

MÉTODOS E TÉCNICAS DE RECUPERAÇÃO ESTRUTURAL DE PILARES DE MADEIRA: REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Juliana Lopes Soares Ferreira (Universidade Federal de São Carlos). E-mail: julianasoares@estudante.ufscar.br

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

Tarniê Vilela Nunes Narques (Universidade Federal do Sul da Bahia). E-mail: tarnie.narques@ufsb.edu.br

Wanderlei Malaquias Pereira Junior (Universidade Federal de Catalão). E-mail: wanderlei_junior@ufcat.edu.br

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

Resumo: Este estudo apresenta uma revisão sistemática sobre técnicas de recuperação estrutural aplicadas a pilares de madeira, considerando diferentes espécies, materiais de reforço, arranjos construtivos e metodologias de avaliação. O levantamento foi conduzido por meio de protocolo estruturado, com aplicação de string específica em bases de dados reconhecidas na engenharia, seleção gradual de estudos em múltiplos filtros, análise de qualidade e extração de informações técnicas relevantes. Inicialmente foram identificados 332 registros, dos quais apenas 19 atenderam plenamente aos critérios estabelecidos, evidenciando o caráter restritivo e direcionado da revisão. Observou-se que polímeros reforçados com fibras de carbono apresentam ganhos expressivos em resistência à compressão e comportamento flexional, enquanto fibras de vidro demonstram maior contribuição para ductilidade e comportamento pós-pico. Elementos metálicos, sobretudo parafusos, destacaram-se como alternativa economicamente viável e pouco intrusiva, tomando-se adequados para *retrofit*. Apesar dos avanços identificados, verificou-se limitada abordagem sobre durabilidade, desempenho em longo prazo e influência de agentes ambientais, indicando a necessidade de estudos voltados à vida útil e comportamento em serviço.

Palavras-chave: Reforço estrutural, materiais compósitos, desempenho mecânico, revisão bibliográfica sistemática.

METHODS AND TECHNIQUES FOR STRUCTURAL RESTORATION OF WOODEN PILLARS: SYSTEMATIC REVIEW OF LITERATURE

Abstract: This study presents a systematic review of structural rehabilitation techniques applied to timber columns, considering different wood species, reinforcement materials, construction arrangements, and assessment methodologies. The survey was conducted using a structured protocol, involving the application of a specific search string in databases recognized in engineering, gradual selection of studies through multiple screening stages, quality assessment, and extraction of relevant technical information. Initially, 332 records were identified, of which only 19 fully met the established criteria, evidencing the restrictive and focused nature of the review. It was observed that fiber-reinforced polymer with carbon fibers provides significant gains in compressive strength and flexural behavior, while glass fibers demonstrate greater contribution to ductility and post-peak performance. Metallic elements, especially screws, stood out as an economically viable and minimally intrusive alternative, proving suitable for retrofit applications. Despite the identified advances, there was limited discussion regarding durability, long-term performance, and the influence of environmental agents, indicating the need for studies focused on service life and in-service behavior.

Keywords: Structural reinforcement, composite materials, mechanical performance, systematic literature review.

1. Introdução

A utilização da madeira na construção civil possui um histórico consolidado, fundamentado em sua disponibilidade, versatilidade e na favorável relação resistência-

peso, sendo empregada desde estruturas vernaculares até sistemas contemporâneos de alto desempenho (De Araujo, 2023; Jardim; Monteiro; *et al.*, 2025; Paiva Filho *et al.*, 2018). Contudo, por ser um material de origem biológica, a madeira é inerentemente suscetível a processos de biodeterioração causados por agentes xilófagos, intemperismo e solicitações mecânicas severas, fatores que podem comprometer severamente a integridade do sistema estrutural (Goodell; Nielsen, 2023).

A degradação do material resulta em manifestações patológicas críticas, como o surgimento de fendas, perda de seção transversal e deformações excessivas, frequentemente agravadas por falhas de execução ou ausência de programas de manutenção adequados (Jardim; Monteiro; *et al.*, 2025; Jardim; Santos; *et al.*, 2025; Parisi; Piazza, 2007; Qiao; Li; Chen, 2016; Ruggieri, 2022). Nesse cenário, a recuperação desses elementos torna-se imprescindível, exigindo intervenções que, além de restabelecer a segurança, respeitem a compatibilidade técnica e, no caso de edifícios históricos, a preservação dos aspectos estéticos originais (Jardim; Monteiro; *et al.*, 2025; Parisi; Piazza, 2007; Torero, 2019).

Dentre os componentes de uma estrutura, os pilares desempenham um papel vital na estabilidade global e na transmissão de cargas, de modo que sua vulnerabilidade eleva substancialmente o risco de colapso. Diversos métodos de reforço têm sido propostos na literatura, abrangendo variadas geometrias e materiais, entretanto, a ampla dispersão de parâmetros e resultados dificulta a comparação direta entre as eficácias das técnicas e a definição de diretrizes de projeto otimizadas (Jardim; Monteiro; *et al.*, 2025; Jardim; Araujo; *et al.*, 2025; Qiao; Li; Chen, 2016).

A produção científica recente tem se mostrado segmentada, dividindo-se entre métodos tradicionais, que utilizam elementos de aço ou madeira (Parisi; Piazza, 2007; Qiao; Li; Chen, 2016; Valle; Pereira; Nappi, 2013), e soluções modernas baseadas em polímeros reforçados com fibras (PRF), que demonstram ganhos significativos em rigidez e capacidade resistente (Jardim; Araujo; *et al.*, 2025; Jardim; Santos; *et al.*, 2025). Observa-se ainda um esforço voltado especificamente para a manutenção do patrimônio edificado, focando em diagnósticos e estratégias de intervenção conservadoras (Jardim; Monteiro; *et al.*, 2025).

Apesar desses avanços, persiste uma lacuna quanto à análise integrada e comparativa de tais soluções, uma vez que as revisões existentes tendem a focar em materiais ou tipologias isoladas. Diante disso, o presente estudo contribui ao consolidar o estado da arte por meio de uma revisão sistemática, organizando os dados disponíveis sobre pilares de madeira sob diversas perspectivas. Essa síntese crítica permite identificar tendências, lacunas e fornecer subsídios técnicos para futuras investigações e aplicações práticas no campo da engenharia de estruturas.

2. Materiais e métodos

A metodologia deste estudo fundamenta-se no protocolo PRISMA 2020 (*Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses*), garantindo o rigor e a transparência necessários à Revisão Sistemática da Literatura (Page *et al.*, 2021). Para a gestão e suporte técnico das etapas de filtragem e extração de dados, utilizou-se o *software* StArt (*State of the Art through Systematic Review*), ferramenta que permite a mitigação de vieses na seleção dos artigos através de um fluxo estruturado de avaliação. A prospeção bibliográfica foi realizada nas bases de dados *Web of Science* e *Engineering Village*, reconhecidas pela elevada indexação de periódicos de alto impacto na área da engenharia estrutural (Mongeon; Paul-Hus, 2016). A estratégia de busca foi consolidada através de uma *string* lógica de termos booleanos, definida como:

- (timber OR wood) AND (recovery OR reinforcement OR repair) AND (column OR pillar)

O processo de seleção dos estudos foi executado em três níveis de filtragem sucessivos. No primeiro estágio, realizou-se o rastreio de títulos e resumos para exclusão de trabalhos fora do escopo. No segundo, procedeu-se à leitura das secções de introdução e conclusão para verificar a aderência aos objetivos técnicos da pesquisa. O terceiro estágio compreendeu a leitura integral dos manuscritos aprovados, consolidando a amostra final de 19 artigos.

A avaliação da qualidade dos estudos selecionados baseou-se em seis critérios técnicos (Q1 a Q6), que analisaram desde o detalhamento do projeto estrutural e diagnóstico das patologias até o rigor nos critérios de dimensionamento do reforço (Tabela 1). Esta etapa foi crucial para identificar se os estudos apresentavam as variáveis fundamentais, como o módulo de elasticidade e a resistência à compressão paralela, além de validar a robustez das abordagens experimentais ou numéricas utilizadas.

Tabela 1. Critérios de qualidade

Cód.	Descrição
Q1	Existem informações sobre o projeto estrutural do elemento?
Q2	São apresentadas as manifestações patológicas?
Q3	O artigo apresenta informações sobre as manutenções do pilar?
Q4	O artigo apresenta detalhes sobre a investigação diagnóstica?
Q5	O artigo apresenta o critério de dimensionamento do reforço adotado?
Q6	O artigo propõe novo método de recuperação ou ajustar um método existente?

Por fim, a extração de dados focou na correlação entre a geometria do elemento, a espécie de madeira e a eficiência dos materiais de reforço, com ênfase nos polímeros reforçados com fibras (PRF). Foram inventariadas propriedades físicas e mecânicas, as configurações dos reforços (orientação das fibras e número de camadas) e os respectivos ganhos de capacidade de carga e rigidez, permitindo a síntese crítica e a identificação de lacunas sobre o desempenho a longo prazo e a resistência à tração perpendicular.

3. Resultados e discussões

3.1 Análise bibliométrica e qualitativa da amostra

A aplicação da *string* nas bases de dados resultou em um total de 332 registros. Após a remoção de duplicidades e a aplicação dos filtros definidos no protocolo da revisão sistemática, apenas 19 artigos atenderam plenamente aos critérios estabelecidos, correspondendo a aproximadamente 6% do total inicialmente identificado. Esse resultado evidencia o caráter restritivo da revisão, direcionada exclusivamente a estudos que abordassem, de forma objetiva, a recuperação estrutural de pilares de madeira. A Figura 1 apresenta o Fluxograma PRISMA.

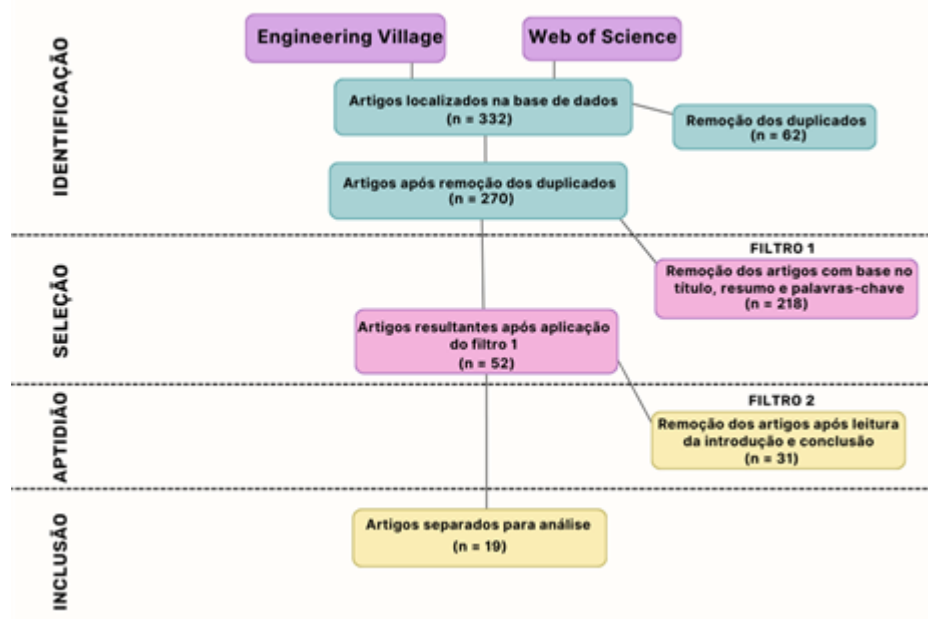


Figura 1. Fluxograma PRISMA

A distribuição temporal das publicações incluídas na amostra é apresentada na Figura 2. Observa-se um aumento no número de artigos publicados nos anos de 2021 e 2022, seguido por uma leve redução nos anos subsequentes. Ainda assim, mesmo no período de maior produção, o número máximo de publicações identificadas foi limitado, com apenas seis artigos publicados em 2022. Esse comportamento indica que, embora o interesse pelo tema tenha se intensificado recentemente, a produção científica especificamente voltada à recuperação estrutural de pilares de madeira permanece reduzida.

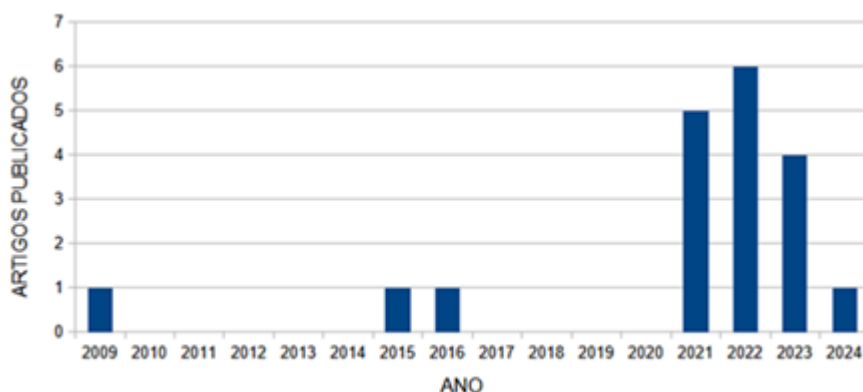


Figura 2. Artigos publicados anualmente

A análise qualitativa dos estudos foi conduzida com base nos critérios de qualidade apresentados na Tabela 1, cujos resultados são sintetizados na Figura 3. De modo geral, observou-se uma boa aderência dos artigos aos critérios estabelecidos, especialmente no que se refere à apresentação de informações sobre manutenções prévias dos pilares e aos procedimentos de dimensionamento dos reforços adotados, ambos atendidos por 100% dos estudos analisados. Esse resultado permitiu uma avaliação mais consistente desses aspectos ao longo da revisão.

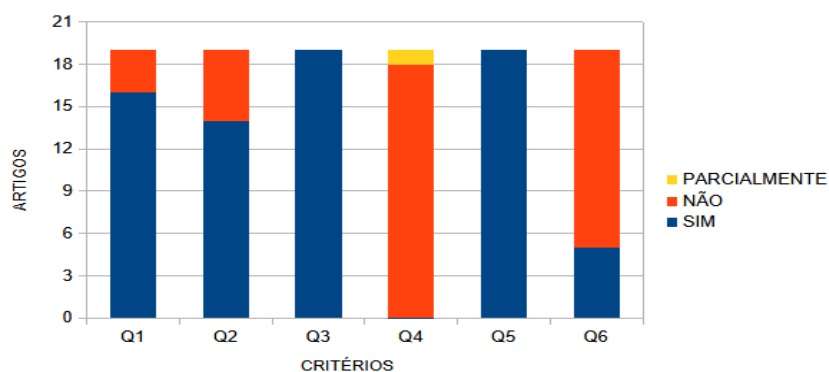


Figura 3. Atendimento aos critérios de qualidade dos artigos

Por outro lado, o critério relacionado à descrição detalhada da investigação diagnóstica apresentou o menor índice de atendimento. Apenas um artigo descreveu de forma completa o procedimento diagnóstico, enquanto outro o fez de maneira parcial, limitando-se à indicação do tipo de método empregado. A ausência de detalhamento nos demais estudos restringe a possibilidade de comparação entre abordagens diagnósticas e evidencia uma lacuna relevante na literatura, indicando a necessidade de maior rigor na documentação desses procedimentos em pesquisas futuras.

Outro critério com baixa frequência de atendimento refere-se à proposição de novos métodos de recuperação ou ao aprimoramento de técnicas existentes. Dos 19 artigos analisados, apenas cinco apresentaram propostas dessa natureza, o que, apesar de representar uma parcela minoritária da amostra, destaca iniciativas relevantes voltadas à inovação no campo da recuperação estrutural de pilares de madeira

3.2 Contexto dos estudos da amostra

A análise dos 19 artigos selecionados revelou uma predominância de abordagens experimentais e experimentais-numéricas nos estudos sobre recuperação estrutural de pilares de madeira. Apenas um trabalho adotou exclusivamente análise numérica, enquanto cinco estudos se basearam unicamente em ensaios experimentais. A maioria das publicações combinou investigações experimentais e numéricas, conforme ilustrado na Figura 4. Esse panorama indica uma tendência da literatura em validar modelos analíticos e numéricos a partir de dados experimentais, refletindo a complexidade associada à representação adequada do comportamento estrutural da madeira e de seus sistemas de reforço.



Figura 4. Abordagem metodológica da amostra

Quanto às espécies de madeira empregadas, observou-se uma distribuição relativamente equilibrada entre gimnospermas e angiospermas. Do total de estudos analisados, 11 (57,9%) utilizaram madeiras de gimnospermas, enquanto 8 (42,1%) investigaram espécies de angiospermas. A Tabela 2 apresenta as propriedades físicas e mecânicas das

madeiras reportadas nos estudos, incluindo densidade, módulo de elasticidade e resistências associadas aos esforços de tração e compressão paralela e perpendicular às fibras.

Tabela 2. Propriedades das madeiras presentes na amostra

ESPÉCIE	ρ (kg/m ³)	E_0 (MPa)	f_{t0} (MPa)	f_{t90} (MPa)	f_{c0} (MPa)	f_{c90} (MPa)	REF.
<i>Populus bolleana</i>	4725	-	114,4	-	36,5	-	(Han <i>et al.</i> , 2022)
<i>Spruce-pine-fir</i>	-	8470	-	-	-	-	(O'Callaghan; Lacroix; Kim, 2022; Taheri; Nagaraj; Khosravi, 2009)
<i>Larch</i>	-	13500	-	-	-	-	(Lee; Song; Hong, 2020; Li <i>et al.</i> , 2023)
<i>Paulownia</i>	281,5	4420	-	-	22,6	6,38	(Yang <i>et al.</i> , 2021)
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	-	17025	-	-	30,85	-	(Kia; Valipour; Ghanbari-Ghazijahani, 2024; Song; Wu; Jiang, 2015)
<i>Toona Sinensis</i>	-	-	-	-	-	-	(Zhang <i>et al.</i> , 2021)
<i>Populus tomentosa</i>	-	8431	-	-	-	-	(Zhou <i>et al.</i> , 2021)
<i>Pinus radiata</i>	-	5400	-	-	-	-	(Kia; Valipour; Ghanbari-Ghazijahani, 2024)
<i>Pinus koraiensis</i>	400	12142	73,2	-	35	-	(Siha; Zhou, 2023, 2022)
<i>Cunninghamia lanceolata</i>	-	9167	27	3,2	-	-	(Wang, Haoyu <i>et al.</i> , 2023)
<i>Pinus massoniana</i>	542	19411	120,9	-	31,08	-	(Chu; Shi; Gong, 2022)
<i>Hingan larch-sawn</i>	660	10300	128,68	-	46,04	-	(Liu <i>et al.</i> , 2022)
<i>Bridelia exaltata</i>	800	10700	45	-	55	-	(Otoom <i>et al.</i> , 2022)
<i>Poplar</i>	325	8750	-	-	27	-	(Bhat, 2021; Wang, Yuzhuo <i>et al.</i> , 2023)
<i>Eucalyptus grandis</i>	-	33980	-	-	98,8	-	(Carvalho <i>et al.</i> , 2016)

Nota: ρ = densidade; E_0 = módulo de elasticidade longitudinal, f_{t0} e f_{t90} = resistência à tração paralela e perpendicular às fibras, respectivamente; f_{c0} e f_{c90} = resistência à compressão paralela e perpendicular às fibras, respectivamente.

A caracterização mecânica dos elementos na literatura revisada concentra-se majoritariamente na determinação da densidade, do módulo de elasticidade (E_0) e da resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}). Em contrapartida, parâmetros críticos como a resistência à tração perpendicular às fibras (f_{t90}) são raramente reportados devido à elevada complexidade experimental na obtenção de modos de ruptura não convencionais. Essa carência de dados experimentais impulsiona a utilização de métodos analíticos e equações de correlação para a estimativa de propriedades fundamentais ao dimensionamento (Almeida *et al.*, 2020; Alves *et al.*, 2024; Assis *et al.*, 2024).

Quanto à morfologia dos pilares investigados, observa-se uma hegemonia de seções transversais retangulares e circulares, com escassa exploração de geometrias complexas ou seções variáveis. Essa tendência reflete uma preferência deliberada por seções prismáticas simplificadas, o que otimiza os processos de instrumentação em ensaios de laboratório e reduz a incerteza na calibração de modelos numéricos.

As estratégias de recuperação estrutural são dominadas pelo uso de polímeros reforçados com fibras (PRF), com ênfase no carbono (PRFC) e aplicações complementares de fibras de vidro (PRFV) e basalto (PRFB) (Wang, Haoyu *et al.*,

2023). O emprego de soluções híbridas, que associam compósitos a elementos metálicos, blocos de madeira e até compósitos particulados inovadores (Carvalho *et al.*, 2016), evidencia que a reabilitação não admite uma solução universal. A escolha da técnica é intrinsecamente dependente da geometria do elemento, do estado de degradação e dos requisitos específicos de rigidez e ductilidade de cada intervenção.

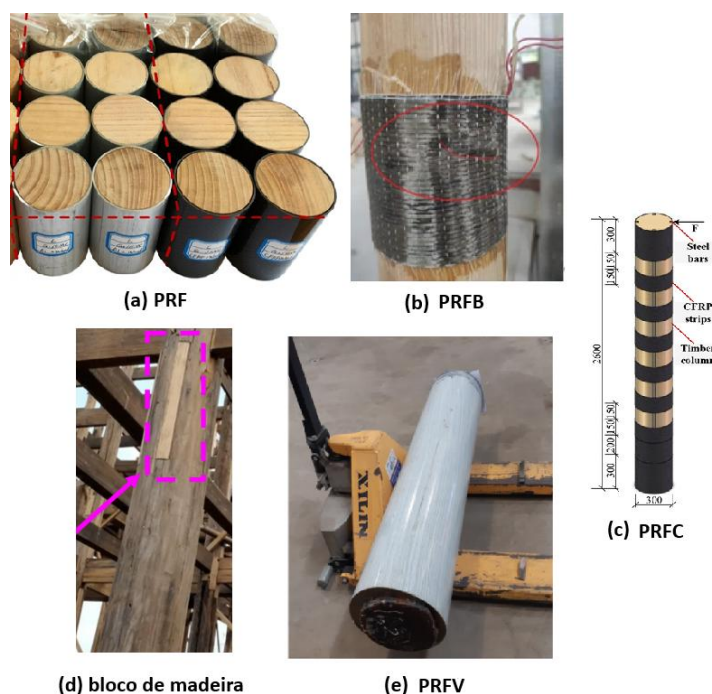


Figura 5. Materiais e técnicas de recuperação estrutural identificados nos estudos. Adaptado de Lee, Song e Hong (2020), Li *et al.* (2023), Ootom *et al.* (2022), Siha e Zhou (2023) e Zhang *et al.* (2021).

3.3 ANÁLISE DAS TÉCNICAS DE REFORÇO EMPREGADAS

De modo geral, os resultados corroboram a eficiência do uso de PRF como solução para a recuperação estrutural de pilares de madeira, em consonância com tendências observadas em outras revisões sistemáticas (Chang, 2015; Jardim; Monteiro; *et al.*, 2025; Jardim; Araujo; *et al.*, 2025; Jardim; Santos; *et al.*, 2025; Saad; Lengyel, 2022). Entretanto, diferenças relevantes são observadas em função do tipo de fibra, da geometria do reforço, do arranjo das camadas e da associação com outros materiais.

3.3.1 Técnicas de reforço com PRFC

A literatura revisada demonstra que a caracterização mecânica da madeira se concentra na densidade, no módulo de elasticidade e na resistência à compressão paralela, enquanto parâmetros como a tração perpendicular são negligenciados devido à complexidade experimental. No âmbito morfológico, prevalecem seções retangulares e circulares devido à facilidade de instrumentação e modelagem numérica via MEF. Nesse cenário, o PRFC consolida-se como a solução mais eficiente e recorrente, sendo aplicado em diversas configurações (tiras, barras, tubos e mantas) para elevar a capacidade de carga última, a resistência à flexão e postergar mecanismos de instabilidade lateral.

Estudos experimentais indicam que o confinamento com tubos de PRFC proporciona uma absorção de energia superior a sistemas metálicos, embora evidencie uma dicotomia crítica: o significativo ganho resistente é frequentemente acompanhado pela redução da ductilidade global (Zhang *et al.*, 2021). Esse comportamento é característico de reforços que atuam como confinamento rígido, onde a redistribuição de tensões é

determinante para o desempenho estrutural, mas o modo de falha tende a ser governado pela ruptura frágil das fibras de carbono, exigindo um detalhamento rigoroso da interface madeira-compósito (Dong *et al.*, 2015; Najm; Secaras; Balaguru, 2007).

A eficiência do reforço com PRFC é altamente sensível ao arranjo das fibras, ao número de camadas e à orientação do material, sendo que revestimentos contínuos e aplicações helicoidais em colunas de madeira lamelada colada (MLC) promovem falhas mais estáveis (Wang *et al.*, 2023). Além disso, a associação sinérgica entre PRFC e barras de aço potencializa o desempenho à flexocompressão, demonstrando que a reabilitação não admite soluções universais. A escolha da técnica permanece intrinsecamente dependente da geometria original, do estado de degradação e da compatibilidade entre os módulos de elasticidade dos materiais envolvidos (Siha; Zhou, 2023; Carvalho *et al.*, 2016).

3.3.2 Técnicas de reforço com PRFV

Em geral, os estudos sobre PRFV reportaram desempenhos estruturais inferiores ao obtido com PRFC em termos de ganho de resistência, mas com vantagens relacionadas ao custo, à ductilidade e ao comportamento pós-pico. Resultados como os obtidos por Taheri, Nagaraj e Khosravi (2009) indicam que estratégias parciais de reforço podem ser economicamente viáveis, atingindo parcela significativa do ganho resistente obtido com envoltórios completos.

Os estudos presentes na amostra indicam que o PRFV atua de forma mais eficiente como elemento de amarração e confinamento, reduzindo a propagação de fissuras e mitigando falhas por separação das fibras da madeira. O'Callaghan, Lacroix e Kim (2022) demonstraram que o desempenho do PRFV está fortemente relacionado à orientação das fibras e ao número de camadas, sendo configurações bidirecionais e multicamadas mais eficazes na melhoria da ductilidade e da capacidade resistente.

Comparativamente, resultados experimentais mostraram que pilares reforçados com PRFC podem atingir resistências significativamente superior àqueles reforçados com PRFV, como observado por Lee, Song e Hong (2020). Ainda assim, a literatura sugere que o PRFV pode ser uma alternativa adequada em intervenções onde o objetivo principal não seja o aumento máximo de resistência, mas sim o controle de danos locais e a melhoria do comportamento global do elemento, associado a um custo inferior ao que se observa com o uso do PRFC (Motlagh; Gholipour; Ebrahimi, 2012; Saad; Lengyel, 2022).

3.3.3 Técnicas de reforço com PRFB

O PRFB, embora menos explorado, apresentou resultados relevantes na recuperação estrutural de pilares de madeira. Os estudos analisados indicam que o PRFB possui boa capacidade de confinamento lateral, contribuindo para a redução do deslocamento transversal e o atraso da falha por flambagem.

Han *et al.* (2022) e Liu *et al.* (2022) demonstraram que o desempenho do PRFB depende fortemente da taxa e da distribuição do reforço. Envoltórios contínuos proporcionaram maiores ganhos de resistência, enquanto reforços parciais mostraram-se mais suscetíveis à concentração de danos nos trechos não reforçados. Ainda assim, soluções intermediárias, com percentuais reduzidos de revestimento, apresentaram desempenho estrutural satisfatório sob o ponto de vista técnico-econômico.

Em consonância com outros estudos (Jardim; Araujo; *et al.*, 2025; Jardim; Monteiro; *et al.*, 2025; Jardim; Santos; *et al.*, 2025), observa-se que o PRFB ocupa uma posição intermediária entre o PRFC e o PRFV, combinando ganhos moderados de resistência com melhor comportamento deformacional, o que pode torná-lo atrativo em determinadas aplicações específicas

3.3.4 Técnicas de reforço com elementos de aço

As técnicas de recuperação estrutural utilizando aço mostraram-se eficazes, sobretudo

quando aplicadas sob a forma de parafusos, barras ou chapas, apresentando vantagens relacionadas à disponibilidade do material e à facilidade de execução (González-Bravo *et al.*, 2010). Em contextos de *retrofit*, soluções com parafusos destacam-se por sua menor interferência visual, aspecto relevante em edificações existentes (Jardim; Monteiro; *et al.*, 2025; Parisi; Piazza, 2007).

Estudos indicam que o uso isolado de elementos metálicos pode proporcionar ganhos modestos de resistência, sendo mais eficiente quando associado a outros materiais, como resinas epóxi ou PRF (Jasieńko; Nowak, 2014). Resultados como os de Siha e Zhou (2023) evidenciam que a posição e a quantidade de barras de aço influenciam diretamente o desempenho estrutural, sendo mais eficazes quando posicionadas afastadas da linha neutra.

O uso de chapas de aço apresentou ganhos expressivos de rigidez e resistência, porém frequentemente associado a modos de falha por descolamento e flambagem local, o que reforça a necessidade de cuidados no detalhamento da ligação entre o reforço e a madeira (Jardim; Araujo; *et al.*, 2025; Siha; Zhou; Yang, 2021; Xiong; Lu; Xue, 2016).

3.3.5 Técnicas de reforço com elementos de madeira

A recuperação estrutural por meio da adição de elementos de madeira mostrou-se particularmente adequada para intervenções de caráter compatível e reversível. Os estudos indicam que o desempenho desse método depende fortemente da compatibilidade mecânica entre o bloco e o elemento original, sendo preferível o uso de madeira com módulo de elasticidade igual ou superior ao do pilar.

Resultados como os de Li *et al.* (2023) demonstram que, embora o modo de falha permaneça governado pela região reparada, há ganhos significativos de rigidez e capacidade resistente quando o encaixe é corretamente dimensionado. A combinação dessa técnica com outros métodos, como envoltórios de PRF ou perfis metálicos, mostrou-se eficiente para atender simultaneamente aos requisitos de confinamento, rigidez e resistência.

Por outro lado, Carvalho *et al.* (2016) alertam que a presença de defeitos geométricos severos pode limitar a eficácia dos métodos de recuperação, uma vez que concentrações de tensão tendem a dominar o comportamento estrutural, mesmo após a intervenção.

Tabela 3. Síntese comparativa de técnicas de recuperação de pilares

Técnica	Material de Reforço	Principal Ganho Estrutural	Observação Técnica
Confinamento	PRFC	Elevado incremento na resistência axial	Comportamento frágil pós-pico
Ductilidade	PRFV	Deformação e dissipação de energia	Alternativa de baixo custo
Híbrida	Aço + PRF	Resistência à flexocompressão	Efeito sinérgico entre materiais
<i>Retrofit</i>	Parafusos/chapas	Rigidez e facilidade executiva	Baixa intrusão estética
Compatível	Blocos de madeira	Reversibilidade e rigidez	Depende da compatibilidade de E_0

5. Conclusões

A presente revisão sistemática permitiu identificar tendências consistentes no desempenho de pilares de madeira reforçados, superando a heterogeneidade das variáveis experimentais analisadas. Verificou-se que, para o incremento da resistência à compressão paralela às fibras, os resultados mais expressivos decorrem do uso de tiras de PRFC e da instalação de barras de aço internas posicionadas distantes do eixo neutro. Dentre estes, o PRFC destaca-se pela elevada aplicabilidade em estruturas existentes, oferecendo uma solução de alta performance com caráter minimamente intrusivo.

No âmbito da flexocompressão, a associação de fibras de carbono a matrizes epóxi possibilita ganhos simultâneos de rigidez e capacidade resistente última. Paralelamente, o emprego de PRFB em arranjos anelares demonstrou eficácia superior na contenção e redistribuição de tensões transversais. Tais configurações são determinantes para mitigar mecanismos de instabilidade e otimizar o confinamento lateral, fator essencial para a integridade do pilar sob solicitações combinadas.

Sob a ótica da ductilidade e do custo-benefício, o uso de PRFV desempenha um papel fundamental ao elevar a capacidade de deformação plástica antes da ruptura, garantindo avisos estruturais prévios. Em termos de viabilidade econômica e preservação estética, o reforço com parafusos consolida-se como uma alternativa tecnicamente eficiente para intervenções de *retrofit*. Esta técnica permite a reabilitação do elemento estrutural sem comprometer a identidade arquitetônica, sendo ideal para a recuperação do patrimônio.

Por fim, identificou-se uma lacuna crítica na literatura: a carência de análises sistemáticas sobre a durabilidade dos sistemas de reforço frente a agentes ambientais e solicitações de longa duração. Recomenda-se que pesquisas futuras incorporem avaliações integradas de vida útil e desempenho em serviço, transcendendo a análise meramente mecânica de curto prazo. Tal avanço é imprescindível para consolidar a confiabilidade técnica e a segurança das metodologias de recuperação aplicadas à engenharia de estruturas em madeira.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Referências

- ALMEIDA, J. P. B.; COUTO, N. G.; AQUINO, V. B. de M.; WOLENSKI, A. R. V.; PEIXOTO, R. G.; CHRISTOFORO, A. L. & LAHR, F. A. R. *Relações entre propriedades de rigidez para distintas solicitações mecânicas visando projetos de estruturas de madeira*. Ambiente Construído, vol. 20, n. 2, p. 25–35, 2020.
- ALVES, L. F.; PESSÔA, P. D. M.; JARDIM, P. I. L. G.; FAUSTINO, E.; DOS SANTOS, H. F.; LAHR, F. A. R.; DE ALMEIDA, D. H. & CHRISTOFORO, A. L. *Numerical Evaluation of the Influence of Using Carbon-Fiber-Reinforced Polymer Rebars as Shear Connectors for Cross-Laminated Timber-Concrete Panels*. Buildings, vol. 14, n. 7, p. 2178, 2024.
- ASSIS, L. F.; PEDREIRO, M. R. de M.; JARDIM, P. I. L. G.; SANTOS, H. F. dos & CHRISTOFORO, A. L. *Análise de vigas de madeira reforçadas com barras de FRP pela técnica NSM*. Matéria (Rio de Janeiro), vol. 29, n. 2, 2024.
- BHAT, J. A. *Improved Strength and Stiffness Characteristics of Cross-laminated Poplar Timber Columns*. International Journal of Engineering, vol. 34, n. 04, p. 803–810, 2021.
- CARVALHO, A. L. C. de; LEILA, F. M.; DIAS, A. M. S.; CHRISTOFORO, A. L.; SILVA, D. A. L.; SILVEIRA, M. E. & LAHR, F. A. R. *Numerical Analyses of Timber Columns Reinforced by Particulate Composite Material*. The Open Construction and Building Technology Journal, vol. 10, n. 1, p. 442–449, 2016.
- CHANG, W. S. *Repair and reinforcement of timber columns and shear walls - A review*. Construction and Building Materials, vol. 97, p. 14–24, 2015.
- CHU, Y.; SHI, B. & GONG, Y. *Experimental study on compressive behavior of intermediate slender timber columns with local damage and the retrofitting techniques for the damaged columns*. Structures, vol. 46, p. 1709–1725, 2022.
- DE ARAUJO, V. *Timber construction as a multiple valuable sustainable alternative: main characteristics, challenge remarks and affirmative actions*. International Journal of Construction Management, vol. 23, n. 8, p. 1334–1343, 2023.
- DONG, J. F.; YUAN, S. C.; WANG, Q. Y. & LIANG, W. *Influence of fractured wood texture on*

structural behaviour of timber columns with fibre reinforced polymer reinforcement. Materials Research Innovations, vol. 19, p. S5546–S5550, 2015.

GONZÁLEZ-BRAVO, C.; ARRIAGA-MARTITEGUI, F.; MALDONADO-RAMOS, L. & DíEZ-BARRA, R. *Refuerzo de vigas de madeira mediante perfíles metálicos situados en la cara superior*. Materiales de Construcción, vol. 60, n. 298, p. 123–135, 2010.

GOODELL, B. & NIELSEN, G. *Wood Biodeterioration*. Springer Handbooks of Wood Science and Technology. Springer, p. 139–177, 2023.

HAN, F.; LIU, Q.; GUO, X.; ZHANG, M. & HAN, X. *Analytical Study on Axial and Eccentric Compressive Behavior of Poplar Column Strengthened By Bfrp*. Wood Research, vol. 67, n. 1, p. 11–25, 2022.

JARDIM, P. I. L. G.; ARAUJO, V. A. de; MOLINA, J. C. & CHRISTOFORO, A. L. *Revisão sistemática acerca do uso de compósitos laminados de polímeros reforçados com fibras para o reforço de pilares de madeira*. Ambiente Construído, vol. 25, p. 1–12, 2025.

JARDIM, P. I. L. G.; MONTEIRO, S. N.; AZEVEDO, A. R. G. de; DE ARAÚJO, V. A.; PANZERA, T. H. & CHRISTOFORO, A. L. *Preservation and maintenance of wood-based structures of historic buildings: A systematic literature review on structural recovery techniques*. Case Studies in Construction Materials, vol. 22, p. e04706, 2025.

JARDIM, P. I. L. G.; SANTOS, H. F.; MATTIAS, L. W. A.; DE ARAUJO, V. A.; MOLINA, J. C. & CHRISTOFORO, A. L. *Wood-based columns reinforced with fiber-reinforced polymer: A systematic literature review*. BioResources, vol. 20, n. 1, p. 2293–2303, 2025.

JASIEŃKO, J. & NOWAK, T. P. *Solid timber beams strengthened with steel plates - Experimental studies*. Construction and Building Materials, vol. 63, p. 81–88, 2014.

KIA, L.; VALIPOUR, H. R. & GHANBARI-GHAZIJAHANI, T. *Experimental and numerical investigation of concentric axial loading on bar-reinforced composite timber columns at a large scale*. Structures, vol. 60, 2024.

LEE, I.-H.; SONG, Y.-J. & HONG, S.-I. *Evaluation of the compression strength performance of fiber-reinforced polymer (FRP) and steel-reinforced laminated timber composed of small-diameter timber*. BioResources, vol. 16, n. 1, p. 633–642, 2020.

LI, S.; XIE, Q.; ZHANG, B.; WANG, X. & ZHANG, L. *Compressive behavior of damaged timber columns: Experimental tests, degradation model, and repair method*. Engineering Structures, vol. 293, 2023.

LIU, R.; WU, Z.; PENG, Q.; ZHANG, Y. & WANG, J. *Experimental Study on the Axial Compression Performance of Glued Wood Hollow Cylinders Reinforced with BFRP*. Sustainability, vol. 14, n. 24, 2022.

MONGEON, P. & PAUL-HUS, A. *The journal coverage of Web of Science and Scopus: a comparative analysis*. Scientometrics, vol. 106, n. 1, p. 213–228, 2016.

MOTLAGH, B.; GHOLIPOUR, Y. & EBRAHIMI, G. H. *Experimental investigation on mechanical properties of old wood members reinforced with FRP composite*. Wood Research, vol. 57, n. 2, p. 285–296, 2012.

NAJM, H.; SECARAS, J. & BALAGURU, P. *Compression Tests of Circular Timber Column Confined with Carbon Fibers Using Inorganic Matrix*. Journal of Materials in Civil Engineering, vol. 19, n. 2, p. 198–204, 2007.

O'CALLAGHAN, R. B.; LACROIX, D. & KIM, K. E. *Experimental investigation of the compressive behaviour of GFRP wrapped spruce-pine-fir square timber columns*. Engineering Structures, vol. 252, 2022.

OTOOM, O. F.; LOKUGE, W.; KARUNASENA, W.; MANALO, A. C.; OZBAKKALOGLU, T. & EHSANI, M. R. *Flexural behaviour of circular timber columns strengthened by glass fibre reinforced polymer wrapping system*. Structures, vol. 38, p. 1349–1367, 2022.

PAGE, M. J.; MOHER, D.; BOSSUYT, P. M.; BOUTRON, I.; HOFFMANN, T. C.; et al. *PRISMA 2020 explanation and elaboration: updated guidance and exemplars for reporting systematic reviews*. BMJ, vol. 372, p. n160, 2021.

PAIVA FILHO, J. C. de; ALMEIDA, L. A.; CASTRO, V. G. de & DIODATO, M. A. *Diagnóstico do uso da madeira como material de construção no município de Mossoró-RN/Brasil*. *Matéria* (Rio de Janeiro), vol. 23, n. 3, 2018.

PARISI, M. A. & PIAZZA, M. *Restoration and Strengthening of Timber Structures: Principles, Criteria, and Examples*. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, vol. 12, n. 4, p. 177–185, 2007.

QIAO, G.; LI, T. & CHEN, Y. F. *Assessment and retrofitting solutions for an historical wooden pavilion in China*. *Construction and Building Materials*, vol. 105, p. 435–447, 2016.

RUGGIERI, N. *New Insights on the Borbone Construction System: a Peculiar 18th Century Retrofitting Solution for Earthquake Damaged Churches*. *International Journal of Architectural Heritage*, vol. 16, n. 9, p. 1289–1305, 2022.

SAAD, K. & LENGUEL, A. *Strengthening Timber Structural Members with CFRP and GFRP: A State-of-the-Art Review*. *Polymers*, vol. 14, n. 12, p. 2381, 2022.

SIHA, A. & ZHOU, C. *Experimental study and numerical analysis of composite strengthened timber columns under lateral cyclic loading*. *Journal of Building Engineering*, vol. 67, p. 106077, 2023.

SIHA, A. & ZHOU, C. *Experimental study on hysteretic behavior of circular timber columns strengthened with wrapped CFRP strips and near surface mounted steel bars*. *Engineering Structures*, vol. 263, p. 114416, 2022.

SIHA, A.; ZHOU, C. & YANG, L. *Experimental Study on Axial Compression Behavior on Circular Timber Columns Strengthened with CFRP Strips and Near-Surface Mounted Steel Bars*. *Journal of Structural Engineering*, vol. 147, n. 3, p. 04021003, 2021.

SONG, X.; WU, Y. & JIANG, R. *Compressive capacity of longitudinally cracked wood columns retrofitted by self-tapping screws*. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, vol. 16, n. 12, p. 964–975, 2015.

TAHERI, F.; NAGARAJ, M. & KHOSRAVI, P. *Buckling response of glue-laminated columns reinforced with fiber-reinforced plastic sheets*. *Composite Structures*, vol. 88, n. 3, p. 481–490, 2009.

TORERO, J. L. *Fire Safety of Historical Buildings: Principles and Methodological Approach*. *International Journal of Architectural Heritage*, vol. 13, n. 7, p. 926–940, 2019.

VALLE, Â. do; PEREIRA, N. B. & NAPPI, S. C. B. *Recommendations for design in preserving historical buildings with wooden structures' roofs*. *Advanced Materials Research*, vol. 778, p. 1072–1079, 2013.

WANG, H.; CHUN, Q.; ZHANG, C.; MA, S.; CAO, G.; DONG, Q. *Experimental study on the compression behavior of long timber column strengthened with the novel hybrid fiber sheets*. *Journal of Wood Science*, vol. 69, n. 1, 2023.

WANG, Y.; LIANG, C.; ZHANG, B.; QU, S.; GAO, Y. & ZHANG, X. *Mechanical properties of fast-growing poplar glulam columns reinforced with steel plate*. *Case Studies in Construction Materials*, vol. 18, p. e01825, 2023.

XIONG, X. Y.; LU, X. X. & XUE, R. J. *The study on timber pier columns strengthened with CFRP hoops in ancient architecture*. *Advanced Composites Letters*, vol. 25, n. 6, p. 132–136, 2016.

YANG, L.; LI, X.; FANG, H.; LIU, W.; HONG, J.; HUI, D. & GAFF, M. *Compressive behaviour of wood-filled GFRP square columns with lattice-web reinforcements*. *Construction and Building Materials*, vol. 310, 2021.

ZHANG, Y.; WANG, J.; LIN, J.; ZHANG, F. & YAN, X. *Crushing mechanical responses of natural wood columns and wood-filled composite columns*. *Engineering Failure Analysis*, vol. 124, p. 105358, 2021.

ZHOU, L.; LIU, Q.; MA, S.; HAN, X. *Eccentric compression behavior of long poplar columns externally reinforced by BFRP*. *Journal of Wood Science*, vol. 67, n. 1, p. 1–17, 2021.