempenho. Este artigo apresenta uma revisão da literatura sobre métodos de reforço de vigas de MLC, com foco no uso de polímeros reforçados com fibra (FRP). São abordadas as características da MLC, os principais materiais de reforço, as metodologias de inserção das barras e as modelagens numéricas aplicadas, incluindo o Método dos Elementos Finitos (MEF). Os estudos mostram que o reforço com FRP melhora a resistência e a rigidez das vigas, embora desafios como aderência e comportamento em situação de incêndio ainda exijam investigações futuras. A revisão destaca lacunas na literatura e sugere direções para otimização dos reforços, combinando abordagens experimentais e numéricas.

Palavras-chave: Madeira Lamelada Colada (MLC); Reforço com FRP; Método dos Elementos Finitos (MEF)

Abstract

Glue Laminated Timber (GLULAM) has been widely used in construction due to its high strength and versatility. However, its failure under bending can be brittle, requiring structural reinforcements to improve its performance. This paper presents a literature review on reinforcement methods for GLULAM beams, focusing on the use of fiber-reinforced polymers (FRP). It discusses the characteristics of GLULAM, the main reinforcement materials, the methodologies for inserting the bars, and the numerical modeling applied, including the Finite Element Method (FEM). The studies show that FRP reinforcement improves the strength and stiffness of beams, although challenges such as adhesion and behavior under fire still require further investigation. The review highlights gaps in the literature and suggests directions for optimizing reinforcements by combining experimental and numerical approaches.

Keywords: *Glue Laminated Timber (GLULAM); FRP Reinforcement; Finite Element Method (FEM)*



1. Introdução

A madeira é um composto natural formado por lignina, celulose e hemiceluloses, sendo um material renovável amplamente empregado na construção civil (MLOTE e BUDIG, 2022; WALKER, 2006). Sua resistência e abundante disponibilidade justificam seu uso histórico em edificações, tintas e recipientes (SHMULSKY e JONES, 2011). Estruturalmente, apresenta resistência à compressão paralela às fibras comparável à do concreto, com a vantagem de menor densidade, o que facilita o transporte e reduz o peso estrutural (RAMAGE et al., 2017). No entanto, sua anisotropia e a presença de imperfeições naturais, como nós e fissuras, podem comprometer seu desempenho mecânico (NBR 7190-2, ABNT, 2022; WDOWIAK-POSTULAK et al., 2023).

Para mitigar essas limitações, surgiram as madeiras engenheiradas, como a madeira lamelada colada (MLC), que resulta da colagem de lamelas em camadas, permitindo um controle mais rigoroso das propriedades mecânicas. Esse processo possibilita a seleção das lamelas de maior qualidade para as regiões mais solicitadas estruturalmente, reduzindo variações e aprimorando a homogeneidade do material (MIRSKI et al., 2021). Dessa forma, vigas de MLC podem apresentar resistência igual ou superior à da madeira maciça (SHMULSKY e JONES, 2011). No entanto, sua ruptura sob flexão pode ser frágil, exigindo soluções para aumentar a ductilidade e a capacidade estrutural (LACROIX e DOUDAK, 2018; TOMASI, PARISI e PIAZZA, 2009).

O reforço estrutural é uma estratégia amplamente adotada para aprimorar o desempenho das vigas de MLC, sendo o aço um dos materiais mais utilizados (ALKHUDERY, AL-TAMEEMI e AL-KATIB, 2023; BULLEIT, SANDBERG e WOODS, 1989; GHARAIBEH e DOUDAK, 2023). A introdução de barras, placas ou cordoalhas metálicas melhora a rigidez e a resistência das vigas, mas o aço apresenta desvantagens, como peso elevado e vulnerabilidade à corrosão (WDOWIAK-POSTULAK et al., 2023; MCCONNELL, MCPOLIN e TAYLOR, 2014). Como alternativa, polímeros reforçados com fibra (fiber-reinforced polymers – FRPs) vêm sendo cada vez mais utilizados devido à sua elevada resistência, leveza e durabilidade em ambientes agressivos (HOLLAWAY e TENG, 2008; MICELLI, SCIALPI e LA TEGOLA, 2005; YANG et al., 2016b).

Os FRPs podem ser aplicados em vigas de MLC na forma de barras, mantas, placas ou cordas (RAFTERY e HARTE, 2009a; RAFTERY e KELLY, 2015; Yang et al., 2016a). Diferentes tipos de fibra são empregados, como vidro (GFRP), carbono (CFRP), basalto (BFRP) e aramida (AFRP), cada um com características específicas. Embora CFRP ofereça ganhos estruturais superiores, seu custo elevado torna o GFRP uma opção economicamente mais viável, especialmente devido à sua ampla disponibilidade no mercado nacional (NADIR et al., 2016; WDOWIAK-POSTULAK e ŚWIT, 2021).

Além do desempenho estrutural, o posicionamento dos reforços influencia diretamente a segurança contra incêndios. As fibras dos FRPs são resistentes ao calor, mas a matriz polimérica pode perder suas propriedades mecânicas em altas temperaturas (HOLLAWAY e TENG, 2008). Por esse motivo, reforços internos, inseridos entre as lamelas no processo produtivo, conferem maior proteção passiva contra incêndios, reduzindo a exposição ao calor e preservando a integridade estrutural por mais tempo (WDOWIAK-POSTULAK, ŚWIT e DZIEDZIC-JAGOCKA, 2024). Esse fator, somado às vantagens mecânicas e de durabilidade, reforça o interesse crescente no uso de FRPs para reforço de vigas de MLC.

Diante da crescente aplicação dos FRPs no reforço estrutural de vigas de MLC, este artigo tem como objetivo revisar criticamente os principais estudos da literatura sobre o tema, analisando as metodologias empregadas, os materiais utilizados e seus impactos na rigidez,

resistência e ductilidade dessas vigas. Trata-se de um artigo de revisão sistemática, que organiza e sintetiza as abordagens mais relevantes discutidas até o momento. O problema de pesquisa abordado refere-se à viabilidade do uso de FRPs como alternativa ao aço, considerando não apenas os ganhos mecânicos, mas também os desafios de aderência, posicionamento e desempenho em longo prazo. Além disso, são discutidas as contribuições das modelagens numéricas na simulação do comportamento dessas vigas. A partir dessa revisão, busca-se identificar lacunas na literatura e propor direcionamentos para estudos futuros sobre reforço de MLC com FRPs.

2. Metodologia da Revisão

A revisão bibliográfica realizada neste trabalho teve por objetivo encontrar estudos que tenham realizado reforço, à flexão, em elementos de madeira lamelada colada, utilizando barras. Para isso, foram consultadas as plataformas Scopus, Web of Science e Periódicos Capes, todas no dia 16 de abril de 2024.

Buscou-se montar uma chave de pesquisa completa, abrangendo o tema em questão. Para isso, a pesquisa foi dividida em três núcleos: madeira lamelada colada, reforço e barras. Para cada núcleo, foram verificados sinônimos e palavras semelhantes que rotineiramente apareciam em artigos do tema, significando a mesma coisa, em português e em inglês. O resultado está exposto na Tabela 1.

Tabela 1: Núcleos de pesquisa utilizados na revisão sistemática. Fonte: autoria própria.

Núcleo 1	Núcleo 2	Núcleo 3
MLC	reforço	barras
madeira lamelada colada	reinforced	barra
madeira laminada colada	reinforcement	bar
glulam	reforçada	bars
glue-laminated timber		rebar
glue laminated timer		rebars
glued laminated timer		vergalhão
glued-laminated timer		vergalhões
laminated timber beam		rod
timber laminated beam		rods

Dispondo das ferramentas de pesquisa agrupada disponíveis nas três bases de pesquisa citadas, as palavras dos três núcleos foram agrupadas e os documentos foram exportados. O número total de artigos exportados foi de 314, sendo eles 112, 110 e 92, das bases Scopus, Web of Science e Periódicos Capes, respectivamente. Dos 314 artigos, verificou-se que 143 eram duplicados, pois estavam em mais de uma base de pesquisa, restando 171 documentos para serem avaliados. Finalmente, foram adotados critérios de exclusão, para manter na base apenas os documentos diretamente relacionados com o tema. Os principais critérios elencados foram: o estudo deve relatar reforço à flexão de viga de MLC utilizando barra; as vigas de MLC devem ter as lamelas sobrepostas em sentido convencional (maiores faces das lamelas paralelas ao solo); o documento deve ser um artigo de revista, congresso ou revisão; o reforço realizado deve ser com elementos íntegros (excluindo-se estudos sobre reparos estruturais); o documento deve estar em português ou inglês.

Por fim, 32 artigos satisfizeram todos os critérios, e foram lidos na íntegra. Desses, 24 descreviam estudos experimentais, 5 estudos numéricos e 3 estudos conjuntos das duas metodologias. O material de reforço mais utilizado foi o aço, apresentado em 16 estudos,

seguido pela BFRP, CFRP e GFRP, com 9, 6 e 5 estudos, respectivamente. A fibra de aramida, AFRP, também foi utilizada em um dos estudos. A principal variável avaliada foi a taxa de armadura, em 20 estudos, seguido pela posição do reforço e material da barra, em 10 e 4 estudos, respectivamente.

3. Fundamentos e Conceitos

3.1 Ductilidade de modos de ruptura da madeira lamelada colada

A ductilidade de uma estrutura está relacionada à sua capacidade de sofrer deformações sem apresentar ruptura frágil (TOMASI, PARISI e PIAZZA, 2009). No caso da madeira, esse comportamento varia conforme o tipo de carregamento. Quando submetida à tração, a madeira apresenta resposta linear até a ruptura, com pouca deformação plástica. No entanto, sob compressão paralela às fibras, ocorre um processo progressivo de flambagem local das fibras, que gera uma região plástica mais representativa (TOMASI, PARISI e PIAZZA, 2009). Essa diferença de comportamento influencia diretamente o desempenho de vigas de madeira lamelada colada (MLC) sob flexão.

A anisotropia da madeira e a presença de defeitos naturais, como nós e trincas, podem levar a rupturas frágeis na região tracionada, enquanto a região comprimida tende a apresentar ruptura mais gradual (MLOTE e BUDIG, 2022; WADOWIAK-POSTULAK et al., 2023). Estudos mostram que vigas de MLC não reforçadas frequentemente rompem de maneira frágil na região de tração (ALKHUDERY, AL-TAMEEMI e AL-KATIB, 2023; DE LUCA e MARANO, 2012; MCCONNELL, MCPOLIN e TAYLOR, 2014). Para mitigar esse comportamento, é possível utilizar lamelas de maior qualidade na região mais solicitada ou inserir reforços estruturais (RAFTERY e WHELAN, 2014).

A introdução de reforços pode alterar o modo de ruptura das vigas de MLC. Em estudos experimentais, reforços posicionados na região tracionada induzem um comportamento mais dúctil e transferem a ruptura para a região comprimida, onde ocorre a flambagem das fibras (RAFTERY e WHELAN, 2014). No entanto, quando a viga recebe reforço tanto na tração quanto na compressão, o comportamento volta a ser frágil, com ruptura na região tracionada (YANG et al., 2016b). Essas observações reforçam a importância da correta distribuição dos reforços para otimizar a segurança estrutural. A Figura 1 apresenta o comportamento à flexão de vigas de MLC reforçadas com diferentes FRPs.

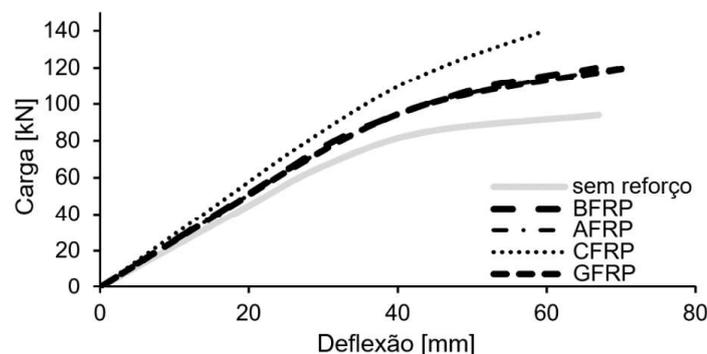


Figura 1: Comportamento à flexão de vigas de MLC reforçadas com diferentes FRPs. Fonte: adaptado de Jończyk (2021).

Os modos de ruptura das vigas de MLC podem ser categorizados conforme o tipo e posicionamento do reforço. Estudos destacam que reforços com barras podem evitar rupturas frágeis ao restringirem a abertura de fissuras na madeira (WADOWIAK-POSTULAK et al., 2023). Como ilustrado na Figura 2, a mudança da forma de ruptura é um efeito comum

observado em vigas reforçadas, destacando a relevância do estudo da ductilidade e dos mecanismos de ruptura para otimizar o desempenho de elementos estruturais de madeira.



a) Viga sem reforço

b) Viga reforçada à tração

c) Viga reforçada nas duas regiões

Figura 2: Modos de ruptura usuais em ensaios de flexão de vigas de MLC. Fonte: adaptado de Raftery e Whelan (2014).

3.2 Materiais de Reforço Estrutural: Aço e Polímeros Reforçados com Fibra (FRP)

O uso de reforços estruturais tem sido amplamente estudado para melhorar a resistência e a rigidez de vigas de MLC. O aço é um dos materiais mais tradicionais para esse fim, sendo utilizado na forma de barras, placas ou cordoalhas (ALKHUDERY, AL-TAMEEMI e AL-KATIB, 2023; BULLEIT, SANDBERG e WOODS, 1989; MIRSKI et al., 2021). Reforços metálicos proporcionam ganhos significativos de capacidade portante, porém seu peso elevado e suscetibilidade à corrosão podem comprometer a durabilidade da estrutura (WDOWIAK-POSTULAK et al., 2023; MCCONNELL, MCPOLIN e TAYLOR, 2014).

Como alternativa ao aço, os polímeros reforçados com fibra (FRPs) vêm sendo cada vez mais utilizados em vigas de MLC, devido à sua alta resistência específica, baixa densidade e resistência à corrosão (HOLLAWAY e TENG, 2008; MICELLI, SCIALPI e LA TEGOLA, 2005). Esses materiais podem ser aplicados em diferentes formas, como barras (RAFTERY e HARTE, 2009a; RAFTERY e KELLY, 2015), mantas (NADIR et al., 2016) e placas (GLIŠOVIĆ et al., 2017), permitindo flexibilidade na escolha da metodologia de reforço.

A escolha do tipo de FRP influencia diretamente no desempenho da viga. Estudos mostram que CFRP oferece maior rigidez e resistência, mas seu alto custo pode ser um fator limitante (NADIR et al., 2016). Por outro lado, GFRP apresenta uma relação custo-benefício mais favorável e ampla disponibilidade no mercado nacional, tornando-se uma alternativa viável para reforço de MLC (WDOWIAK-POSTULAK e ŚWIT, 2021).

O posicionamento e a taxa de armadura dos reforços são fatores determinantes para a eficiência da técnica. Ensaios experimentais indicam que reforços localizados na região tracionada podem aumentar significativamente a resistência última das vigas, enquanto reforços simultâneos nas regiões tracionada e comprimida modificam o modo de ruptura (YANG et al., 2016b). Além disso, a aderência entre o FRP e a madeira é um fator crítico, influenciado pelo adesivo utilizado e pelo método de aplicação do reforço (WDOWIAK-POSTULAK, ŚWIT e DZIEDZIC-JAGOCKA, 2024).

4. Metodologias de Reforço de Vigas de MLC

O reforço de vigas de madeira lamelada colada (MLC) pode ser realizado por diferentes métodos, sendo a inserção de barras um dos mais estudados na literatura. Essa técnica pode ser aplicada de duas maneiras: após a produção das vigas, por meio da abertura de sulcos para

inserção das barras, ou durante o processo de fabricação, posicionando os reforços entre as lamelas antes da colagem (ALKHUDERY, AL-TAMEEMI e AL-KATIB, 2023). O primeiro método é amplamente utilizado para reforço de estruturas já em serviço, permitindo a recuperação de elementos existentes. No entanto, a inserção de reforços durante a fabricação das vigas apresenta vantagens significativas, como a eliminação da necessidade de adesivos epóxi específicos para a fixação das barras, reduzindo custos e otimizando o processo produtivo (SARDIKO et al., 2017).

A principal vantagem da inserção de barras em sulcos após a fabricação da viga é a possibilidade de adaptar elementos já instalados, sem interferir no processo produtivo convencional das indústrias de MLC. Essa abordagem permite o uso de reforços metálicos ou de polímeros reforçados com fibra (FRP) em diferentes configurações geométricas, conforme ilustrado na Figura 3 (ALKHUDERY, AL-TAMEEMI e AL-KATIB, 2023). Entretanto, a eficiência desse método depende diretamente da qualidade da interface entre a barra e a madeira, sendo fundamental a correta aplicação do adesivo epóxi para garantir uma boa aderência (WDOWIAK-POSTULAK et al., 2023). Além disso, a necessidade de remoção de parte da seção transversal da viga para abertura dos sulcos pode reduzir sua capacidade resistente inicial (RAFLERTY e WHELAN, 2014).

Já a inserção de barras durante o processo de fabricação das vigas de MLC elimina a necessidade de adesivos adicionais, pois o próprio adesivo estrutural utilizado na colagem das lamelas é responsável por solidarizar os reforços (SARDIKO et al., 2017). Essa metodologia também permite uma melhor distribuição dos esforços internos, reduzindo a probabilidade de delaminação e garantindo maior proteção ao reforço contra ações externas, como umidade ou fogo (WDOWIAK-POSTULAK, ŚWIT e DZIEDZIC-JAGOCKA, 2024). Estudos indicam que a inclusão de barras de aço ou FRP entre as lamelas pode melhorar significativamente a rigidez e a capacidade de carga das vigas sem comprometer sua estética ou alterar sua geometria externa (MIRSKI et al., 2021). A Figura 3 ilustra diferentes metodologias de reforço de vigas de MLC com barras.

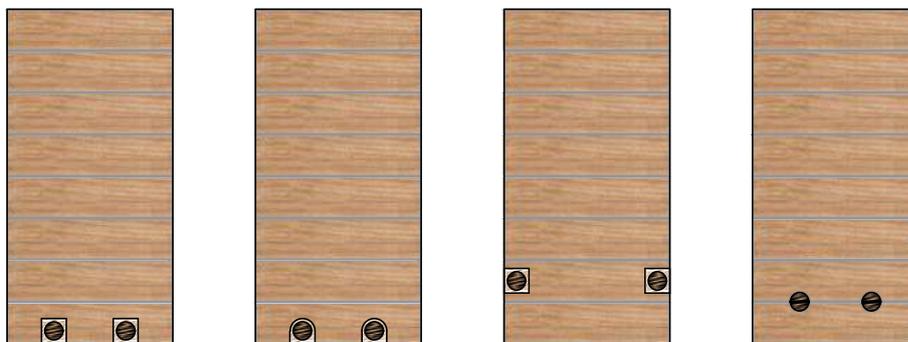


Figura 3: Configurações geométricas para inserção de barras em vigas de MLC. Fonte: autoria própria.

A eficiência dos reforços depende não apenas do método de inserção, mas também da taxa de armadura e da posição das barras (reforços) dentro da seção transversal. Ensaios experimentais demonstram que reforços localizados na região tracionada aumentam a resistência última das vigas e transferem a ruptura para a região comprimida, tornando o comportamento estrutural mais previsível (YANG et al., 2016b). Já a inserção de reforços simultaneamente nas regiões de tração e compressão pode gerar uma maior rigidez na viga, mas com modo de ruptura frágil, exigindo um dimensionamento adequado da taxa de armadura (RAFTERY e HARTE, 2009a). Além disso, a geometria do sulco e a forma de solidarização do reforço também influenciam a eficiência da técnica, sendo recomendado que os sulcos sigam o formato das barras para reduzir a quantidade de adesivo e melhorar a aderência (RAFTERY e WHELAN, 2014).

A escolha do método de reforço ideal deve considerar não apenas a melhoria do desempenho mecânico das vigas, mas também a viabilidade econômica e a facilidade de execução. Enquanto o reforço pós-produção apresenta maior flexibilidade para recuperação de estruturas existentes, a inserção de reforços durante a fabricação das vigas permite otimizações no processo produtivo e maior proteção dos materiais de reforço. Estudos recentes indicam que o desenvolvimento de metodologias híbridas, combinando diferentes técnicas de reforço, pode ser uma alternativa promissora para maximizar a eficiência estrutural das vigas de MLC (WDOWIAK-POSTULAK et al., 2023).

5. Modelagens Numéricas e Simulações Computacionais

5.1 Principais abordagens numéricas na literatura

A evolução dos métodos numéricos tem permitido a modelagem avançada de vigas de madeira lamelada colada (MLC) reforçadas, possibilitando a simulação de seu comportamento estrutural sob diferentes condições de carregamento. Estudos mostram que modelos computacionais podem prever tensões, deformações e modos de ruptura, reduzindo a necessidade de ensaios laboratoriais extensivos (CRESPO et al., 2020). No entanto, para que as análises numéricas sejam representativas, é fundamental que os materiais sejam caracterizados com precisão, garantindo que suas propriedades mecânicas sejam corretamente inseridas no modelo (RAFTERY e HARTE, 2009a). A Figura 4 ilustra as 3 direções principais que produzem variações nas propriedades mecânicas da madeira.

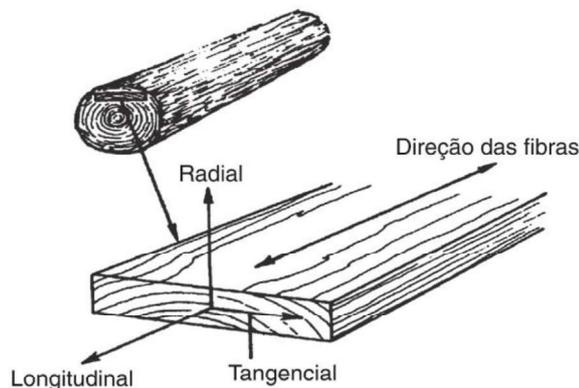
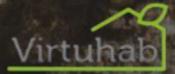


Figura 4: Principais direções consideradas em elementos de madeira. Fonte: Ritter (1990) apud Dias et al. (2019).

Dentre os principais desafios da modelagem numérica de MLC, destaca-se a necessidade de considerar sua anisotropia e heterogeneidade, uma vez que a madeira apresenta variações significativas de resistência conforme a direção das fibras (Figura 4) (TOMASI, PARISI e PIAZZA, 2009). Modelos simplificados frequentemente assumem comportamento homogêneo, o que pode levar a discrepâncias entre os resultados teóricos e experimentais (WDOWIAK-POSTULAK, ŚWIT e DZIEDZIC-JAGOCKA, 2024). Dessa forma, abordagens mais refinadas incluem modelos ortotrópicos, que representam melhor as propriedades do material (JOŃCZYK, 2021).

A influência dos reforços também tem sido amplamente estudada nas simulações numéricas. Alguns pesquisadores avaliam a interação entre madeira e reforços por meio de modelos discretizados, nos quais a rigidez do reforço é considerada separadamente da madeira (PEIXOTO et al., 2022). Já outras abordagens utilizam a homogeneização da seção transversal, na qual as propriedades do reforço e da madeira são combinadas em um único domínio de



material equivalente (CHRISTOFORO et al., 2022). Ambos os métodos apresentam vantagens e limitações, sendo escolhidos conforme o nível de precisão desejado.

Outra questão relevante na modelagem de vigas reforçadas é a consideração dos efeitos de aderência entre os reforços e a madeira. Estudos indicam que rupturas na interface do adesivo podem comprometer a eficiência do reforço, exigindo que modelos numéricos incluam critérios de delaminação ou elementos de contato não linear (WDOWIAK-POSTULAK, ŚWIT e DZIEDZIC-JAGOCKA, 2024). A aderência é particularmente crítica em reforços pós-produção, onde o preenchimento dos sulcos com adesivo epóxi pode influenciar diretamente a capacidade resistente da viga (SARDIKO et al., 2017).

Além dos aspectos estruturais, a modelagem numérica também tem sido utilizada para prever o comportamento das vigas de MLC reforçadas sob condições extremas, como incêndios ou exposição prolongada à umidade. Simulações computacionais mostram que reforços posicionados no interior da seção transversal podem oferecer maior proteção contra degradação térmica (WDOWIAK-POSTULAK e ŚWIT, 2021). Essa abordagem reforça a importância do uso de simulações para avaliar a durabilidade e a segurança das vigas de MLC reforçadas em longo prazo.

5.2 Aplicação do Método dos Elementos Finitos (MEF) para prever comportamento estrutural

O Método dos Elementos Finitos (MEF) tem sido amplamente empregado na análise de vigas de MLC, permitindo simulações detalhadas de seu comportamento mecânico. Essa técnica possibilita a avaliação de tensões, deformações e modos de ruptura a partir da discretização da viga em pequenos elementos, nos quais as equações de equilíbrio são resolvidas numericamente (CRESPO et al., 2020). A confiabilidade dos modelos de MEF depende da calibração adequada dos parâmetros de entrada, que incluem propriedades mecânicas dos materiais e condições de contorno realistas (JONCZYK, 2020).

Na modelagem de vigas de MLC reforçadas, diferentes estratégias de discretização são adotadas. Alguns estudos utilizam elementos sólidos tridimensionais para representar detalhadamente cada componente da viga, incluindo a madeira, o adesivo e o reforço (JONCZYK, 2021). Outros trabalhos optam por modelagens mais simplificadas, com elementos de casca ou viga, permitindo análises mais rápidas e com menor custo computacional (CHRISTOFORO et al., 2022). A escolha do tipo de elemento influencia a precisão da simulação e deve ser feita considerando o objetivo da análise.

A consideração da interação entre madeira e reforços é um fator determinante na modelagem via MEF. Modelos avançados incluem interfaces de contato entre os materiais, permitindo simular fenômenos como a dessolidarização entre reforço e viga (WDOWIAK-POSTULAK, ŚWIT e DZIEDZIC-JAGOCKA, 2024). Além disso, a utilização de elementos de ligação coesivos tem se mostrado eficiente para prever rupturas na interface adesiva, contribuindo para uma melhor correlação com resultados experimentais (RAFTERY e WHELAN, 2014). A Figura 5 ilustra um exemplo de malha de elementos finitos, os reforços e o sistema de apoio utilizados para uma simulação.

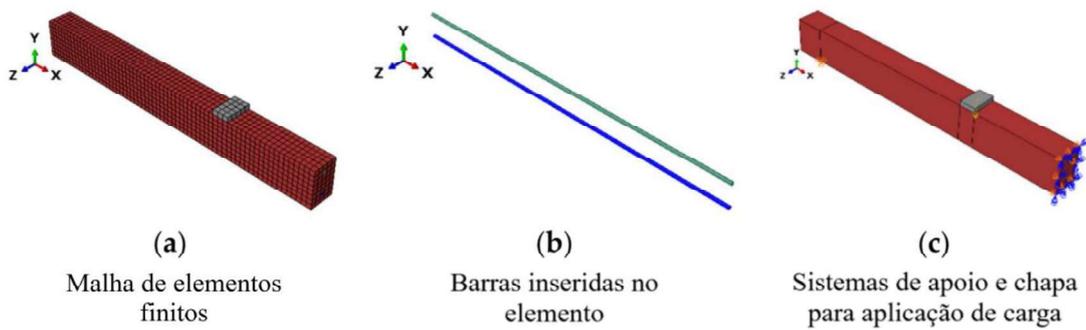


Figura 5: Malha de elementos finitos, reforços e sistemas de apoio. Fonte: Christoforo et al. (2022).

Outro aspecto fundamental do MEF na análise de MLC reforçada é a calibração do modelo com base em ensaios experimentais. Ensaios físicos são utilizados para validar os resultados numéricos, ajustando os parâmetros do modelo para que as respostas simuladas sejam compatíveis com as medições de laboratório (PEIXOTO et al., 2022). Essa etapa é essencial para garantir que a simulação represente com fidelidade o comportamento real das vigas sob carregamento.

O uso do MEF também tem sido explorado na otimização de projetos estruturais. Modelos numéricos permitem a avaliação de diferentes configurações de reforço, auxiliando na escolha da melhor taxa de armadura e posicionamento dos materiais de reforço para maximizar a eficiência estrutural (WDOWIAK-POSTULAK e ŚWIT, 2021). Essa abordagem destaca o potencial das simulações computacionais não apenas para prever o comportamento estrutural, mas também para aprimorar o dimensionamento e a durabilidade das vigas de MLC reforçadas.

6. Pesquisas em Andamento na UFSM

Atualmente, na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), está sendo desenvolvido um estudo para avaliar a eficácia do reforço à tração de vigas de MLC, utilizando vergalhões de PRFV. O reforço foi inserido entre as lamelas no processo de fabricação das vigas. As lamelas são de madeira *Pinus ellioti*. Foi utilizado adesivo estrutural à base de poliuretano, JowaPUR 686.60.

Foram produzidas 12 vigas, com dimensões 100 mm x 200 mm x 2700 mm, em três configurações de reforço distintas: 4 vigas sem reforço (referência), 4 vigas com 2 barras entre as duas últimas lamelas (0,50% de reforço, em área), e 4 vigas com 5 barras (1,25% de reforço, em área). As lamelas possuem espessura de 20 mm, sendo as vigas compostas por 10 camadas. Os vergalhões possuem diâmetro nominal de 8 mm, posicionados conforme a Figura 6.

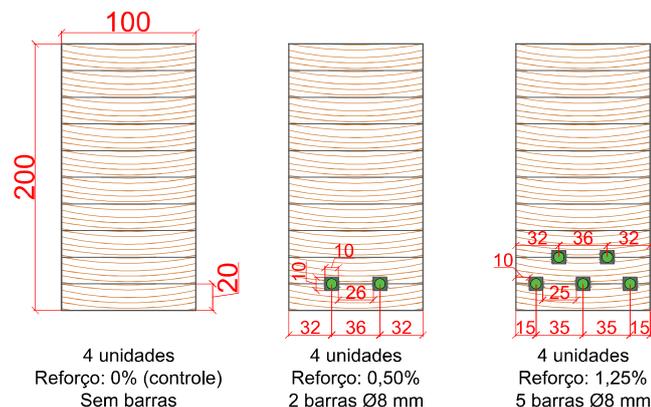


Figura 6: Representação das vigas em MLC em estudo. Fonte: autoria própria.

A Figura 7 apresenta a preparação das vigas, com o reforço posicionado, antes da colagem e também a viga no processo de colagem e prensagem. Os ensaios de flexão à 4 pontos serão realizados no LMCC (Laboratório de Materiais de Construção Civil) da UFSM no primeiro semestre de 2025.



Figura 7: Preparação e colagem/prensagem das vigas de MLC. Fonte: autoria própria.

7. Considerações Finais

O reforço de vigas de madeira lamelada colada (MLC) com polímeros reforçados com fibra (FRP) tem demonstrado vantagens significativas em relação à resistência, rigidez e durabilidade das estruturas. Ensaio experimentais indicam que o uso de FRPs pode aumentar a capacidade portante das vigas e reduzir a deformação sob carregamento (YANG et al., 2016b; WADOWIAK-POSTULAK, ŚWIT e DZIEDZIC-JAGOCKA, 2024). Além disso, os FRPs possuem alta resistência à corrosão e baixo peso, o que favorece sua aplicação em ambientes agressivos, onde o aço poderia sofrer degradação ao longo do tempo (HOLLAWAY e TENG, 2008; MICELLI, SCIALPI e LA TEGOLA, 2005).

Apesar das vantagens, alguns desafios ainda limitam a utilização ampla dessa tecnologia. A aderência entre o reforço e a madeira é um dos principais fatores críticos, pois pode influenciar diretamente a eficiência do reforço estrutural (WADOWIAK-POSTULAK et al., 2023). Métodos de inserção dos reforços, como a aplicação em sulcos pós-produção ou a inclusão durante a fabricação da viga, apresentam diferentes níveis de desempenho, sendo necessário um controle preciso da interface adesiva para evitar rupturas prematuras (RAFTERY e HARTE, 2009a).

Outro aspecto relevante está relacionado ao comportamento das vigas reforçadas em condições extremas. A exposição ao fogo pode comprometer a matriz polimérica dos FRPs, reduzindo sua capacidade mecânica antes da total evacuação da edificação (HOLLAWAY e TENG, 2008). Para mitigar esse risco, estudos recomendam a inserção dos reforços entre as lamelas durante a fabricação da viga, garantindo maior proteção passiva ao material e melhorando a segurança estrutural (WADOWIAK-POSTULAK e ŚWIT, 2021).

Ainda existem lacunas na literatura que precisam ser exploradas para aprimorar a aplicação dos FRPs em vigas de MLC. A interação entre madeira e reforço exige modelos numéricos mais avançados que considerem o efeito da interface adesiva e a progressão da delaminação (WADOWIAK-POSTULAK, ŚWIT e DZIEDZIC-JAGOCKA, 2024). Além disso, há necessidade de mais estudos sobre o comportamento de longo prazo desses reforços, incluindo



efeitos de fluência, fadiga e degradação em diferentes condições ambientais (UCHIMURA, SHIOYA e HIRA, 2016).

Pesquisas futuras podem buscar otimizar o uso dos FRPs, avaliando configurações de reforço que maximizem ganhos estruturais com menor custo. O desenvolvimento de técnicas aprimoradas de inserção dos reforços e o estudo de novas combinações de materiais podem ampliar a viabilidade dessa solução para aplicação em larga escala (SARDIKO et al., 2017). A integração de ensaios experimentais e modelagem computacional continuará sendo essencial para a evolução do conhecimento e para a melhoria do desempenho de vigas de MLC reforçadas.

Referências

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7190-2. Projeto de estruturas de madeira Parte 2: Métodos de ensaio para classificação visual e mecânica de peças estruturais de madeira. [S. l.: s. n.], 2022a.

ALKHUDERY, Hayder H.; AL-TAMEEMI, Haider Ali; AL-KATIB, Haider A.A. A. **Experimental and theoretical investigation of the structural behavior of reinforced glulam wooden members by NSM steel bars and shear reinforcement CFRP sheet**. Open Engineering, [s. l.], v. 13, n. 1, 2023. Disponível em: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/eng-2022-0481/html>. Acesso em: 21 abr. 2024.

BULLEIT, William M.; SANDBERG, L. Bogue; WOODS, Greg J. **Steel-Reinforced Glued Laminated Timber**. Journal of Structural Engineering, [s. l.], v. 115, n. 2, p. 433–444, 1989. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%290733-9445%281989%29115%3A2%28433%29>. Acesso em: 21 abr. 2024.

CHRISTOFORO, André Luis *et al.* **Reinforcement of Timber Beams with Steel Bars: Parametric Analysis Using the Finite Element Method**. Buildings, [s. l.], v. 12, n. 7, p. 1036, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-5309/12/7/1036/htm>. Acesso em: 21 abr. 2024.

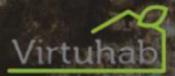
CRESPO, Jorge; MAJANO-MAJANO, Almudena; LARA-BOCANEGRA, Antonio José; GUAITA, Manuel. **Mechanical Properties of Small Clear Specimens of Eucalyptus globulus Labill**. Materials 2020, Vol. 13, Page 906, [s. l.], v. 13, n. 4, p. 906, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/13/4/906/htm>. Acesso em: 7 set. 2024.

DE LUCA, Vincenzo; MARANO, Cosimo. **Prestressed glulam timbers reinforced with steel bars**. Construction and Building Materials, [s. l.], v. 30, p. 206–217, 2012. Disponível em: Acesso em: 14 nov. 2023.

DIAS, Antonio Alves; JUNIOR, Carlito Calil; LAHR, Francisco Antonio Rocco; MARTINS, Gisele Cristina Antunes. **Estruturas de Madeira - Projetos, Dimensionamento e Exemplos de Cálculo**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2019. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595150430/>.

GHARAIBEH, Laith I.; DOUDAK, Ghasan. **Structural Performance of Reinforced Glulam Beams**. World Conference on Timber Engineering (WCTE 2023), [s. l.], p. 3141–3147, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.52202/069179-0409>. Acesso em: 18 abr. 2024.

GLIŠOVIĆ, Ivan; PAVLOVIĆ, Marko; STEVANOVIĆ, Boško; TODOROVIĆ, Marija. **Numerical analysis of glulam beams reinforced with CFRP plates**. Journal of Civil



Engineering and Management, [s. l.], v. 23, n. 7, p. 868–879, 2017. Disponível em: <https://journals.vilniustech.lt/index.php/JCEM/article/view/1195>. Acesso em: 21 abr. 2024.

HOLLAWAY, L. C.; TENG, J. G. **Strengthening and rehabilitation of civil infrastructures using fibre-reinforced polymer (FRP) composites**. [S. l.]: Elsevier Ltd., 2008. v. 1 Disponível em: <http://www.sciencedirect.com:5070/book/9781845694487/strengthening-and-rehabilitation-of-civil-infrastructures-using-fibre-reinforced-polymer-frp-composites>. Acesso em: 20 nov. 2023.

JONCZYK, Damian. **A comparative numerical analysis of glued laminated timber beams reinforced with bars made of various materials**. Construction of optimized energy potential, [s. l.], v. 10, n. 1, p. 151–159, 2021. Disponível em: Acesso em: 21 abr. 2024.

JONCZYK, Damian. **Deflection estimation of glued laminated timber beams reinforced with CFRP fibre composites**. Budownictwo o Zoptymalizowanym Potencjale Energetycznym, [s. l.], v. 10, n. 2/2020, p. 119–126, 2020. Disponível em: Acesso em: 21 abr. 2024.

LACROIX, D. N.; DOUDAK, G. **Effects of High Strain Rates on the Response of Glulam Beams and Columns**. Journal of Structural Engineering, [s. l.], v. 144, n. 5, 2018. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29ST.1943-541X.0002020>. Acesso em: 20 maio 2024.

MCCONNELL, E.; MCPOLIN, D.; TAYLOR, S. **Post-tensioning of glulam timber with steel tendons**. Construction and Building Materials, [s. l.], v. 73, p. 426–433, 2014. Disponível em: Acesso em: 21 abr. 2024.

MICELLI, Francesco; SCIALPI, Vincenza; LA TEGOLA, Antonio. **Flexural Reinforcement of Glulam Timber Beams and Joints with Carbon Fiber-Reinforced Polymer Rods**. Journal of composites for construction, RESTON, v. 9, n. 4, p. 337–347, 2005. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%291090-0268%282005%299%3A4%28337%29>. Acesso em: 21 abr. 2024.

MIRSKI, Radosław; KULIŃSKI, Marcin; DZIURKA, Dorota; THOMAS, Marta; ANTONOWICZ, Ryszard. **Strength Properties of Structural Glulam Elements from Pine (Pinus sylvestris L.) Timber Reinforced in the Tensile Zone with Steel and Basalt Rods**. Materials, [s. l.], v. 14, n. 10, p. 2574, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/10/2574/htm>. Acesso em: 14 nov. 2023.

MLOTE, Doreen Steven; BUDIG, Michael. **Load-Bearing Capacities and Pseudo-Ductility of Carbon Fiber-Reinforced New Zealand Pine Timber Beams**. Journal of Composites Science, [s. l.], v. 6, n. 8, p. 239, 2022. Disponível em: Acesso em: 20 nov. 2023.

NADIR, Yashida; NAGARAJAN, Praveen; AMEEN, Mohammed; ARIF M, Muhammed. **Flexural stiffness and strength enhancement of horizontally glued laminated wood beams with GFRP and CFRP composite sheets**. Construction and Building Materials, [s. l.], v. 112, p. 547–555, 2016. Disponível em: Acesso em: 21 abr. 2024.

PEIXOTO, Lucas Sacramoni; SORIANO, Julio; MASCIA, Nilson Tadeu; PELLIS, Bruno Piva. **Bending behavior of steel bars reinforced Glulam beams considering the homogenized cross section**. Wood Material Science & Engineering, [s. l.], v. 17, n. 6, p. 533–539, 2022. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17480272.2021.1900392>. Acesso em: 21 abr. 2024.

RAFTERY, G. M.; HARTE, A. M. **Repair Of Glulam Beams Using GFRP Rods**. WIT Transactions on The Built Environment, [s. l.], v. 109, p. 417–427, 2009a. Disponível em:



<http://www.witpress.com/elibrary/wit-transactions-on-the-built-environment/109/20486>. Acesso em: 14 nov. 2023.

RAFTERY, Gary M.; KELLY, Fiona. **Basalt FRP rods for reinforcement and repair of timber**. *Composites Part B: Engineering*, [s. l.], v. 70, p. 9–19, 2015. Disponível em: Acesso em: 14 nov. 2023.

RAFTERY, Gary M.; WHELAN, Conor. **Low-grade glued laminated timber beams reinforced using improved arrangements of bonded-in GFRP rods**. *Construction and Building Materials*, [s. l.], v. 52, p. 209–220, 2014. Disponível em: Acesso em: 1 out. 2023.

RAMAGE, Michael 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: Acesso em: 20 fev. 2024.

SARDIKO, R.; ROCENS, K.; IEJAVS, J.; JAKOVLEVS, V.; ZIVERTS, K. **Analysis of the stiffness and load-bearing capacity of glued laminated timber beams reinforced with strands**. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, [s. l.], v. 251, n. 1, p. 012104, 2017. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/251/1/012104>. Acesso em: 21 abr. 2024.

SHMULSKY, Rubin; JONES, P. David. **Forest Products and Wood Science An Introduction: Sixth Edition**. 6th. ed. [S. l.]: Wiley-Blackwell, 2011. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470960035>. Acesso em: 18 nov. 2023.

TOMASI, Roberto; PARISI, Maria Adelaide; PIAZZA, Maurizio. **Ductile Design of Glued-Laminated Timber Beams**. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, [s. l.], v. 14, n. 3, p. 113–122, 2009. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%291084-0680%282009%2914%3A3%28113%29>. Acesso em: 21 abr. 2024.

UCHIMURA, Kohei; SHIOYA, Shinichi; HIRA, Tomoka. **An innovative hybrid timber structure in Japan: Experiments on the long term behavior in beam**. *WCTE 2016 - World Conference on Timber Engineering*, [s. l.], 2016. Disponível em: https://researchmap.jp/80170851/published_papers/33872785.

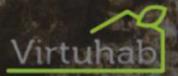
WALKER, John C.F. **Primary wood processing: Principles and practice**. 2nd. ed. Dordrecht: Springer, 2006. Disponível em: Acesso em: 18 nov. 2023.

WDOWIAK-POSTULAK, Agnieszka; BAHLEDA, František; PROKOP, Jozef. **An Experimental and Numerical Analysis of Glued Laminated Beams Strengthened by Pre-Stressed Basalt Fibre-Reinforced Polymer Bars**. *Materials*, [s. l.], v. 16, n. 7, p. 2776, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/16/7/2776>. Acesso em: 16 maio 2024.

WDOWIAK-POSTULAK, Agnieszka; ŚWIT, Grzegorz. **Behavior of Glulam Beams Strengthened in bending with BFRP Fabrics**. *Civil and Environmental Engineering Reports*, [s. l.], v. 31, n. 2, p. 1–14, 2021. Disponível em: <https://www.ceer.com.pl/Behavior-of-Glulam-Beams-Strengthened-in-bending-with-BFRP-Fabrics,167626,0,2.html>. Acesso em: 21 abr. 2024.

WDOWIAK-POSTULAK, Agnieszka; ŚWIT, Grzegorz; DZIEDZIC-JAGOCKA, Ilona. **Application of Composite Bars in Wooden, Full-Scale, Innovative Engineering Products—Experimental and Numerical Study**. *Materials*, [s. l.], v. 17, n. 3, p. 730, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/17/3/730/htm>. Acesso em: 21 abr. 2024.

WDOWIAK-POSTULAK, Agnieszka; WIERUSZEWSKI, Marek; BAHLEDA, František; PROKOP, Jozef; BROL, Janusz. **Fibre-Reinforced Polymers and Steel for the**



Reinforcement of Wooden Elements—Experimental and Numerical Analysis. *Polymers*, [s. l.], v. 15, n. 9, p. 2062, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4360/15/9/2062/htm>. Acesso em: 21 abr. 2024.

YANG, Huifeng; JU, Dongdong; LIU, Weiqing; LU, Weidong. **Prestressed glulam beams reinforced with CFRP bars.** *Construction & building materials*, [s. l.], v. 109, p. 73–83, 2016a. Disponível em: Acesso em: 21 abr. 2024.

YANG, Huifeng; LIU, Weiqing; LU, Weidong; ZHU, Shijun; GENG, Qifan. **Flexural behavior of FRP and steel reinforced glulam beams: Experimental and theoretical evaluation.** *Construction & building materials*, [s. l.], v. 106, p. 550–563, 2016b. Disponível em: Acesso em: 21 abr. 2024.