

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**PEDRO IGNÁCIO LIMA GADÊLHA JARDIM**

**RECUPERAÇÃO DE VIGAS DE MADEIRA DETERIORADA  
COM CHAPA DE AÇO PARAFUSADA**

**SÃO CARLOS**

**2022**

**PEDRO IGNÁCIO LIMA GADÊLHA JARDIM**

**RECUPERAÇÃO DE VIGAS DE MADEIRA DETERIORADA COM CHAPA DE AÇO  
PARAFUSADA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. André Luis Christoforo

Área de concentração: Estruturas e Geotecnia

**SÃO CARLOS**

**2022**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

---

### Folha de Aprovação

---

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Pedro Ignacio Lima Gadelha Jardim, realizada em 15/12/2022.

#### Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Andre Luis Christoforo (UFSCar)

Profa. Dra. Elen Aparecida Martines Morales (UNESP)

Prof. Dr. Tulio Hallak Panzera (UFMG)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

## **AGRADECIMENTOS**

À minha esposa, Lidiane, pelo companheirismo, apoio, paciência, incentivo e ensinamentos não apenas nesse período, mas em todo o tempo que estamos juntos. Obrigado por sempre me mostrar o melhor caminho e ajudar a me tornar quem sou.

À minha filha, Giovanna, por me entender e incentivar e, sempre que pode, me ajudar a estudar.

Aos meus pais, Márcia e Sérgio, que, cada um à sua maneira, sempre estimularam e incentivaram minha formação e pensamento crítico. Obrigado pelo cuidado, carinho e incentivo.

Ao professor André Luis Christoforo, por toda a orientação, apoio e ensinamentos durante esse período, sempre com bastante gentileza e carinho.

Aos professores Elen Aparecida Martines Morales e Túlio Hallak Panzera, pela disponibilidade em participar das bancas deste trabalho e suas importantes contribuições ao mesmo.

Ao professor Diego Henrique de Almeida, por acreditar em mim e me mostrar que esse caminho seria possível.

Aos professores José Carlos Paliari e Victor Almeida de Araújo pelos ensinamentos da disciplina de Metodologia de Pesquisa que foram fundamentais para o desenvolvimento deste estudo.

Aos colegas de pós-graduação Felipe Arroyo, Marcelo Pereira e Marcos Vinicius, por toda a parceria durante o mestrado.

Aos amigos que sempre estiveram me apoiando: Daiane Telles, Flávio Fagundes, Lívia Ribeiro, Luis Bergonzini e Raduan Krause.

A todas as demais pessoas que ajudaram direta ou indiretamente na minha trajetória até o momento.

## RESUMO

A madeira é um material amplamente utilizado em construções desde a antiguidade, comumente encontrada em construções históricas em todo o planeta. Como a madeira é um material biodegradável, as construções que a utilizam como tipologia estrutural, sem o conhecimento das técnicas atuais de garantia da durabilidade deste material, necessitam de maiores cuidados quanto sua proteção. Como caso especial, as construções de patrimônios históricos possuem diversas restrições quanto a troca de seus elementos para preservação da estética e significado original de seus ambientes. Desse modo, a solução de recuperação dessas estruturas degradadas deve ser concebida de forma a manter o máximo de material original e incremento de elementos capazes de garantir a capacidade estrutural frente aos limites normativos de ruptura e serviço. Existem diversas tecnologias para recuperar e reforçar estruturas de madeira. Duas alternativas usuais são: a utilização de chapas de aço parafusadas e a utilização de materiais compósitos como polímeros reforçados com fibras (FRP) coladas com adesivo epóxi. Foi observado uma lacuna na literatura quanto ao estudo de reforço em vigas de madeira com perda de seção transversal, comumente encontrado em ataques de agentes bióticos ou abióticos. O objetivo desse estudo foi analisar a capacidade de recuperação da rigidez à flexão da chapa de aço parafusada em vigas de madeira folhosa com diferentes perdas de seção transversal, com especial interesse no efeito provocado por diferentes arranjos de parafusos na capacidade de transmissão dos esforços da viga para o reforço, bem como a utilização de compósitos poliméricos reforçados com fibra de carbono (CFRP) considerando uma aderência perfeita e, com isso, perfeita transmissão dos esforços entre o reforço e a viga. Foi possível observar que, apesar de apresentar eficiência inferior ao CFRP, a utilização da chapa de aço parafusada teve capacidade de retornar a rigidez inicial em alguns modelos e a especificação dos parafusos possui relevância na obtenção dos resultados. A utilização de fixadores mecânicos foi mais eficiente em vigas de classes de resistência inferiores, apresentando uma diferença menos significativa quando comparado com os modelos com reforço de CFRP. A região onde o defeito da madeira ocorre também possui grande influência na capacidade de recuperação e na escolha do reforço adequado.

**Palavras-chave:** Recuperação estrutural; viga reforçada com chapa de aço parafusada; materiais compósitos; fixadores mecânicos; patrimônio histórico.

## ABSTRACT

*Wood is a material widely used in construction since ancient times, commonly found in historical buildings all over the planet. As wood is a biodegradable material, the constructions that use it as a structural typology, without the knowledge of the current techniques to safeguard the durability of this element, need more care regarding its protection. As a special case, historical heritage buildings have several restrictions on exchanging their elements to preserve the aesthetics and original meaning of their environments. Thus, the solution for the recovery of these degraded structures must be designed to keep as much of the original material as possible and to increase the number of elements capable of ensuring structural capacity in relation to the normative limits of rupture and service. There are several technologies for recovering and strengthening timber structures. Two usual alternatives are: the use of bolted steel plates and the use of composite materials such as fiber-reinforced polymers (FRP) bonded with epoxy adhesive. A gap was observed in the literature regarding the study of strengthening in timber beams with cross-section loss, commonly found in attacks by biotic or abiotic agents. The objective of this study was to analyze the ability to recover the flexural stiffness of steel plate bolted to hardwood beams with different cross-section losses, with a particular interest in the effect caused by different bolt arrangements in the ability to transmit the efforts from the beam to the strengthening, as well as the use of carbon fiber-reinforced polymer composites (CFRP), considering the perfect adherence and, with that, perfect transmission of the efforts between the strengthening and the beam. It was possible to observe that, despite presenting lower efficiency than the CFRP blanket, the bolted steel plate was able to return the initial stiffness in some models and the bolts specification has relevance in obtaining the results. The use of mechanical fasteners was more efficient in beams of lower strength classes, presenting a less significant difference compared to the CFRP blanket strengthening models. The region where the wood defect also occurs extensively influences the recovery capacity and the choice of adequate strengthening.*

**Keywords:** *Structural recovery; bolted steel plate reinforced beam; composite materials; mechanical fasteners; heritage.*

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – ATAQUES DE CUPINS NA MADEIRA .....	24
FIGURA 2 – ELEMENTOS DE MADEIRA DETERIORADOS POR FUNGOS E INSETOS XILÓFAGOS .....	25
FIGURA 3 – ELEMENTOS UNIDIRECIONAIS COM DOIS NÓS (A) E TRÊS NÓS (B) .....	31
FIGURA 4 – ELEMENTOS BIDIRECIONAIS TRIANGULARES COM TRÊS NÓS (A) E SEIS NÓS (B) E QUADRILATERAIS COM QUATRO NÓS (C) E OITO NÓS (D) .....	31
FIGURA 5 – ELEMENTOS TRIDIMENSIONAIS HEXAÉDRICOS COM QUATRO NÓS (A) E DEZ NÓS (B) E HEXAÉDRICOS COM OITO NÓS (C) E VINTE NÓS (D) .....	32
FIGURA 6 – ESTRUTURA GERAL DAS REVISÕES SISTEMÁTICAS .....	34
FIGURA 7 – FLUXOGRAMA PRISMA DA REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE A RECUPERAÇÃO DE ESTRUTURAS DE MADEIRA EM PATRIMÔNIOS HISTÓRICOS.....	38
FIGURA 8 – ANO DE PUBLICAÇÃO DOS ARTIGOS INCLUÍDOS NA AMOSTRA.....	40
FIGURA 9 – PERÍODO DA CONSTRUÇÃO DO PATRIMÔNIO .....	41
FIGURA 10 – NUVEM DE PALAVRAS DAS MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS ENCONTRADAS NA AMOSTRA .....	42
FIGURA 11 – CLASSIFICAÇÃO DOS ARTIGOS CONFORME OS CRITÉRIOS DE QUALIDADE.....	42
FIGURA 12 – FLUXOGRAMA PRISMA DA REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE SIMULAÇÃO DE VIGAS DE MADEIRA PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS .....	55
FIGURA 13 – ANO DE PUBLICAÇÃO DOS ARTIGOS INCLUÍDOS NA AMOSTRA.....	56
FIGURA 14 – CLASSIFICAÇÃO DOS ARTIGOS CONFORME OS CRITÉRIOS DE QUALIDADE.....	56
FIGURA 15 – <i>SOFTWARES</i> ADOTADOS NOS ARTIGOS DA AMOSTRA.....	63
FIGURA 16 – TAMANHOS DE MALHA ADOTADOS NOS ARTIGOS DA REVISÃO .....	65
FIGURA 17 – REGIÃO COM PERDA DE SEÇÃO NA ÁREA TRACIONADA DE (A) 15%; (B) 30%; E (C) 45% DA ALTURA TOTAL, SEM ESCALA E COM MEDIDAS EM MM. ....	77
FIGURA 18 – DETALHE DA CHAPA DE AÇO PARA (A) DOIS PARAFUSOS, (B) QUATRO PARAFUSOS E (C) SEIS PARAFUSOS, SEM ESCALA E COM MEDIDAS EM MM..	78
FIGURA 19 – REGRA ADOTADA PARA DEFINIÇÃO DOS CÓDIGOS ALFANUMÉRICOS DOS MODELOS DE SIMULAÇÃO PRINCIPAL. ....	79
FIGURA 20 – PROCEDIMENTO PARA MODELAGEM E PROCESSAMENTO NO ABAQUS.....	81
FIGURA 21 – GEOMETRIAS CRIADAS NO ABAQUS.....	81
FIGURA 22 – ABERTURAS NAS VIGAS NA REGIÃO TRACIONADA (A)(B)(C) E NA REGIÃO COMPRIMIDA (D)(E)(F).....	82
FIGURA 23 – MODELOS COM REFORÇO DE CHAPA DE AÇO PARAFUSADA COM ABERTURA NA REGIÃO TRACIONADA (A) E COMPRIMIDA (B) E COM REFORÇO DE CFRP COM ABERTURA NA REGIÃO TRACIONADA (C) E COMPRIMIDA (D). ....	83
FIGURA 24 – CONDIÇÕES DE CONTORNO CARREGADAS NO <i>STEP</i> INICIAL (A) E MODIFICAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO NO SEGUNDO <i>STEP</i> (B).....	85
FIGURA 25 – TESTE DE MALHA DA VIGA .....	86
FIGURA 26 – VIGA COM A MALHA DEFINIDA .....	87
FIGURA 27 – CHAPA DE AÇO COM A MALHA DEFINIDA .....	88
FIGURA 28 – PARAFUSO COM A MALHA DEFINIDA.....	89
FIGURA 29 – RESULTADOS DOS MODELOS COM DEFEITO PARA AS CLASSES D20 (A); D30 (B); D40 (C); D50 (D); E D60 (E).....	91
FIGURA 30 – VARIAÇÃO DA RIGIDEZ DA VIGA NOS MODELOS SEM REFORÇO.....	93

FIGURA 31 – RELAÇÃO FORÇA-DESLOCAMENTO DOS MODELOS COM CHAPA DE AÇO PARAFUSADA PARA A CLASSE D20 (A); D30 (B); D40 (C); D50 (D); E D60 (E).....	94
FIGURA 32 – RELAÇÃO DA FORÇA OBTIDA NO PONTO DE APLICAÇÃO DO DESLOCAMENTO EM RELAÇÃO AO MODELO INICIAL .....	97
FIGURA 33 – RELAÇÃO DO DESLOCAMENTO MÁXIMO EM RELAÇÃO AO MODELO INICIAL.....	98
FIGURA 34 – RIGIDEZ DO CONJUNTO MADEIRA-CHAPA DE AÇO.....	99
FIGURA 35 – TENSÃO NORMAL À SEÇÃO TRANSVERSAL DA VIGA D20 (A); D20-135T (B); D20-135C (C); D20-135T-6B (D) E D20-135C-6B (E) .....	101
FIGURA 36 – TENSÃO NORMAL À SEÇÃO TRANSVERSAL DA VIGA D60 (A); D60-135T (B); D60-135C (C); D60-135T-6B (D) E D60-135C-6B (E) .....	102
FIGURA 37 – RELAÇÃO FORÇA-DESLOCAMENTO DOS MODELOS COM CFRP PARA AS CLASSES D20 (A); D30 (B); D40 (C); D50 (D); E D60 (E) .....	104
FIGURA 38 – RIGIDEZ DO CONJUNTO MADEIRA-CFRP .....	106
FIGURA 39 – COMPARAÇÃO DA RIGIDEZ OBTIDA NOS MODELOS COM CHAPA DE AÇO PARAFUSADA COM OS MODELOS DE CFRP PARA AS CLASSES D20 E D60.....	107
FIGURA 40 – VARIAÇÃO DA RIGIDEZ COM O AUMENTO DA BITOLA DO PARAFUSO PARA A CLASSE D60 .....	108
FIGURA 41 – VARIAÇÃO DA RIGIDEZ COM O AUMENTO DA QUANTIDADE DE PARAFUSOS PARA A CLASSE D60 .....	109
FIGURA 42 – VARIAÇÃO DA RIGIDEZ COM O AUMENTO DA QUANTIDADE DE PARAFUSOS PARA A CLASSE D20.....	110

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – PERGUNTAS NORTEADORAS DA REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE A RECUPERAÇÃO DE ESTRUTURAS DE MADEIRA EM PATRIMÔNIOS HISTÓRICOS .....	36
QUADRO 2 – TERMOS DE BUSCA DA REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE A RECUPERAÇÃO DE ESTRUTURAS DE MADEIRA EM PATRIMÔNIOS HISTÓRICOS.....	36
QUADRO 3 – CRITÉRIOS DE QUALIDADE DA REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE A RECUPERAÇÃO DE ESTRUTURAS DE MADEIRA EM PATRIMÔNIOS HISTÓRICOS .....	37
QUADRO 4 – CAMPOS DE EXTRAÇÃO DA REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE A RECUPERAÇÃO DE ESTRUTURAS DE MADEIRA EM PATRIMÔNIOS HISTÓRICOS .....	38
QUADRO 5 – ARTIGOS SELECIONADOS NA REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE A RECUPERAÇÃO DE ESTRUTURAS DE MADEIRA EM PATRIMÔNIOS HISTÓRICOS .....	39
QUADRO 6 – PERGUNTAS NORTEADORAS DA REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE SIMULAÇÃO DE VIGAS DE MADEIRA PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS .....	52
QUADRO 7 – TERMOS DE BUSCA DA REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE SIMULAÇÃO DE VIGAS DE MADEIRA PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS .....	53
QUADRO 8 – CRITÉRIOS DE QUALIDADE DA REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE SIMULAÇÃO DE VIGAS DE MADEIRA PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS .....	53
QUADRO 9 – CAMPOS DE EXTRAÇÃO DA REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE SIMULAÇÃO DE VIGAS DE MADEIRA PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS .....	54
QUADRO 10 – ESPÉCIES DE MADEIRA ADOTADAS PARA CADA CLASSE DE RESISTÊNCIA....	76

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>10</b>
1.1	JUSTIFICATIVA	12
1.2	PROBLEMA DE PESQUISA	13
1.3	OBJETIVOS	13
1.3.1	Geral	13
1.3.2	Específicos	13
1.4	DELIMITAÇÕES DO TRABALHO	14
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	14
<b>2</b>	<b>ASPECTOS FUNDAMENTAIS</b>	<b>17</b>
2.1	PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DA MADEIRA	18
2.2	MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM ESTRUTURAS DE MADEIRA	22
2.3	RECUPERAÇÃO DE ESTRUTURAS DE MADEIRA	25
2.4	PATRIMÔNIO HISTÓRICO CULTURAL	28
2.5	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	29
<b>3</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b>	<b>34</b>
3.1	RECUPERAÇÃO DE ESTRUTURAS DE MADEIRA EM PATRIMÔNIOS HISTÓRICOS	36
3.2	SIMULAÇÃO DE VIGAS DE MADEIRA PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	52
3.2.1	Utilização do método dos elementos finitos para análise de vigas de madeira	57
3.2.2	Consideração do comportamento da madeira	61
3.2.3	Configurações usuais das simulações	62
3.2.4	Definições de malhas adotadas para vigas de madeira	64
3.2.5	Consideração do contato da madeira com outros elementos	67
3.2.6	Conclusão da revisão sistemática	69
3.3	CONCLUSÃO DAS REVISÕES DE LITERATURA	70
<b>4</b>	<b>MÉTODO DE PESQUISA</b>	<b>74</b>
4.1	ESTUDO PARAMÉTRICO	75
4.2	SIMULAÇÃO NUMÉRICA	80
4.2.1	Elaboração dos modelos e configuração da simulação	80
4.2.2	Validação do modelo numérico e teste de malha	86
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>91</b>

5.1	COMPORTAMENTO DA VIGA COM PERDA DE SEÇÃO TRANSVERSAL ...	91
5.2	COMPORTAMENTO DA VIGA COM PERDA DE SEÇÃO TRANSVERSAL E REFORÇO COM CHAPA DE AÇO FIXADA POR PARAFUSOS .....	93
5.3	MODELOS COM REFORÇO DE CFRP.....	104
5.4	INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DOS PARAFUSOS NA RIGIDEZ DA VIGA ....	108
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>113</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>116</b>
	<b>APÊNDICE A – ARTIGOS SELECIONADOS NA REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE SIMULAÇÃO DE VIGAS DE MADEIRA PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS .....</b>	<b>138</b>
	<b>APÊNDICE B – DESCRIÇÃO DOS CÓDIGOS ALFANUMÉRICOS DO GRUPO PRINCIPAL .....</b>	<b>145</b>
	<b>APÊNDICE C – DESCRIÇÃO DOS CÓDIGOS ALFANUMÉRICOS DO GRUPO DE COMPARAÇÃO .....</b>	<b>153</b>

# **1 INTRODUÇÃO**

## 1 INTRODUÇÃO

A madeira é um material amplamente utilizado em construções desde a antiguidade. Com isso, é comumente encontrada em construções históricas por todo o planeta, sendo parte da perpetuação da identidade e cultura de diversas sociedades pelo mundo. A preservação dessas construções se torna fundamental para a manutenção da história das civilizações (CHEN; GUO, 2017; CHORLTON; GALES, 2019; COLI; IWASAKI, 2021; ENDERE; ZULAICA, 2015; SHABANI *et al.*, 2020).

Como a madeira é um material biodegradável, as construções que a utilizam como tipologia estrutural, sem o conhecimento das técnicas atuais de garantia de sua durabilidade, necessitam de maiores cuidados quanto sua proteção (CHEN; GUO, 2017; WANG *et al.*, 2021).

A conservação, manutenção e eventual recuperação das estruturas em construções históricas necessita de atenção especial, pois o desempenho estrutural deve ser observado em conjunto da estética original do elemento, arquitetura e ornamento do ambiente, garantindo a não descaracterização do patrimônio e a preservação de seu valor histórico e cultural (COLI; IWASAKI, 2021; TORERO, 2019; VALLE; PEREIRA; NAPPI, 2013). Parisi e Piazza (2007) destacam que a restauração das estruturas em construções patrimoniais deve preferenciar a conservação dos materiais já existentes, em especial para construções com valor artístico reconhecido.

Bajno, Grzybowska e Bednarz (2021) salientaram que alguns processos de melhoria nas condições de operação das construções históricas, como climatização, podem afetar negativamente a madeira com um processo acelerado de troca de calor e umidade com o ambiente exterior, favorecendo a corrosão biológica e afetando também a segurança estrutural.

Dentre as possíveis manifestações patológicas, Che e Guo (2017) apresentaram as rachaduras e furos como anormalidades frequentes em estruturas de madeira. O ataque de insetos e fungos foi observado por Shabani *et al.* (2020) e Choidis *et al.* (2021), causando redução da seção e alteração das propriedades mecânicas do elemento estrutural.

Alguns estudos se dedicaram ao levantamento das manifestações patológicas em estruturas de madeira, sendo comumente encontrada perda de seção transversal nos elementos da estrutura em razão de processo de apodrecimento da madeira,

geralmente associado ao excesso de umidade e ataque de agentes bióticos (GUEVARA; TOIRAC; MARISY, 2019; MARTINS; FIORITI, 2016).

Existem diversas tecnologias para reforço e recuperação de estruturas de madeira (GUEVARA; TOIRAC; MARISY, 2019; MARTINS; FIORITI, 2016; SCHOBER *et al.*, 2015), por exemplo o uso de polímeros reforçados com diversos tipos de fibras, sendo comumente encontradas as fibras de carbono e de vidro, geralmente fixados na estrutura com adesivos específicos. Segundo Lukin *et al.* (2021), em elementos submetidos à flexão, esse tipo de reforço deve ser fixado em regiões tracionadas com maiores deformações, sendo chamado de reforço racional.

Uma solução para reforço de peças de madeira deterioradas utilizando materiais mais tradicionais na construção civil consiste na aplicação de chapa de aço parafusada no elemento. Uma técnica para utilização de chapas de aço em vigas de madeira é a sua colagem com adesivo epóxi ou material similar que garanta um alto grau de aderência entre a madeira e o aço, entretanto o procedimento é de difícil execução e controle quando é realizado *in loco* (BURDZIK; SKORPEN, 2016). Uma alternativa é utilizar dispositivos fixadores mecânicos, como pregos e parafusos, para a solidarização dos materiais atuantes no elemento estrutural. No estudo de Burdzik e Skorpen (2016), foi identificado que a rigidez do conjunto aumenta conforme o espaçamento dos fixadores mecânicos diminui e a rigidez da madeira é preponderante no módulo de elasticidade do conjunto.

O comportamento do elemento compósito madeira-aço está diretamente associado à capacidade dos fixadores mecânicos de transmissão dos esforços. No estudo de Waseem, Manzoor e Bhat (2022) foi verificado que a rigidez do conjunto madeira-aço aumenta quando o espaçamento dos fixadores mecânicos é menor. Atualmente, há uma lacuna nos estudos da aplicação dessa solução em vigas com perda de seção transversal (geometrias descontínuas), situação comumente encontrada em prédios históricos, bem como o estudo da participação dos elementos de fixação mecânica na capacidade de recuperação estrutural desse tipo de elemento.

Destaca-se que a utilização de reforço parcial, utilizando fixadores mecânicos, em vigas com geometrias descontínuas não possuem modelagem analítica para determinação de sua rigidez. Esse tipo de estudo é de difícil experimentação, uma vez que as medições realizadas em laboratórios descrevem o comportamento do ensaio apenas nos pontos instrumentados e não de forma contínua. Para esses elementos a

adoção de análise pelo método dos elementos finitos permite uma avaliação global do reforço, possibilitando uma melhor compreensão do fenômeno estudado.

Dessa forma, o presente estudo se destinou a analisar o desempenho da utilização de chapa de aço parafusada como reforço em vigas de madeira de folhosas com perda de seção transversal, por meio de um estudo paramétrico utilizando o método dos elementos finitos. Foi avaliada a possibilidade de recuperação da rigidez inicial do elemento, com principal interesse na atuação dos parafusos como fixadores mecânicos. Por fim, os modelos foram simulados considerando a utilização de polímero reforçado com fibra de carbono (CFRP - *carbon fiber-reinforced polymer*) como elemento de recuperação estrutural e seus resultados comparados com o reforço em chapa de aço parafusada.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

A importância da manutenção do patrimônio histórico é imperativa para a preservação da cultura e história da humanidade. A recuperação de estruturas dessas construções deve ser interesse primário para garantir o desempenho esperado por todos os sistemas construtivos. Entretanto, o método adotado para a intervenção deve ser definido considerando a não descaracterização do local ou do elemento, nos casos de recuperação parcial.

A utilização de elementos de aço para reforço de elementos de viga de madeira possui diversos estudos e abordagens, sendo a transmissão dos esforços entre os elementos um tema com recorrentes estudos e proposições (BURDZIK; SKORPEN, 2016; WASEEM; MANZOOR; BHAT, 2022). Entretanto, a aplicação desse tipo de reforço em elementos danificados com perda de seção transversal ainda não foi analisada.

A madeira em situação de reforço comumente não apresenta a mesma configuração geométrica inicial, seja por ataques de agentes xilófagos ou desgaste pela utilização (VERBIST; MATOS; BRANCO, 2019). Desse modo, a análise de recuperação desses elementos deve levar em consideração essas imperfeições para que possa prever o comportamento mais aproximado da realidade.

A análise dessa solução visa contribuir para a recuperação de estruturas de madeira degradadas e com restrições quanto a substituição de seus elementos, seja

por natureza técnica ou por importância histórica. Além disso, a utilização de chapas metálicas parafusadas garante uma execução simplificada se comparada com outros métodos como a utilização de polímeros reforçados com fibra de carbono (BURDZIK; SKORPEN, 2016).

Ainda, o presente estudo pretende contribuir ao conhecimento científico já existente com as análises acerca da transmissão dos esforços entre os elementos por meio dos fixadores mecânicos, avaliando os efeitos causados no conjunto quando ocorrem variações nesses elementos.

## **1.2 PROBLEMA DE PESQUISA**

Qual a efetividade do uso da chapa de aço parafusada em diferentes configurações e do CFRP para a recuperação estrutural de vigas de madeira com redução de seção transversal?

## **1.3 OBJETIVOS**

### **1.3.1 Geral**

Analisar a capacidade de recuperação estrutural de vigas de madeira deterioradas reforçadas com chapas de aço parafusadas e CFRP em situação de serviço.

### **1.3.2 Específicos**

- Avaliar a influência da perda de seção transversal no desempenho em serviço de vigas de madeira, sem o uso de reforço;
- Avaliar a influência da quantidade e diâmetro dos parafusos na transmissão dos esforços e desempenho em serviço de vigas de madeira deterioradas reforçadas com chapas de aço parafusadas;
- Avaliar a influência da variação da espécie de madeira no desempenho em serviço de vigas de madeira deterioradas reforçadas com chapas de aço parafusadas;

- Comparar o desempenho em serviço de vigas de madeira deterioradas reforçadas com chapas de aço parafusadas e com CFRP.

#### **1.4 DELIMITAÇÕES DO TRABALHO**

A presente pesquisa está delimitada em vigas de madeiras folhosas, não visando obter resultados necessariamente reproduzíveis em espécies coníferas. Os fixadores mecânicos adotados foram parafusos que traspassam a seção transversal de forma vertical, não sendo analisados parafusos auto brocantes ou fixados em configurações distintas à mencionada. Não foi objeto do estudo a análise do elemento de fixação do CFRP na viga, sendo considerada como totalmente aderida para garantir uma capacidade máxima de transmissão para comparar com os resultados obtidos nos modelos parafusados.

#### **1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO**

Este estudo é composto por mais seis capítulos, além do capítulo introdutório. No Capítulo 2 são apresentados os aspectos fundamentais do Projeto de Pesquisa. Neste Capítulo são apresentados cinco subcapítulos: propriedades físicas e mecânicas da madeira, manifestações patológicas em estruturas de madeira, recuperação de estruturas de madeira, patrimônio histórico cultura e método dos elementos finitos.

No Capítulo 3 é apresentada a revisão da literatura. Neste Capítulo são apresentadas duas revisões sistemáticas divididas nos seguintes subcapítulos: recuperação de estruturas de madeira em patrimônios históricos e simulação de vigas de madeira pelo método dos elementos finitos. Por fim, é apresentado um subcapítulo sintetizando as conclusões das revisões.

No Capítulo 4 é apresentado o método de pesquisa. Este Capítulo é dividido em dois subcapítulos onde o primeiro apresenta a estudo paramétrico e o segundo discorre sobre a simulação numérica. No Capítulo 5 são apresentados os resultados e discussões e o Capítulo 6 são apresentadas as conclusões parciais.

Além destes capítulos, são apresentados também três apêndices contendo a relação de artigos selecionados na revisão sistemática sobre simulação de vigas de

madeira pelo método dos elementos finitos, descrição dos códigos alfanuméricos utilizados no grupo principal e a descrição dos códigos alfanuméricos utilizados no grupo de comparação.

## **2 ASPECTOS FUNDAMENTAIS**

## 2 ASPECTOS FUNDAMENTAIS

Para que o estudo proposto possa ser realizado, se faz necessária a apresentação de conceitos fundamentais que visam garantir o embasamento técnico-científico para a apresentação do método de estudo adotado e posterior discussão dos resultados.

Visando uma estruturação coerente e lógica dos conceitos abordados, este capítulo foi dividido nas seguintes partes: propriedades físicas e mecânicas da madeira, manifestações patológicas em estruturas de madeira, recuperação de estruturas de madeira, patrimônio histórico cultural e método dos elementos finitos.

O primeiro subcapítulo tem como objetivo apresentar as propriedades físicas e mecânica das madeiras, com principal interesse nas madeiras nativas. Foi discutido como o documento normativo brasileiro, NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2022) considera essas propriedades no projeto estrutural de elementos de madeira. Ainda, foram apresentados estudos que discutem as considerações normativas frente aos ensaios realizados.

O segundo subcapítulo retrata os fundamentos acerca das manifestações patológicas nas estruturas de madeira, suas origens e prejuízos causados. Desejou-se explicitar as variadas fontes de degradação da madeira e a importância em se adotar métodos adequados para evitar o surgimento desses agentes patógenos.

O subcapítulo 2.3 apresenta aspectos básicos da recuperação de estruturas de madeira, conceituando os diversos termos que são empregados, por vezes, de forma equivocada e discutindo os tipos de intervenção nas estruturas de madeira que são relatados na literatura científica, destacando suas vantagens e desvantagens.

Uma apresentação breve sobre patrimônios histórico culturais, sua importância cultural e social e a necessidade de sua preservação foi retratada no subcapítulo 2.4.

Por fim, o subcapítulo 2.5 teve como objetivo apresentar conceitos teóricos fundamentais acerca do método dos elementos finitos, fornecendo informações básicas para que leitores que não possuam conhecimento sobre o assunto possam compreender os capítulos posteriores. Não foram abordados conceitos referentes às simulações, mas à fundamentação do método em si.

## 2.1 PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DA MADEIRA

As propriedades físicas e mecânicas da madeira são fundamentais para previsão de seu comportamento, são utilizadas para a elaboração de projetos estruturais utilizando esse material e são diretamente influenciadas por sua estrutura anatômica (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2022; MARINI *et al.*, 2021; OZELTON; BAIRD, 2006).

Segundo Bauer (2015), diversos fatores naturais influenciam o comportamento físico e a resistência das peças da madeira, como: a estrutura anatômica e a constituição de seu tecido lenhoso, a massa específica, a localização da peça serrada no lenho, a presença de defeitos, e a umidade.

A estrutura anatômica é classificada conforme a espécie botânica da madeira, sendo dividida em dois grupos: árvores coníferas, da classe Gimnosperma, sendo chamada de madeiras macias; e árvores dicotiledôneas (folhosas), da classe Angiosperma, sendo chamada de madeiras duras (BAUER, 2015; OZELTON; BAIRD, 2006; PFEIL; PFEIL, 2017; PORTEOUS; KERMANI, 2007). Apesar dessa divisão de classes, isso não é um fator determinante para a resistência do elemento, sendo encontradas espécies de madeira com resistência elevada e outras com baixa resistência tanto para o grupo das coníferas, quanto para o das dicotiledôneas, conforme observado por Pfeil e Pfeil (2017).

A massa específica aparente consiste na razão entre o a massa do material por unidade de volume, podendo ser entendida como a concentração do material e possui influência direta em suas propriedades física e mecânicas (BAUER, 2015). Diversos autores estudaram a capacidade de correlação da densidade da madeira com outras propriedades físicas e mecânicas (BAUER, 2015; OZELTON; BAIRD, 2006; PFEIL; PFEIL, 2017; PORTEOUS; KERMANI, 2007). Dias e Lahr (2004), avaliaram as relações entre as propriedades físicas de resistência e rigidez em função da densidade aparente estabelecendo equações para correlacionar a propriedade estudada com diversas características mecânicas, evidenciando a influência desse parâmetro no comportamento estrutural da madeira.

A região de extração da peça de madeira da árvore possui correlação direta no comportamento físico e mecânico do elemento, sendo observadas variações da massa específica e conformação das fibras, por exemplo (BAUER, 2015).

A presença de defeitos na madeira é uma característica que deve ser observada para o seu uso. Segundo Porteous e Kermani (2007), a madeira possui a presença de defeitos naturais oriundos de seu crescimento e isso afeta, além de sua estética, seu desempenho estrutural.

Conforme apresentado por Bauer (2015), a umidade é um fator condicionante para o comportamento físico e mecânico. Segundo Branco *et al.* (2014), o aumento do teor de umidade acarreta em uma diminuição do desempenho estrutural da madeira.

Para fins de projeto estrutural, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 7190 (2022), denominada de “Projetos de estruturas de madeira”, estabelece um teor de umidade de 12%, sendo considerado como condição-padrão. Nogueira *et al.* (2018) observaram uma melhoria de 10 das 14 propriedades mecânicas avaliadas da espécie *Eucalyptus camaldulensis* quando diminuíram a umidade de 30% para os 12% previstos no documento normativo brasileiro.

Segundo o documento normativo brasileiro, para ensaios que utilizam diferentes teores de umidade ( $U\%$ ), a resistência ( $f_{U\%}$ ) e a rigidez ( $E_{U\%}$ ) medidas devem ser corrigidas para a umidade padrão de 12% ( $f_{12}$  e  $E_{12}$ , respectivamente), conforme apresentado nas equações 1 e 2.

$$f_{12} = f_{U\%} \cdot \left[ 1 + \frac{3 \cdot (U\% - 12)}{100} \right] \quad \text{Eq. 1}$$

$$E_{12} = E_{U\%} \cdot \left[ 1 + \frac{2 \cdot (U\% - 12)}{100} \right] \quad \text{Eq. 2}$$

Petrucci (1975) e Pfeil e Pfeil (2017) apresentam outras duas propriedades da madeira: a retração e a dilatação linear. A retração é um efeito observado a partir da variação de umidade, despertando principal preocupação na região tangencial. A dilatação linear é o efeito contrário à retração e é mais crítico na direção perpendicular às fibras.

Bauer (2015) salienta que as características mecânicas principais da madeira possuem relação com sua coesão axial (compressão, tração, flexão estática e dinâmica), enquanto as secundárias são relacionadas à coesão transversal (compressão e tração normal às fibras, torção, cisalhamento e fendilhamento), estando todas relacionadas ao comportamento anisotrópico do material.

O comportamento anisotrópico da madeira ocorre pelas diferentes propriedades mecânicas obtidas em cada direção (radial, tangencial e longitudinal), porém as variações dos resultados encontrados para as direções radial e tangencial possuem pouca importância prática (MACKERLE, 2005; PFEIL; PFEIL, 2017). Dessa forma, é necessário determinar as propriedades, ao menos, para os sentidos longitudinal e transversal às fibras.

Conforme Vilela e Mascia (2021) e Carrasco *et al.* (2020), para análises elásticas na engenharia a madeira pode ser considerada como um material de características ortotrópicas. O estudo realizado por Mascia e Lahr (2006) corrobora com a afirmação identificando que o modelo ortotrópico linear foi capaz de prever o comportamento da madeira após ensaios utilizando a madeira de uma espécie folhosa.

Na falta de ensaios experimentais, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022) apresenta valores padronizados e equações para obtenção dos parâmetros ainda desconhecidos pelo engenheiro estrutural.

A Tabela 1 apresenta valores algumas das principais propriedades mecânicas padronizadas para madeiras oriundas de florestas nativas: resistência característica à compressão paralela às fibras ( $f_{c0,k}$ ), resistência característica ao cisalhamento ( $f_{v,k}$ ), módulo de elasticidade médio na compressão paralelo às fibras ( $E_{c0,m}$ ) e densidade a 12% de umidade ( $\rho_{12\%}$ ).

Tabela 1 - Propriedades padronizadas para espécies de florestas nativas

CLASSE	$f_{c0,k}$ (MPa)	$f_{v,k}$ (MPa)	$E_{c0,m}$ (MPa)	$\rho_{12\%}$ (kg/m <sup>3</sup> )
D20	20	4	10.000	500
D30	30	5	12.000	625
D40	40	6	14.500	750
D50	50	7	16.500	850
D60	60	8	19.500	1.000

Fonte: Adaptado da Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022).

Com as informações das propriedades padronizadas das madeiras, basta aplicar as equações apresentadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022) para obtenção das demais propriedades. As equações 3 até 8 apresentam as relações entre as propriedades mecânicas: resistência característica à compressão paralela e perpendicular às fibras ( $f_{c0,k}$  e  $f_{c90,k}$ , respectivamente), resistência

característica à tração paralela e perpendicular às fibras ( $f_{t0,k}$  e  $f_{t90,k}$ , respectivamente), resistência característica convencional da madeira obtida por meio de ensaio de flexão estática ( $f_{tM,k}$ ) e resistência característica ao embutimento paralelo e perpendicular às fibras ( $f_{e0,k}$  e  $f_{e90,k}$ , respectivamente).

$$\frac{f_{c0,k}}{f_{t0,k}} = 0,77 \quad \text{Eq. 3}$$

$$\frac{f_{tM,k}}{f_{t0,k}} = 1,00 \quad \text{Eq. 4}$$

$$\frac{f_{c90,k}}{f_{c0,k}} = 0,25 \quad \text{Eq. 5}$$

$$\frac{f_{e0,k}}{f_{c0,k}} = 1,00 \quad \text{Eq. 6}$$

$$\frac{f_{e90,k}}{f_{c0,k}} = 0,25 \quad \text{Eq. 7}$$

$$\frac{f_{t90,k}}{f_{t0,k}} = 0,05 \quad \text{Eq. 8}$$

A Equação 9 apresenta a correlação entre o módulo de elasticidade à compressão na direção perpendicular ( $E_{c90}$ ) e na direção paralela ( $E_{c0}$ ) às fibras. O módulo de cisalhamento médio ( $G_{med}$ ) é obtido pela Equação 10.

$$E_{c90} = \frac{E_{c0}}{20} \quad \text{Eq. 9}$$

$$G_{med} = \frac{E_{0,med}}{16} \quad \text{Eq. 10}$$

Onde  $E_{0,med}$  denota o módulo de elasticidade médio.

As correlações entre as propriedades físico-mecânicas apresentadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022) e as definições de propriedades padronizadas por classe de madeira permitem ao engenheiro estrutural elaborar o projeto de uma estrutura de madeira sem a necessidade de ensaios laboratoriais para determinação desses parâmetros (LAHR *et al.*, 2021). Entretanto, diversos autores se dedicaram a verificar se as correlações presentes no documento normativo brasileiro de estruturas de madeira são observadas experimentalmente.

Aquino *et al.* (2022) estudaram a influência da umidade da madeira em 15 propriedades físicas e mecânicas da espécie *Cedrella* sp. Para isso, foram feitos ensaios variando a umidade entre 12%, padrão normativo brasileiro, e o ponto de saturação das fibras. Os autores concluíram que 8 das propriedades avaliadas foram afetadas, porém as equações 1 e 2, presentes na Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022) desde sua versão anterior publicada no ano de 1997, não foram capazes de descrever com precisão as propriedades alteradas no ensaio.

Lahr *et al.* (2021) avaliaram a relação entre o cisalhamento paralelo às fibras com a compressão paralela às fibras de 72 espécies de madeira com o valor previsto no documento normativo e foi observado que a relação entre essas resistências deveria ser de 0,24 ao invés de 0,12.

Em outro estudo, Lahr *et al.* (2022) analisaram a representatividade do valor da resistência ao cisalhamento característico para a classe de resistência C60 previsto pelo documento normativo brasileiro e foi constatado que esse valor previsto é inferior ao observado nos ensaios em laboratório, onde foi obtido um valor 34,68% superior ao indicado no documento normativo.

A resistência à tração paralela às fibras foi estudada por Wolenski *et al.* (2019) que concluíram que a equação fornecida pelo documento normativo brasileiro retorna valores, em média, 14% superiores aos encontrados no estudo realizado.

## 2.2 MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM ESTRUTURAS DE MADEIRA

A madeira possui elevada durabilidade quando observados os procedimentos adequados para sua preservação, porém, em situações onde os procedimentos de preservação não forem realizados, por ser um material orgânico, está sujeita à biodeterioração pelo surgimento das manifestações patológicas (BOLINA; TUTIKIAN; HELENE, 2019; BRITO *et al.*, 2016; MACKERLE, 2005; MASCIA; SARTORTI, 2011; PFEIL; PFEIL, 2017). O surgimento das manifestações patológicas possui forte influência negativa no desempenho estrutural das estruturas de madeira, reduzindo seu ciclo de vida (BRITES *et al.*, 2013; MASCIA; SARTORTI, 2011).

Segundo Pfeil e Pfeil (2017), existem espécies de madeira com mais resistência aos ataques de agentes agressivos causadores das manifestações patológicas, porém a utilização de tratamentos químicos adequados garantem

proteção à estrutura. Os agentes agressivos que deterioram a madeira são classificados em dois tipos: agentes abióticos e bióticos (BOLINA; TUTIKIAN; HELENE, 2019; PFEIL; PFEIL, 2017).

Os agentes abióticos podem ser classificados como aqueles que não são organismos vivos, como a umidade, ação do fogo, variação cíclica de temperatura e intemperismo, dentre outros (BOLINA; TUTIKIAN; HELENE, 2019; MARTINS; FIORITI, 2016).

Para Mascia e Sartorti (2011) e Pfeil e Pfeil (2017), as condições ambientais as quais a madeira está sujeita são os principais fatores para a deterioração da estrutura. Algumas das manifestações patológicas apresentadas na literatura que foram causadas por agentes abióticos são: empenamentos, degradação fotoquímica, abrasão mecânica, contribuição para o processo de apodrecimento (GUEVARA; TOIRAC; MARISY, 2019; MASCIA; SARTORTI, 2011).

Guevara, Toirac e Marisy (2019) observaram o efeito deteriorante do excesso de umidade por longos períodos em estruturas de madeira e a contribuição dada ao processo de apodrecimento. Martins e Fioriti (2016) salientam que somente a umidade não é causa da podridão da madeira, porém proporciona a condição ideal para o surgimento de fungos e demais organismos xilófagos.

Bolina, Tutikian e Helene (2019) destacam a umidade como o fator mais crítico para madeira, favorecendo o surgimento de agentes bióticos e agravando a manifestação patológica, sendo responsável também pela modificação das dimensões da peça e diminuindo sua resistência mecânica, conforme já observado em outros estudos (AQUINO *et al.*, 2022; BRANCO *et al.*, 2014; NOGUEIRA *et al.*, 2018).

Martínez e Martínez (2022) observaram que a temperatura, a umidade e a insolação foram os principais agentes abióticos responsáveis pela deterioração de um complexo residencial construído em 1956 na Espanha.

Conforme descrito por Martins e Fioriti (2016), alguns defeitos naturais da madeira, como as fissuras, permitem o contato dos agentes deterioradores no interior do elemento estrutural, sendo de difícil constatação e favorecendo maiores danos à estrutura.

Reparos ineficientes, como os observados por Martins e Fioriti (2016), também têm potencial de deterioração da estrutura, contribuindo com a proliferação

dos agentes bióticos em regiões não tratadas, mantendo a situação que originou o dano inicial, além de comprometer a estética, tornando um ponto de fragilidade da estrutura.

Os agentes bióticos, ou agentes biológicos, são formados especialmente por microrganismos e insetos xilófagos, tendo como principais componentes os fungos e insetos (BOLINA; TUTIKIAN; HELENE, 2019; SOUZA; DEMENIGHI, 2017). Se denominam xilófagos os organismos que se alimentam da madeira, conforme Bolina, Tutikian e Helene (2019). A Figura 1 apresenta o ataque de insetos xilófagos em um elemento de madeira.

Figura 1 – Ataques de cupins na madeira



Fonte: Moreschi (2013).

Os agentes bióticos são os causadores do apodrecimento da madeira, sendo identificado pela perda de peso, redução da capacidade resistente e variação da coloração do elemento estrutural (MARTINS; FIORITI, 2016; MASCIA; SARTORTI, 2011).

A Figura 2 mostra elementos estruturais observados por Verbist, Matos e Branco (2019) apresentando apodrecimento, redução da seção transversal e mudança de coloração, comprometendo seu desempenho estrutural.

Figura 2 – Elementos de madeira deteriorados por fungos e insetos xilófagos



Fonte: Verbist, Matos e Branco (2019).

O ataque dos agentes bióticos pode ser realizado em grupo ou de forma isolada (MASCIA; SARTORTI, 2011). Alguns animais, como morcegos, favorecem a proliferação de fungos, bactérias e insetos que são atraídos por seus dejetos, causando, além do agravo no dano da estrutura, uma contaminação ambiental que pode afetar a saúde dos usuários (GUEVARA; TOIRAC; MARISY, 2019).

Diante dos estudos apresentados, pode-se observar que existem diversos mecanismos que podem danificar as estruturas de madeira, podendo ser causados por organismos vivos ou por condições ambientais. Entretanto, destaca-se que a realização do tratamento adequado da peça estrutural é capaz de garantir a elevada durabilidade que a madeira pode proporcionar.

Destaca-se que os efeitos gerados por condições ambientais, como a variação cíclica de temperatura e o excesso de umidade, causam danos físicos e, principalmente, contribuem para o surgimento de microrganismos e insetos xilófagos, sendo observados em diversas construções com estruturas de madeira.

### **2.3 RECUPERAÇÃO DE ESTRUTURAS DE MADEIRA**

Estruturas que, por diversos motivos, apresentem desempenho inferior ao necessário, devem ser objeto de avaliação para a definição da intervenção mais adequada para garantir o comportamento necessário para seu uso.

Segundo Bolina, Tutikian e Helene (2019) a intervenção em um elemento estrutural pode ser realizada por meio de diferentes abordagens, cuja definição é

condicionada a diversos fatores logísticos, técnicos, estéticos, dentre outros. Segundo os autores, existem diversas classificações para o processo de intervenção, sendo definida por meio das informações da construção e interesse final, como a recuperação, o reparo, a restauração, o reforço, dentre outros.

A recuperação estrutural foi definida por Lichtenstein (1985) como um conjunto de procedimentos para garantia de desempenho estrutural pré-estabelecido. Bolina, Tutikian e Helene (2019) salientam que o processo de recuperação de uma estrutura tem como objetivo a correção de anomalias estruturais e possui o reparo, reforço e restauro como subdivisões, conforme a finalidade. Desse modo, o termo recuperação se apresenta como uma denominação abrangente para intervenções estruturais.

O reparo consiste na ação localizada em um elemento estrutural com principal objetivo de devolver a capacidade estrutural desse elemento (BOLINA; TUTIKIAN; HELENE, 2019; DALFRÉ, 2022; LICHTENSTEIN, 1985).

A restauração possui um objetivo similar ao reparo, porém este termo possui uma aplicação específica para construções em que se deseja destacar a concepção histórica original, com principal aplicação em patrimônios históricos (BOLINA; TUTIKIAN; HELENE, 2019; LICHTENSTEIN, 1985). Miotto e Dias (2006) destacam que a restauração estrutural consiste em recuperar a forma e aparência dos materiais. Bolina, Tutikian e Helene (2019) salientam que devem ser adotados materiais que destacam as peças originais preservadas.

O reforço é definido como ação que visa garantir o aumento da capacidade resistente de um elemento estrutural, em comparação ao que foi projetado, para adequar a estrutura às solicitações (BOLINA; TUTIKIAN; HELENE, 2019; DALFRÉ, 2022; LICHTENSTEIN, 1985).

Conforme Miotto e Dias (2006) e Valle, Pereira e Nappi (2013), a recuperação de estruturas de madeira pode ser realizada por meio de três métodos principais: a substituição total do elemento, a substituição parcial e a instalação de elementos adicionais junto à estrutura.

A substituição total consiste na retirada do elemento estrutural danificado e a instalação de um novo elemento no local, enquanto a parcial se caracteriza por uma intervenção localizada na região danificada do elemento, preservando as partes consideradas adequadas para o uso (VALLE; PEREIRA; NAPPI, 2013).

Segundo Miotto e Dias (2006), a substituição total de elementos de madeiras em construções antigas enfrenta alguns desafios, em especial o custo elevado, as limitações logísticas devido ao fato de alguns elementos apresentarem grandes dimensões e a possibilidade da espécie original da madeira não estar mais disponível.

Para Valle, Pereira e Nappi (2013), em uma situação de substituição total ou parcial em estruturas de madeira convencionais, outros materiais também podem ser adotados como aço, concreto armado, materiais compósitos poliméricos, madeira engenheirada, dentre outros, sendo os materiais mais comumente adotados o aço e a madeira.

Em especial para o caso da substituição parcial, a ligação entre o novo elemento com a estrutura existente requer atenção para que a recuperação garanta o comportamento estrutural esperado (VALLE; PEREIRA; NAPPI, 2013). Nesses casos, a utilização de diferentes materiais pode impactar negativamente na ductilidade do elemento na região da descontinuidade (PARISI; PIAZZA, 2007).

Entretanto, conforme Parisi e Piazza (2007), a substituição de elementos de madeira danificados pode ser adotada em situações onde não há o interesse artístico na superfície do elemento. Para o caso de estruturas de madeira de patrimônios históricos, onde a estética de todos os elementos presentes no ambiente é importante para a manutenção da história do local, são recomendados procedimentos considerados menos invasivos (COLI; IWASAKI, 2021; PARISI; PIAZZA, 2007).

Desse modo, a escolha pela utilização de elementos, como chapas ou placas, fixados às estruturas danificadas nas regiões deterioradas se apresentam como uma solução, sendo comumente utilizados materiais como aço, polímeros reforçados com fibras (FRP - *fiber-reinforced polymer*) ou madeira (VALLE; PEREIRA; NAPPI, 2013).

Segundo Miotto e Dias (2006), a utilização de FRP de tecidos naturais e sintéticos se mostra eficiente para a complementação da resistência à flexão em vigas de madeira, porém o ganho de rigidez é modesto.

Para Souza, Araújo e França (2016), a utilização de elementos de aço para recuperação de elementos estruturais em madeira pode proporcionar um considerável aumento de resistência com um pequeno acréscimo de massa, destacando-se pela facilidade executiva. Essa afirmação é corroborada por Negrão (2020) ao salientar a possível redução de custos obtidos por, dentre outros motivos, a abreviação do tempo de execução ao se comparar com outras técnicas.

A utilização da chapas de aço possui outras vantagens como a possibilidade de reversão do procedimento, porém este material requer atenção especial quanto ao isolamento contra umidade (VALLE; PEREIRA; NAPPI, 2013).

## 2.4 PATRIMÔNIO HISTÓRICO CULTURAL

As construções históricas constituem a “[...] representação física de parte da história de suas comunidades e, por vezes, evidenciam, além da vida cotidiana das comunidades passadas, os avanços no desenvolvimento da história da humanidade.” (MESQUITA, 2019, p. 65)

A definição de patrimônio, segundo Grammont (2006), sofreu diversas variações em seu significado com o passar do tempo, estando até hoje em constante atualização. A definição até o século XIX considerava o conjunto de construções, documentos e objetos que possuem valor artístico ou histórico. No século XX foram incorporados novos conceitos e valores, analisando também o seu entorno. De acordo com Ferreira, Ferreira e Rosário (2020), a palavra “cultura” utilizada no patrimônio cultural denota e evidencia as características sociais atribuídas aos espaços ocupados pela comunidade da época e a palavra “patrimônio” remete tanto aos objetos e materiais designados como patrimônio, quanto aos costumes e expressões da sociedade que estão intrínsecas e preservadas no bem.

Conforme Mesquita (2019), a classificação do patrimônio pode ser realizada em diferentes instâncias: municipais, estaduais, federais e, inclusive a nível internacional pela UNESCO (*United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*).

As construções históricas compõe o cenário urbano de suas regiões, destacando a arquitetura original da época em que foi construída (PAULA; FARIA, 2021). Desse modo, deve ser objeto de preocupação social e política. Entretanto, conforme destacado por Piedade *et al.* (2018), por mais que existam políticas públicas voltadas à manutenção das construções históricas, por vezes essas políticas se mostram ineficientes e não conseguem garantir a preservação devida.

A falta da manutenção adequada pode ocasionar sinistros em construções históricas como o incêndio na Catedral de *Nôtre Dame*, na França, em 2019, e no Museu Nacional do Brasil em 2018, por exemplo, causando prejuízos que podem ser

bilionários e, principalmente, a perda da história e significado cultural que estavam eternizados nos materiais que foram perdidos (FERREIRA; FERREIRA; ROSÁRIO, 2020).

Conforme observado na literatura, não é incomum que construções históricas tenham sua manutenção e preservação negligenciada, tornando-as vulneráveis à deterioração acelerada (CHORLTON; GALES, 2019).

A preservação do patrimônio deve ser feita de modo a não descaracterizar a construção, devendo ser levado em consideração as características estéticas, sociais e históricas, mantendo sua identidade (ABREU *et al.*, 2013; ANDREACCI; MELO JUNIOR, 2011). O processo de restauração deve ser elaborado e executado mediante uma análise completa, sistemática e científica da construção para reconhecimento das características e estado de conservação de cada material (ANDREACCI; MELO JUNIOR, 2011; BLANCHETTE *et al.*, 2021; HAN; CHUN; WANG, 2022).

Destaca-se que a preservação garante que o patrimônio contribua, inclusive, no cenário econômico da região incentivando o turismo (CHOIDIS *et al.*, 2021; MESQUITA, 2019; PAULA; FARIA, 2021). Entretanto, Ferreira, Ferreira e Rosário (2020) salientam que a preservação do patrimônio histórico cultural não deve ser considerada tão somente para possibilitar a exploração comercial e turística, mas sim para garantir que a cultura da sociedade da época seja preservada possibilitando reflexões sobre a constituição da civilização local.

## 2.5 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O método dos elementos finitos (MEF) surge, junto de outros métodos numéricos, como um método aproximado de análise de soluções para modelos contínuos que não possuem solução analítica ou, quando possuem, é operacionalmente inviável (SORIANO, 2009). Segundo Tankut, Tankut e Zor (2014), o MEF é amplamente utilizado em análises de estruturas, sendo adotado para subdividir um modelo complexo e inviável de se analisar analiticamente em um número finito de elementos (subdomínios) mais simples geometricamente e sem sobreposição entre si. Conforme Soriano (2009), o método dos elementos finitos é o método de simulação numérica mais utilizado dentro da mecânica do contínuo.

Para cada subdomínio, tem-se uma matriz de rigidez  $K$ . Conforme Bittencourt (2010), a matriz  $K$  é determinada em função das propriedades geométricas e características do material do sólido analisado. Conforme Alves Filho (2013), com a definição da matriz de rigidez (nodal ou global), determina-se a relação força-deslocamento do elemento.

As condições de contorno se referem às solicitações e restrições de deslocamento e rotação externas em que o sólido está submetido. Mediante as condições de contorno, as equações do sistema podem ser resolvidas para os deslocamentos nodais e obtenção das tensões e as forças internas em cada elemento (ZIENKIEWICZ; TAYLOR, 2000).

A variável primária são os deslocamentos nodais obtidos da solução de um sistema de equações de equilíbrio (Equação 11). Conhecidos os deslocamentos nodais ( $u$ ), as deformações e tensões são interpoladas entre os elementos finitos, onde  $K$  denota a matriz de rigidez e  $F$  o vetor das forças nodais (CAMPILHO, 2012; CHRISTOFORO; LIBARDI, 2019). Com isso, calculam-se as tensões principais e avalia-se por meio de critérios de falha o dano na estrutura.(CHRISTOFORO; LIBARDI, 2019).

$$\{F\} = [K] \cdot \{u\} \quad \text{Eq. 11}$$

O sólido analisado é discretizado e passa a ser composto por um conjunto de elementos finitos para descrever seu comportamento. Desse modo, A Equação 11 é aplicada em todos os elementos, compondo uma formulação global do sólido analisado, inviável de ser resolvida analiticamente (ALVES FILHO, 2013; CHRISTOFORO; LIBARDI, 2019). Os elementos básicos utilizados no método dos elementos finitos são divididos em unidimensionais, bidimensionais e tridimensionais (CAMPILHO, 2012; SORIANO, 2009). Os elementos unidimensionais (Figura 3) são compostos por elementos de barras, vigas e pórticos. Os elementos de barras são restritos à esforços axiais, de compressão e tração, enquanto os elementos de viga permitem a aplicação de esforços de cisalhamento e momento fletor e os de pórtico admitem ambas situações (CAMPILHO, 2012). Desse modo, a diferença entre esses elementos se dá pelos graus de liberdade.

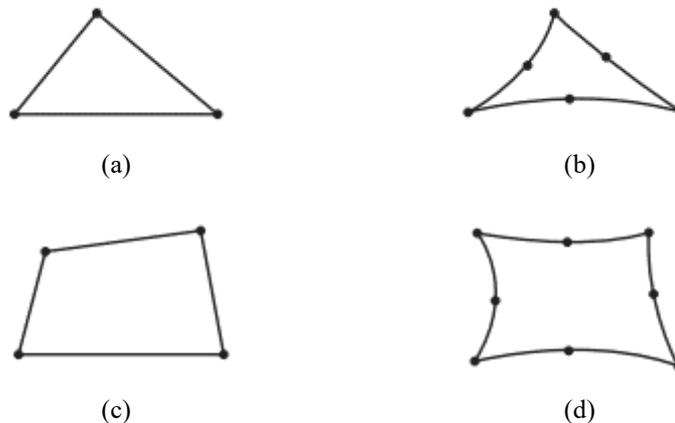
Figura 3 – Elementos unidirecionais com dois nós (a) e três nós (b)



Fonte: Dassault Systèmes Simulia (2011)

Os elementos bidimensionais (Figura 4) são compostos por elementos: triangulares e quadrilaterais. O elemento triangular linear possui três pontos nodais e seis variáveis nodais, sendo considerado por Soriano (2009) o mais versátil, apesar da necessidade de grande refinamento (CAMPILHO, 2012). O elemento quadrilateral possui fácil aplicação em situações onde são necessária formas variadas (SORIANO, 2009).

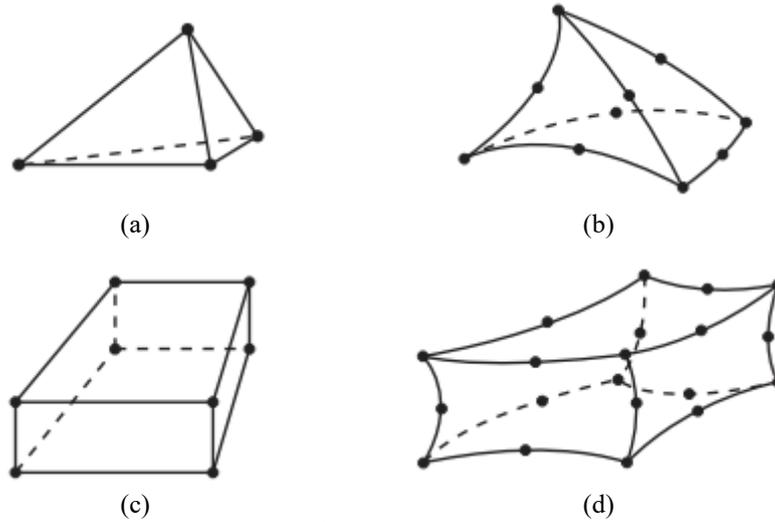
Figura 4 – Elementos bidirecionais triangulares com três nós (a) e seis nós (b) e quadrilaterais com quatro nós (c) e oito nós (d)



Fonte: Dassault Systèmes Simulia (2011)

Os elementos tridimensionais (Figura 5) são compostos por elementos: tetraédricos e hexaédricos. O elemento tetraédrico é considerado por Soriano (2009) como o de mais simples formulação dentre os sólidos, possuindo quatro pontos nodais. O elemento hexaédrico consiste em uma geometria cúbica com oito pontos nodais

Figura 5 – Elementos tridimensionais hexaédricos com quatro nós (a) e dez nós (b) e hexaédricos com oito nós (c) e vinte nós (d)



Fonte: Dassault Systèmes Simulia (2011)

As simulações pelo método dos elementos finitos podem ser realizadas considerando apenas o comportamento linear elástico do sólido ou a consideração do comportamento não-linear físico e geométrico do mesmo. A análise linear é adotada em situações onde são previstas pequenas deformações e deslocamentos da estrutura como, por exemplo, em análise de estruturas durante sua utilização (CASCIATI; DOMANESCHI, 2007).

Entretanto, para análise de materiais dúcteis, se faz necessária a consideração da não-linearidade do mesmo para que seja possível a previsão de seu comportamento adequado (ALVES FILHO, 2012). O comportamento não-linear está associado a duas grandezas: físicas (relação constitutiva não-linear) e geométricas (grandes deslocamentos).

### **3 REVISÃO DA LITERATURA**

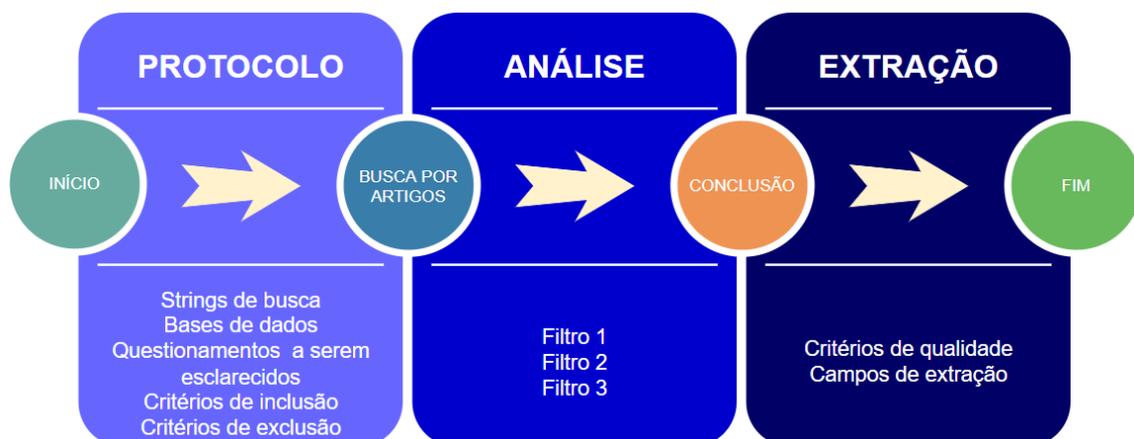
### 3 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo tem o objetivo de apresentar revisões da literatura científica que contribuem para a formulação do método de pesquisa e ilustram o estado da arte do assunto de interesse. Para isso, foram conduzidas duas revisões sistemáticas da literatura sobre os temas: recuperação de estruturas de madeira em patrimônios históricos e simulação de vigas de madeira pelo método dos elementos finitos.

Os artigos coletados foram analisados e selecionados por meio do *software* StArt (*Stade of the Art Through Systematic Review*), desenvolvido pelo Laboratório de Pesquisa em Engenharia de *Software* (LaPES) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).

Foi estabelecida uma estrutura geral de pesquisa visando uniformizar os procedimentos adotados nas duas revisões. Desse modo, foram definidas três etapas para a realização do estudo: elaboração do protocolo da pesquisa, análise dos artigos coletados e extração dos dados de interesse. A Figura 6 ilustra a estrutura adotada para as revisões.

Figura 6 – Estrutura geral das revisões sistemáticas



Fonte: Autor (2022).

O protocolo de pesquisa foi elaborado para permitir e otimizar a busca de artigos, sendo definidos os termos de busca e suas combinações utilizando operadores booleanos (sendo chamados de *strings*).

As bases de dados para busca foram inicialmente definidas como as mesmas em ambas revisões. Entretanto, ao executar as buscas da segunda revisão, uma das

plataformas ficou inativa por um longo período, inviabilizando seu uso. Desse modo, foi optado por alterar uma das bases de dados na segunda revisão. Considerando o exposto, as bases de dados da primeira revisão foram: *Engineering Village*, *Science Direct* e *Web of Science*. As bases de dados da segunda revisão foram: *Scopus*, *Science Direct* e *Web of Science*.

Foram elaboradas perguntas de pesquisa referentes ao objetivo da revisão para nortear a análise dos artigos e extração de dados, bem como critérios de inclusão e exclusão dos trabalhos.

A etapa de análise foi realizada no *software* StArt e consistiu em identificar os artigos que respondessem as perguntas elaboradas e contribuíssem com a proposta da revisão. Inicialmente, os artigos encontrados em mais de uma base tiveram suas respectivas duplicatas excluídas. Após, os trabalhos foram analisados por meio de três filtros: seleção, elegibilidade e inclusão.

No filtro de seleção, os títulos, palavras-chave e resumos dos artigos extraídos das buscas foram lidos com intuito de identificar os artigos que claramente não versam sobre o objeto da revisão. Os artigos que apresentaram indícios de dados de interesse passaram para o próximo filtro e os demais foram excluídos.

No filtro de elegibilidade foi realizada a leitura da introdução e conclusão dos artigos que foram incluídos pelo filtro de seleção. O intuito foi compreender o contexto e objetivo dos estudos, bem como suas contribuições. Os estudos que não estavam aderentes à proposta da revisão foram excluídos, de forma análoga ao realizado no filtro de seleção, e os demais foram encaminhados para o último filtro.

No filtro de inclusão os artigos foram lidos integralmente, sendo classificados uma última vez quanto aos critérios de inclusão e exclusão. Ao término da leitura, os artigos incluídos foram utilizados para extração dos dados de interesse. A extração ocorreu em duas etapas: a primeira consistiu em agrupar os artigos por critério de qualidade dos dados em relação ao objetivo da revisão e a segunda consistiu na coleta dos dados de interesse para discussão.

### 3.1 RECUPERAÇÃO DE ESTRUTURAS DE MADEIRA EM PATRIMÔNIOS HISTÓRICOS

A presente revisão sistemática foi realizada em setembro de 2022 e teve como objetivo identificar estudos que tratam da recuperação de estruturas de madeira em patrimônios históricos, com principal interesse na melhoria do desempenho estrutural dessas construções. Para isso, foram elaboradas perguntas norteadoras apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 – Perguntas norteadoras da revisão sistemática sobre a recuperação de estruturas de madeira em patrimônios históricos

Pergunta	Descrição
P1	Qual tipo de reforço mais comum?
P2	Qual o ano da construção?
P3	Onde as construções ficam localizadas?
P4	Quais as principais manifestações patológicas encontradas?
P5	Qual material utilizado como elemento de reforço?
P6	Quais as espécies de madeira foram encontradas?
P7	O reforço é utilizado na zona comprimida ou tracionada?
P8	Que tipo de elemento estrutural foi recuperado?

Fonte: Autor (2022).

Foram definidos três termos de busca: “madeira”, “patrimônio” e “recuperação”. Esses termos foram pesquisados por seus equivalentes em inglês e sinônimos, conforme apresentado no Quadro 2.

Quadro 2 – Termos de busca da revisão sistemática sobre a recuperação de estruturas de madeira em patrimônios históricos

Termo em Português	Termo em inglês	Sinônimo/equivalente
Madeira	<i>Timber</i>	<i>Wood</i>
Patrimônio	<i>Heritage</i>	-
Recuperação	<i>Recovery</i>	<i>Restoration Reinforcement Strengthening</i>

Fonte: Autor (2022).

O primeiro termo foi definido para direcionar as buscas ao material estrutural de interesse da revisão. O segundo termo foi definido apenas por uma palavra devido à grande variedade de possibilidades de termos que envolvem o patrimônio histórico, como “patrimônio cultural”, “patrimônio construído”, “patrimônio histórico cultural”, dentre outros, porém o termo em inglês “heritage” está sempre presente e adota-lo

visou garantir a inclusão da maior quantidade de artigos aplicados ao patrimônio histórico possível. O terceiro termo foi escolhido para destacar os trabalhos que realizam uma intervenção estrutural com objetivo de garantir seu desempenho. Desse modo, ao aplicar os operadores booleanos, a strings de busca utilizada foi:

- (timber OR wood) AND (heritage) AND (recovery OR restoration OR reinforcement OR strengthening).

Como critério de inclusão, foi estabelecido que seriam aceitos os artigos que analisassem a recuperação de elementos estruturais de madeira em patrimônios históricos.

Como critérios de exclusão, não serão aceitos os artigos que: estivessem fora de escopo e não estivessem disponíveis nas bases consultadas para leitura completa. Devido aos poucos estudos disponíveis sobre o tema, foi optado por não prever critérios adicionais de exclusão como ano de publicação, quantidade de citações, dentre outros.

Foram estabelecidos oito critérios de qualidade, apresentados no Quadro 3. Por fim, foram definidos os campos de extração no formato adotado pelo *software* StArt, conforme apresentado no Quadro 4.

Quadro 3 – Critérios de qualidade da revisão sistemática sobre a recuperação de estruturas de madeira em patrimônios históricos

<b>Critério</b>	<b>Descrição</b>
Q1	O artigo apresenta detalhes do estado de conservação da madeira?
Q2	O artigo informa qual o ano da construção?
Q3	O artigo informa a localidade da construção?
Q4	São apresentadas as manifestações patológicas?
Q5	Existem relatos de manutenção na estrutura?
Q6	As espécies de madeira são informadas?
Q7	Foram apresentados detalhes quanto ao tipo do reforço?
Q8	Foi realizada uma comparação da estrutura recuperada com o estado inicial?

Fonte: Autor (2022).

Quadro 4 – Campos de extração da revisão sistemática sobre a recuperação de estruturas de madeira em patrimônios históricos

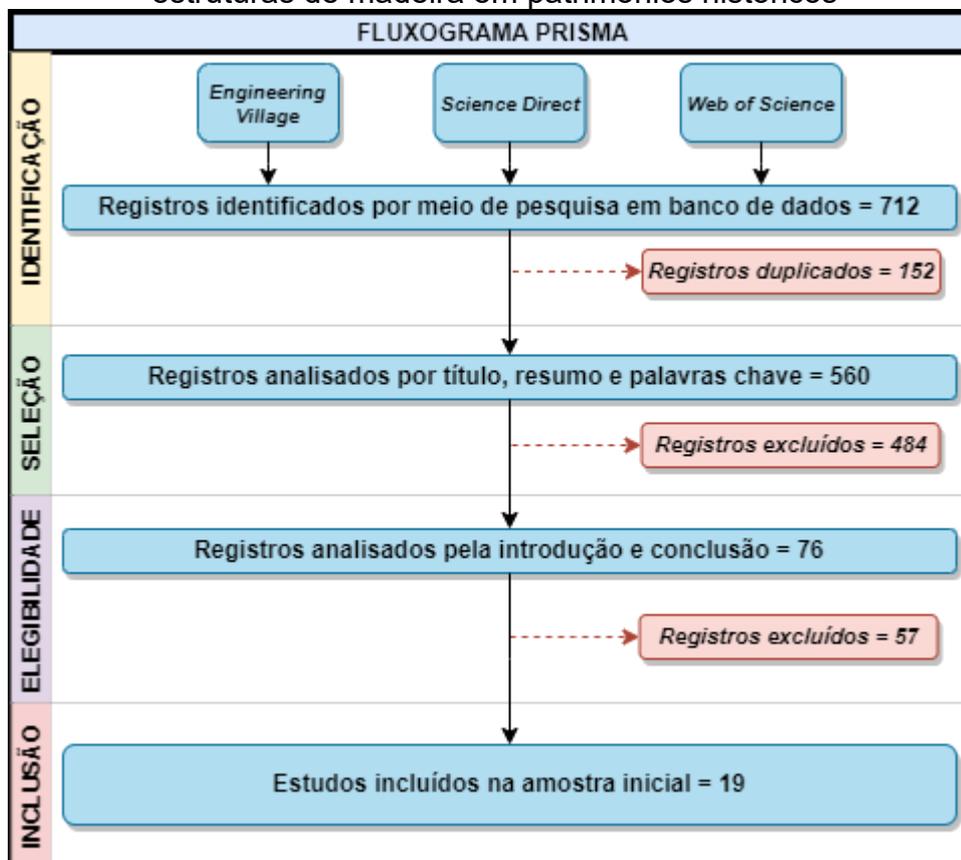
Campo	Tipo <sup>1</sup>	Conteúdo
Ano da construção	<i>Text</i>	
Localização da construção	<i>Text</i>	
Manifestações patológicas	<i>Text</i>	
Espécies de madeira	<i>Text</i>	
Elemento reforçado	<i>Pick Many List</i>	[Pilar,Viga,Laje,Cobertura]
Tipo de reforço	<i>Pick on list</i>	{Substituição total,Substituição parcial,instalação de elementos adicionais}
Material usado no reforço	<i>Text</i>	
Região do reforço	<i>Pick one list</i>	{Tração,Compressão,Ambos,Não informado}

Nota 1: *Pick on list* = escolha um na lista; *Pick on Many* = Escolha em vários; *Text* = campo texto aberto.

Fonte: Autor (2022).

A Figura 7 apresenta o fluxograma PRISMA obtido após análise e filtragem dos artigos. Foram obtidos 712 artigos nas bases de dados consultados, sendo aproximadamente 2,7% desses selecionados para a etapa de inclusão. Ao desconsiderar os registros duplicados, o percentual de artigos selecionados para a etapa de inclusão foi de aproximadamente 3,4%.

Figura 7 – Fluxograma PRISMA da revisão sistemática sobre a recuperação de estruturas de madeira em patrimônios históricos



Fonte: Autor (2022).

Em grande parte, os artigos não incluídos na amostra tiveram seu objetivo no diagnóstico e inspeção das manifestações patológicas e não discorreram sobre a recuperação da capacidade estrutural e a utilização de elementos de reforço, se referenciando ao reforço como etapa posterior ao trabalho apresentado no respectivo artigo. Outros analisaram materiais diferentes da madeira ou não versaram especificamente sobre construções históricas. O Quadro 5 apresenta os artigos incluídos na amostra com as informações principais. A Figura 8 apresenta distribuição dos artigos conforme o ano de publicação.

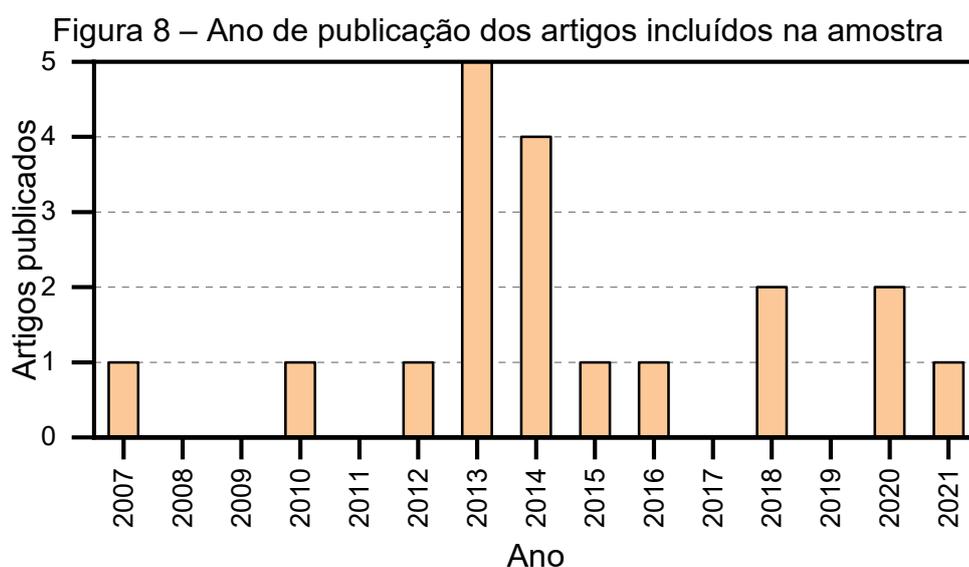
Quadro 5 – Artigos selecionados na revisão sistemática sobre a recuperação de estruturas de madeira em patrimônios históricos

Nome do periódico / Evento	Título do artigo	Autores	Ano de publicação
<i>Advanced Materials Research</i>	<i>Problems relating to assessment, repair and restoration of wooden roof structures in historic buildings, as exemplified by two case studies in southern Poland</i>	Bajno, Dariusz; Bednarz, Łukasz; e Nowak, Tomasz	2013
<i>Advanced Materials Research</i>	<i>Restoration of structural timber elements using epoxy resin: Analysis of mechanical properties</i>	Bertolini, Marília da Silva; Macedo, Laurenn Borges de; Almeida, Diego Henrique de; Icimoto, Felipe Hideyoshi; e Lahr, Francisco Antônio Rocco	2013
<i>International Journal of Architectural Heritage</i>	<i>Methodology of restoration of historical timber roof frames. Application to traditional spanish structural carpentry</i>	Candelas-Gutiérrez, Angel; e Borrallo-Jimenez, Milagrosa	2020
<i>The Civil Engineering Journal</i>	<i>Rehabilitation of historic half-timbered walls with composite materials based on high-strength</i>	Čejka, Tomáš; Kroftová, Klára; Šmidtová, Markéta; e Zigler, Radek	2015
<i>Meccanica</i>	<i>The reinforcement of ancient timber-joints with carbonano-composites</i>	Cestari, Clara Bertolini; Invernizzi, Stefano; Marzi, Tanja; e Tulliani, Jean-Marc	2013
<i>Procedia Structural Integrity</i>	<i>Seismic structural upgrade of historical buildings through wooden deckings strengthening: The case of study of Palazzo Ducale in Parete, Italy</i>	Frunzio, Giorgio; e Di Gennaro, Luciana	2018
<i>Structures</i>	<i>Experimental and numerical analysis of compression and bending strength of old wood reinforced with CFRP strips</i>	Işleyen, Ümmü Karagöz; e Kesik, Hacı İsmail	2021
<i>Construction and Building Materials</i>	<i>Solid timber beams strengthened with steel plates - Experimental studies</i>	Jasieńko, Jerzy; e Nowak, Tomasz P.	2014
<i>11th World Conference on Timber Engineering 2010</i>	<i>Numerical analysis of CFRP-reinforced wooden beams under bending</i>	Jasieńko, Jerzy; Nowak, Tomasz; e Czepizak, Dariusz	2010

Continuação...

<i>Advances in Structural Engineering</i>	<i>Axial compression behaviour of retrofitted long timber columns</i>	Li, Hongmin; Qiu, Hongxing; Zhao, Zhe; e Lu, Yong	2018
<i>Construction and Building Materials</i>	<i>A study on wood beams strengthened by FRP composite materials</i>	Li, Yeou Fong; Tsai, Ming Jer; Wei, Ting Fang; e Wang, Wei Chou	2014
<i>Wood Research</i>	<i>Experimental investigation on mechanical properties of old wood members reinforced with FRP composite</i>	Motlagh, Batebi; Gholipour, Yaghob; e Ebrahimi, G. H.	2012
<i>Construction and Building Materials</i>	<i>Experimental tests and numerical analysis of historic bent timber elements reinforced with CFRP strips</i>	Nowak, Tomasz P.; Jasieńko, Jerzy; e Czepizak, Dariusz	2013
<i>Practice Periodical on Structural Design and Construction</i>	<i>Restoration and Strengthening of Timber Structures: Principles, Criteria, and Examples</i>	Parisi, Maria A.; e Piazza, Maurizio	2007
<i>Construction and Building Materials</i>	<i>Assessment and retrofitting solutions for an historical wooden pavilion in China</i>	Qiao, Guanfeng; Li, Tieying; e Frank Chen, Y.	2016
<i>International Journal of Architectural Heritage</i>	<i>Refurbishment of a traditional timber floor with a reversible technique: Importance of the investigation campaign for design and control of the intervention</i>	Riggio, Mariapaola; Tomasi, Roberto; e Piazza, Maurizio	2014
<i>Materials</i>	<i>Natural fibre as reinforcement for vintage wood</i>	Wdowiak-Postulak, Agnieszka	2020
<i>Advanced Materials Research</i>	<i>Review of timber structure reinforcement research for the Huizhou ancient architecture</i>	Xiong, Xue Yu; e Su, Zhao Yang	2014
<i>Advanced Materials Research</i>	<i>A study on timber structural elements of a traditional turkish house</i>	Yilmaz Karaman, Ozgul; e Tanac Zeren, Mine	2013

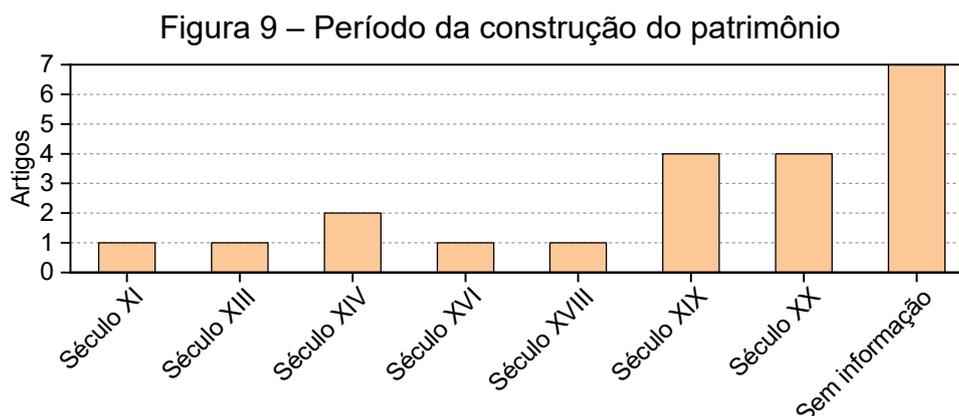
Fonte: Autor (2022).



Fonte: Autor (2022).

Destaca-se que os artigos encontrados foram publicados dentro dos últimos quinze anos, com poucos estudos publicados em cada ano. Os anos de 2013 e 2014 concentraram a maior quantidade de artigos publicados, correspondendo 47,4% da amostra. Observa-se que o tema não é vastamente abordado pela literatura científica.

A Figura 9 apresenta o período de construção do patrimônio estudado nos artigos apresentados no Quadro 5. Destaca-se que 37% dos estudos não dataram a construção analisada. Os séculos XIX e XX concentram a maior quantidade de construções, perfazendo mais de 42% do total. A construção mais antiga incluída na amostra é do Século XI e foi abordada por Frunzio e Di Genaro (2018). Trata-se de uma construção italiana, país com uma legislação abrangente para preservação do patrimônio histórico (PARISI; PIAZZA, 2007).



Fonte: Autor (2022).

Foi dado destaque aos relatos de manifestações patológicas encontradas na amostra através de uma nuvem de palavras (Figura 10). É nítida a grande presença da biodeterioração causada por ataques de agentes xilófagos, sendo observada em todos os artigos que trouxeram relatos do estado da madeira estudada. Assim como esse tema, a alteração da coloração, corrosão e apodrecimento costumam ocorrer na presença de umidade excessiva, também observada na amostra. Problemas com deformações excessivas, fissuração e rachaduras também são observados.

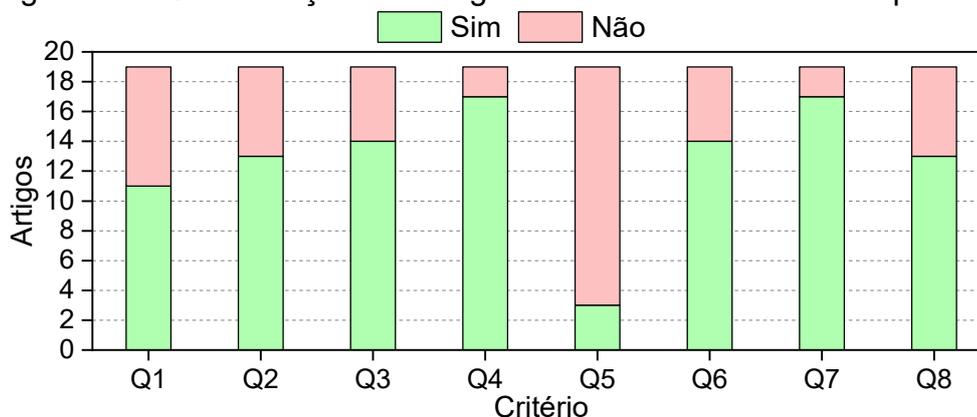
Figura 10 – Nuvem de palavras das manifestações patológicas encontradas na amostra



Fonte: Autor (2022).

Nem todos os artigos selecionados atenderam todos os critérios de qualidade, presentes no Quadro 3. São ilustrados na Figura 11 os critérios que foram atendidos e os que não foram em sua totalidade.

Figura 11 – Classificação dos artigos conforme os critérios de qualidade



Fonte: Autor (2022).

Conforme apresentado na Figura 11, nenhum critério de qualidade esteve presente em 100%, sendo o Q4, referente à apresentação das manifestações patológicas, o mais frequente. Entretanto, sete dos oito critérios estipulados foram atendidos por mais da metade dos artigos. O critério Q5, referente aos relatos de manutenção da estrutura, foi o critério atendido pela menor quantidade de estudos encontrados.

Aproximadamente 74% dos artigos trouxeram informações sobre a localidade do patrimônio analisado (critério Q3), sendo todos encontrados nos continentes

européu e asiático, não havendo nenhum estudo aplicado nas Américas, África e Oceania. Os países com maior número de construções estudadas são a Itália e a China, com 5 e 4 patrimônios históricos reforçados, respectivamente. Cinco artigos não informaram a localidade da construção.

Em síntese, os artigos encontrados podem ser genericamente agrupados em estudos práticos observacionais que analisam intervenções realizadas antes da pesquisa, estudos com propostas e aplicações de reforços em patrimônios históricos, e estudos experimentais com análises laboratoriais e numéricas. Quanto ao reforço utilizado, foram encontradas soluções com utilização de materiais compósitos e aço sendo utilizados como reforço localizado, bem como substituições parciais e, em poucos casos, substituição total.

Um estudo abrangente e orientativo sobre o tema foi desenvolvido por Parisi e Piazza (2007) onde foram apresentados diversos aspectos normativos e alternativas usuais de reforço em construções históricas com estruturas de madeira. Os autores realizaram suas análises utilizando próteses de madeira para substituição parcial de partes mais degradadas e a instalação de barras de aço e parafusos para recuperação de partes que fossem possíveis de se recuperar. Nas construções estudadas, foi verificado que haviam intervenções anteriores, porém a fonte de degradação inicial da estrutura não foi removida por completo, resultando em um agravamento da deterioração da estrutura em um longo prazo e na maior dificuldade em reparos futuros. Para possibilitar o reforço assertivo da estrutura, foram realizados ensaios para conhecimento das propriedades da madeira e a análise estrutural foi feita por meio do método dos elementos finitos.

Karaman e Zeren (2013) analisaram a recuperação de uma construção histórica com estrutura de madeira *Pinus* por meio de ensaios destrutivos em elementos previamente substituídos da construção original. A estrutura original do patrimônio, bem como os novos elementos usados para substituir as partes deterioradas, não foi analisada por profissionais habilitados à época da intervenção. A estrutura danificada apresentava diversas manifestações patológicas, como a biodeterioração por ataque de agentes xilófagos, mudança de coloração por umidade e fendilhamento.

Os ensaios foram realizados extraíndo corpos de prova da região central das peças, o que exclui diversos defeitos presentes nas amostras da população analisada.

Os autores constataram que as peças retiradas da estrutura original apresentaram resistência à compressão e à flexão superiores às novas. Desse modo, observou-se que possivelmente haveria maior benefício para a recuperação da estrutura se a empresa executora removesse a região deteriorada dos elementos e adicionasse outros materiais para complementar a capacidade portante, mediante avaliação de cada caso.

Esse estudo torna evidente a importância e necessidade de avaliação preliminar da construção antes de uma intervenção. Destaca-se a perda de valor patrimonial pela substituição das peças e a possibilidade de ineficiência estrutural, não abordada no artigo.

A madeira deteriorada possui grande variação de propriedades e mudanças geométricas abruptas, dificultando a análise de intervenção e uniformização da solução. Desse modo, é importante destacar que o planejamento da recuperação estrutural não deve ser feito de forma global, devendo ser considerada as características específicas de cada elemento (RIGGIO; TOMASI; PIAZZA, 2014).

Conforme demonstrado por Parisi e Piazza (2007) e Karaman e Zeren (2013), a madeira sem a devida manutenção está sujeita à biodeterioração, sendo observado esse fenômeno em todos os artigos analisados nessa revisão. O fator gerador mais comum, como já destacado no capítulo 2.2, é o ataque de insetos e fungos xilófagos, comumente associados ao excesso de umidade. Apesar de outras manifestações patológicas serem descritas, é notória a relevância do ataque biológico como causa importante da deterioração da estrutura, ocasionando diversos problemas estruturais. Desse modo, é imperativa a realização da devida investigação para determinação da solução mais assertiva para a estrutura.

A ação de agentes xilófagos, reduzindo a seção de elementos de madeira foi observada com maior detalhe por Candelas-Gutiérrez e Borrallo-Jimenez (2020). A perda de seção transversal causou deformação excessiva em trechos de vigas de uma cobertura em uma igreja na Espanha. Segundo os autores, pode-se inclusive ocasionar rótulas nas regiões mais afetadas, alterando drasticamente a configuração estática da estrutura, sendo observado um efeito similar em uma viga com 50% de sua seção transversal comprometida.

Na ocasião avaliada por Candelas-Gutiérrez e Borrallo-Jimenez (2020), foi utilizada uma metodologia multidisciplinar para avaliar a possibilidade de restauração

da estrutura. Foram realizadas simulações numéricas da estrutura considerando-a em diversas situações: íntegra, com perda de seção sem reforço e com perda de seção com reforço. Como solução, as regiões mais degradadas foram substituídas e uma estrutura adicional foi instalada para suporte dos carregamentos em locais críticos. Desse modo, mesmo com a alta degradação, foi possível garantir o comportamento adequado da estrutura.

Os autores ressaltaram que as propriedades físicas e mecânicas apresentadas pelo documento normativo europeu (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2008) são consideravelmente inferiores ao observados na construção, pois a madeira deveria apresentar fissuras características de flexão em razão de seu estado de conservação.

A substituição total de elementos degradados foi analisada por Riggio, Tomasi e Piazza (2014), que trocaram tábuas de *Pinus sylvestris L.* utilizadas em um piso de uma construção histórica. A estrutura de suporte do piso permaneceu inalterada, surgindo uma interface crítica entre a madeira nova e antiga. Foram empregados pregos cruzados como elemento de conexão mecânica, aumentando a rigidez à flexão em até quatro vezes, tornando nítida a importância do estudo da ligação entre os materiais recuperados.

Jasieńko e Nowak (2014) entendem como erro a substituição total de elementos de madeira em construções históricas quando necessária a recuperação da estrutura, incentivando a adoção de elementos adicionais para melhoria do desempenho mecânico e manutenção da madeira original e seu significado histórico e cultural.

O estudo de Bajno, Bednarz e Nowak (2013) avaliou a estrutura da cobertura de duas construções polonesas do Século XIX que sofreram ataques biológicos e alta umidade. Após a realização do levantamento, os autores constataram que o modelo de treliça utilizado não era adequado às solicitações, ocorrendo flexão nas barras e rigidez inadequada. Pelo fato dessa estrutura não ser aparente, a solução encontrada foi a construção de treliças adicionais em aço concebidas adequadamente para suporte e distribuição dos carregamentos atuantes. Essa solução só foi possível por não descaracterizar a estética dos ambientes do patrimônio aparentemente aos visitantes, entretanto é uma prática pouco observada na literatura.

Um enrijecimento de um deck de madeira utilizando peças adicionais de madeira da mesma espécie que a original foi proposto por Frunzio e Di Genaro (2018). Foram utilizadas hastes de aço inoxidável e acabamento de betonilha para fixar as novas peças de madeira. Segundo os autores, o reforço não descaracterizou o ambiente original e foi capaz de melhorar a capacidade portante. É importante destacar que não houve menção ao estado de degradação da estrutura existente.

Bertolini *et al.* (2013) utilizaram resina epóxi bicomponente, sendo adicionado ao adesivo um agente de cura à base de poliamioamida para recuperar a capacidade estrutural de vida de peças de madeira encontradas em patrimônio histórico. Foram confeccionados modelos com redução de 11 mm, correspondendo à 22% da altura da viga, em trechos na face superior do elemento. A mistura epóxi foi utilizada para preencher o vazio proveniente dos cortes. Não foram elaborados modelos com perda de propriedades físicas da madeira. Os autores observaram um aumento da rigidez das vigas, apresentando resultados eficazes para o uso dessa técnica na restauração de vigas de madeira nessas situações. A facilidade da execução e agilidade em se obter as propriedades necessárias para o reforço também foram destacadas.

Dentre os materiais utilizados como elemento de reforço em estruturas de madeira patrimoniais, o aço é bastante relatado e utilizado na literatura. Além dos estudos de Candelas-Gutiérrez e Borrallo-Jimenez (2020), Parisi e Piazza (2007) e Frunzio e Di Genaro (2018) que utilizaram elementos de aço como elementos auxiliares no reforço estrutural e de Bajno, Bednarz e Nowak (2013) que propuseram um novo componente estrutural em aço para suporte da estrutura, propostas considerando esse material como elemento de reforço externo principal são discutidas em alguns estudos.

Uma aplicação direta desse tipo de solução é apresentada por Qiao, Li e Chen (2016) na recuperação da estrutura de um pavilhão chinês, sendo definidos quatro diferentes tipos de reforço: localizado na base dos pilares com rachaduras e com apodrecimento, controle de deformações excessivas, recuperação de elementos estruturas e para enrijecimento das ligações.

A intervenção realizada nos pilares se deu pela utilização de anéis de aço instalados próximos à base. O controle da deformação e o enrijecimento das ligações foi realizado por anéis ou chapas de aço, conforme cada caso. Em alguns casos onde a degradação foi severa, houve a substituição parcial do elemento estrutural. As

rachaduras da estrutura localizadas em vigas e pilares foram preenchidas com resina epóxi. Os autores não se aprofundaram na fundamentação da tomada de decisão quanto ao reforço utilizado em cada situação.

Jasieńko e Nowak (2014) analisaram a eficiência da utilização de chapas de aço com interesse especial na superfície de contato entre a madeira e o aço. A viga de madeira deteriorada foi analisada com diferentes configurações de reforços instalados nas faces superiores e inferiores e também dentro da seção transversal, fixados por meio de adesivo epóxi. Foi observado um aumento da capacidade de carga similar a outros estudos que utilizaram materiais compósitos considerados mais modernos.

A aderência do adesivo epóxi no reforço foi considerada adequada, tanto em madeiras novas quanto em antigas. Entretanto o teor de umidade da madeira apresentou impacto significativo na resistência do elemento reforçado. Segundo Jasieńko e Nowak (2014), o adesivo proporcionou a alto nível de transmissão dos esforços entre a viga de madeira e a chapa de aço e esse efeito não seria possível observar ao utilizar conectores mecânicos, como pregos e parafusos. Porém, quando submetido a temperaturas elevadas, o reforço perde desempenho, recomendando-se a realização da recuperação estrutural utilizando adesivo epóxi em conjunto com conectores mecânicos ou uma previsão adequada de um sistema de combate ao incêndio.

É importante observar que apesar da utilização do aço como elemento de reforço ser bastante relatada na literatura, outros materiais mais modernos também possuem relatos de sua aplicação. A utilização de FRP é vastamente estudada, sendo adotadas diferentes fibras como elemento de reforço, como: CFRP, polímeros reforçados com fibras de vidro (GFRP - *glass fiber-reinforced polymer*) e basalto (BFRP - *basalt fiber-reinforced polymer*).

Čejka *et al.* (2015) trabalharam na recuperação de estruturas de madeira utilizadas em paredes de construções históricas de estilo enxaimel, na República Tcheca, que foi realizada com materiais compósitos com fibras de alta resistência e resina epóxi.

Isleyen e Kesik (2021) realizaram um estudo experimental da utilização de CFRP em madeiras de construções patrimoniais deterioradas, com foco no desempenho estrutural à compressão e à flexão. O módulo de elasticidade e a

resistência à flexão do conjunto reforçado superou a referência (madeira nova sem defeitos) em 4%, melhorando também a resistência à compressão e aumentando duas vezes a ductilidade.

Jasieńko, Nowak e Czepizak (2010) analisaram de forma experimental e numérica a utilização de lâminas de CFRP para recuperar vigas de madeira centenária com perdas de propriedades físicas e mecânicas em função de biodegradação. Para isso, variaram o método de instalação do reforço, sendo testadas as seguintes configurações: reforço vertical com uma única lâmina ao longo da viga e fendas assimétricas com 4 mm de espessura e 25 mm de profundidade, reforço com duas camadas de CFRP verticais ao longo da viga e substituição da madeira deteriorada por madeira nova e, por fim, vigas com reforço em tripla camada e com enfraquecimento da região tracionada por furos de 25 mm. O reforço foi disposto na região tracionada em todas as amostras.

Os autores observaram que o reforço tem maior atuação quando ocorre a plastificação da seção transversal. Nas configurações estudadas, a região onde as lâminas foram instaladas não proporciona grande aproveitamento do material do reforço, estando fixadas na região da seção tracionada mais próxima da linha neutra, distante das fibras mais tracionadas. Os autores indicaram uma possível melhora estrutural ao se dispor do reforço na região com maior solicitação de tração.

A adoção de lâminas de CFRP inseridas dentro da seção transversal para recuperação de vigas de madeira fissuradas e com ataque de xilófagos foi analisada por Nowak, Jasieńko e Czepizak (2013). Para isso os autores elaboraram grupos de ensaios com diversas configurações de inserção das lâminas. Em todos os modelos o reforço foi inserido na região tracionada da seção transversal e em apenas um deles as lâminas foram dispostas no sentido horizontal, havendo vários modelos com arranjos diferentes do reforço instalado no sentido vertical.

Todos os modelos reforçados realizados por Nowak, Jasieńko e Czepizak (2013) foram capazes de aumentar a rigidez e a resistência da viga, diminuindo os malefícios oriundos dos defeitos da madeira e manifestações patológicas. Os autores destacaram que a inserção do reforço na região interna da viga resulta em uma capacidade portante inferior do que a que seria obtida se o reforço estivesse inserido na face inferior, efeito já observado anteriormente (JASIEŃKO; NOWAK; CZEPIZAK, 2010). Entretanto, há um favorecimento no desempenho em situação de incêndio.

Foi realizada uma simulação de elementos finitos para melhor compreensão do efeito do reforço. Os autores observaram que as lâminas verticais demandaram apenas 12% de sua resistência, sendo esse um valor médio encontrado no centro de gravidade de cada lâmina. Ao observar a atuação desse reforço na região mais tracionada, constatou-se que foi demandada 60% da resistência do reforço. Um maior aproveitamento seria obtido com essas lâminas de CFRP protendidas, porém os autores consideram complexa a execução desse tipo de técnica com esse material.

A comparação da utilização do CFRP com GFRP para reforço de estruturas de madeira com rachaduras e degradadas foi realizada por Motlagh, Gholipour e Ebrahimi (2012). Os autores observaram que o compósito com fibras de carbono apresentou um desempenho consideravelmente superior ao com as fibras de vidro. Entretanto o GFRP possui vantagens para a utilização no patrimônio histórico por ser incolor, alterando o ambiente de forma menos perceptível que o CFRP e ainda por possuir um custo inferior. Desse modo, os autores concluíram que para situações onde não é necessária uma alta taxa de reforço o GFRP se apresenta como uma solução viável. Foi observado também que um aumento das camadas de reforço proporcionou uma ruptura mais dúctil.

Li *et al.* (2014) realizaram seu estudo analisando a utilização de barras de GFRP protendidas e CFRP atuando em conjunto para recuperação de uma viga de madeira degradada com redução da seção central no sentido longitudinal. Para isso foram analisados quatro grupos de amostras: uma referência, sem reforço e perda de seção; um grupo com furo longitudinal na região central e sem reforço; o terceiro grupo com furo excêntrico na seção transversal e reforçado com barra de GFRP protendida; e o último grupo com furo no centro de gravidade, reforçado com uma barra de GFRP protendida e CFRP na face inferior da viga.

Todos os reforços propostos por Li *et al.* (2014) foram capazes de aumentar o desempenho estrutural das vigas, sendo observado que os modelos que utilizaram ambos os reforços resultaram em uma resistência à flexão correspondente ao dobro dos modelos com apenas a barra de GFRP protendida.

O emprego de fibras naturais foi analisada por Wdowiak-Postulak (2020), onde foram utilizadas barras de BFRP com e sem protensão com pré-tração. O reforço foi aplicado em vigas de madeira bicentenárias com diminuição de propriedades físicas, rachaduras e vazios. Foram utilizadas duas barras fixadas dentro da seção

transversal na região lateral abaixo da linha neutra. A utilização de protensão resultou em uma resistência à flexão das peças 30% superior à referência. Nos modelos sem protensão a rigidez superou a referência em 15,12%. As barras foram fixadas com resina epóxi, fornecendo uma aderência considerada eficiente pelo autor.

Um estudo com proposta diferente dos anteriormente já apresentados foi feito por Cestari *et al.* (2013). O objetivo consistiu no desenvolvimento de um nanomaterial produzido a partir de resina polimérica reforçada com nanotubos de carbono que possa ser utilizado para reforçar estruturas de madeira, em especial as utilizadas em patrimônio históricos. Os autores realizaram ensaios em laboratório com amostras normalizadas, variando a espécie de madeira e a tipologia da ligação. Foi observada uma melhoria no desempenho da madeira ao utilizar o reforço proposto. Entretanto, o resultado satisfatório foi obtido para reforços parciais e não necessariamente vão ser observados em reforços globais. Ainda, foi destacada a necessidade de maiores estudos sobre o material, como a permeabilidade do revestimento de resina.

Observa-se que as tipologias de recuperação de estruturas de madeira pertencentes ao patrimônio histórico mais encontradas nesta revisão foram as que adotam FRP e aço como elemento de reforço localizado. A comparação da utilização desses dois materiais para recuperação dessas estruturas de madeira foi analisada por Li *et al.* (2018) ao apresentarem um estudo de recuperação de pilares de madeira com perda de seção transversal e densidade na região de emenda. Os autores utilizaram quatro tipos de reforços distintos: braçadeiras de aço, encamisamento com chapas de aço sem injeção de epóxi, encamisamento com chapas de aço com injeção de epóxi e encamisamento com CFRP.

A utilização de braçadeira de aço resultou em pilares com resistência próxima de 87% do modelo referência sem emenda. Os autores observaram que o reforço com encamisamento de aço e epóxi conseguiu recuperar 100% da capacidade portante do elemento, sendo indicado seu uso para casos em que seja necessária a redução do comprimento de emenda. Ficou destacado que a utilização do adesivo epóxi garantiu um desempenho estrutural consideravelmente superior à ligação.

A rigidez inicial proporcionada pelo reforço com CFRP foi considerada satisfatória. Entretanto não houve uma contribuição significativa na resistência à compressão, ocasionando deflexão lateral e uma falha prematura na estrutura. Os

pesquisadores adicionaram uma segunda camada de CFRP e constataram uma melhoria na rigidez, sendo considerada satisfatória para a sua utilização.

Poucos estudos analisaram a recuperação por substituição total. Isso ocorre possivelmente pelo fato dessa técnica descaracterizar o patrimônio (JASIEŃKO; NOWAK, 2014; PARISI; PIAZZA, 2007). De forma análoga, a utilização de materiais diferentes da estrutura original é mais encontrada na literatura pelo provável motivo de que a estrutura original fica em destaque e facilmente detectável pelos usuários.

Foram observadas algumas lacunas em estudos que comparem reforços com elementos de aço e FRP, havendo apenas o trabalho de Li *et al.* (2018) incluído nessa amostra. Entretanto, há uma diversidade de configurações de reforço que podem ser analisadas, bem como defeitos diferentes na madeira que podem demandar diferentes soluções.

Apesar da utilização de FRP possuir vários estudos analisados, foi observada uma lacuna nas pesquisas sobre variação das fibras e seus efeitos na ductilidade e capacidade resistente. Ainda, os estudos se concentraram na utilização do CFRP e GFRP e BFRP, esses últimos em quantidade consideravelmente inferior, não havendo outras análises com demais fibras sintéticas e naturais, como aramida, por exemplo.

A interação entre a estrutura antiga e o reforço é objeto de análise recorrente, sendo a utilização da resina epóxi observada na maioria dos artigos como objetivo secundário, porém não foram encontrados os que analisam esse efeito com exclusividade. Čejka *et al.* (2015) salientam que a utilização de materiais de reforço aderidos à madeira possuem uma limitação de desempenho proporcional à qualidade da aderência entre a madeira e o reforço.

Não foram encontrados estudos que foquem em fixadores mecânicos e analisem os parâmetros da ligação na capacidade de transmissão dos esforços entre os elementos estruturais e o impacto nas tensões internas da estrutura reforçada. Considerando a facilidade na utilização de pregos e parafusos, em especial em estruturas que não podem ser desmontadas e ficam em locais de difícil acesso, um aprofundamento no tema tem potencial para avanços para intervenções onde a facilidade da execução é fator decisivo.

Por fim, é importante destacar que estudos experimentais sobre o tema dessa revisão são de difícil execução pois a utilização de madeiras pertencentes às construções históricas ou similares são de difícil obtenção. Normalmente os estudos

realizados contam com poucas amostras, dificultando a correlação de dados e sua extrapolação. Desse modo, a utilização de análises numéricas se apresenta como uma alternativa para um estudo mais aprofundado e abrangente.

### 3.2 SIMULAÇÃO DE VIGAS DE MADEIRA PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O principal objetivo da revisão é apresentar como os estudos que analisam vigas de madeira serrada pelo método dos elementos finitos (MEF) em simulações estáticas, com principal interesse na consideração do comportamento anisotrópico inerente do material, bem como as principais configurações de elementos finitos e malha. Essa revisão foi realizada no mês de outubro de 2022 e difere da apresentada anteriormente pois a maioria dos dados de interesse constam na seção de materiais e métodos, e não nas seções de resultados, discussão e conclusão.

Considerando o objetivo estipulado, bem como a quantidade de artigos selecionados, esta revisão não tem a finalidade de trazer as conclusões e resultados das pesquisas em si, salvaguardadas as pesquisas que possuem como objetivo principal o estudo da modelagem numérica, apenas explicitar e destacar os diferentes métodos para simulação de vigas de madeira pelo método dos elementos finitos. Desse modo, o Quadro 6 apresenta as perguntas norteadoras da revisão.

Quadro 6 – Perguntas norteadoras da revisão sistemática sobre simulação de vigas de madeira pelo método dos elementos finitos

Pergunta	Descrição
P1	Como são configuradas as simulações de vigas de madeira serrada?
P2	Qual a finalidade das simulações?
P3	Como as características físicas e mecânicas da madeira são consideradas?

Fonte: Autor (2022).

Os termos de busca definidos e suas equivalências em inglês estão apresentados no Quadro 7. Foram escolhidos três termos de busca para a presente revisão: “madeira”, “elementos finitos” e “viga”.

Quadro 7 – Termos de busca da revisão sistemática sobre simulação de vigas de madeira pelo método dos elementos finitos

Termo em Português	Termo em inglês	Sinônimo/equivalente
Madeira	<i>Timber</i>	<i>Wood</i>
Elementos finitos	<i>Finite element</i>	-
Viga	<i>Beam</i>	-

Fonte: Autor (2022).

O primeiro termo, bem como nas demais revisões, foi definido para direcionar as buscas ao material estrutural de interesse. O segundo termo define o tipo de análise que é de interesse deste estudo, abrangendo outras nomenclaturas com mais palavras, como “método dos elementos finitos”. O último foi adotado para limitar o elemento estrutural de interesse. Desse modo, ao aplicar os operadores booleanos, a *string* de busca utilizada foi:

- (timber OR wood) AND (finite element) AND (beam).

Pela adoção de uma *string* abrangente, os critérios de inclusão e exclusão foram mais específicos. Foram incluídos estudos que apresentavam análise via MEF de vigas de madeira serrada em simulações estáticas ou quase estáticas. Como critério de exclusão, foi definido que não seriam aceitos os artigos que: estivessem fora do escopo presente no critério de inclusão e que não estivessem totalmente disponíveis nas bases de dados.

A análise inicial da amostra se deu pelos critérios de qualidade apresentados no Quadro 8. Por fim, foram definidos os campos de extração no formato adotado pelo *software* StArt, conforme Quadro 9.

Quadro 8 – Critérios de qualidade da revisão sistemática sobre simulação de vigas de madeira pelo método dos elementos finitos

Critério	Descrição
Q1	O artigo informa a espécie de madeira analisada?
Q2	O artigo informa a fonte das propriedades dos materiais simulados?
Q3	O artigo apresenta detalhes sobre a configuração da simulação?
Q4	O artigo apresenta detalhes sobre o tipo de elemento finito?
Q5	O artigo apresenta detalhes sobre o teste de malha?
Q6	O artigo apresenta detalhes sobre a validação do modelo numérico?

Fonte: Autor (2022).

Quadro 9 – Campos de extração da revisão sistemática sobre simulação de vigas de madeira pelo método dos elementos finitos

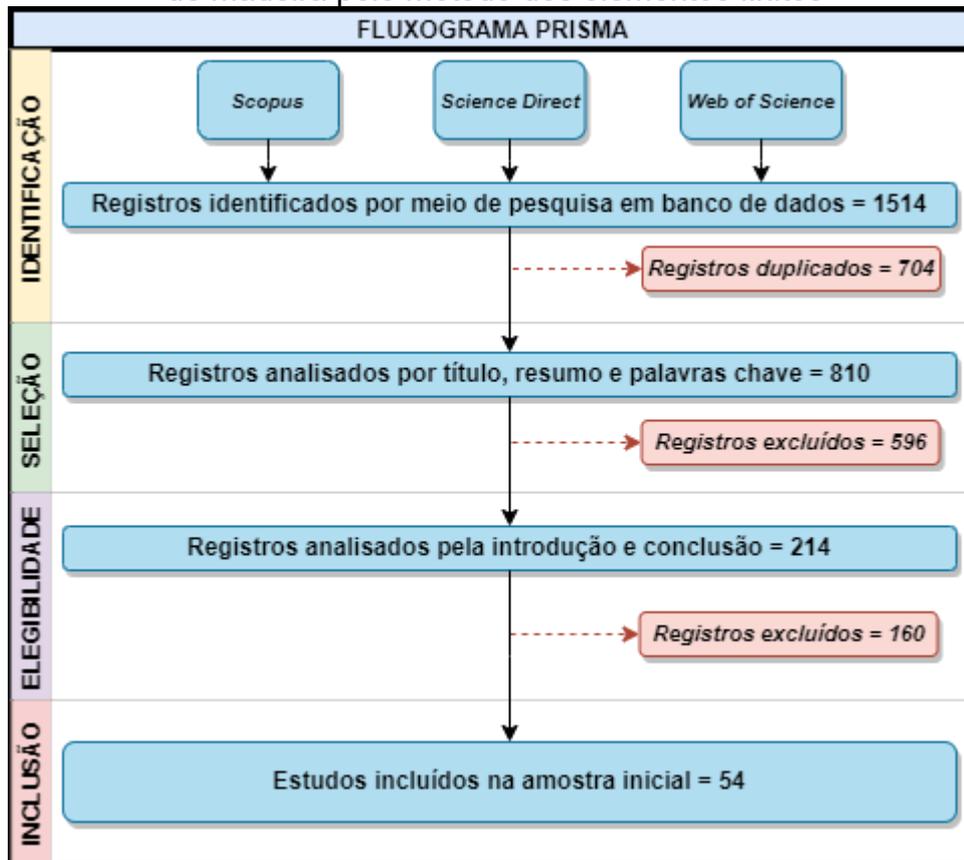
<b>Campo</b>	<b>Tipo<sup>1</sup></b>	<b>Conteúdo</b>
Fonte das propriedades constituintes	<i>Pick on list</i>	{Experimental,Literatura,Não informado}
Tipo de análise	<i>Pick Many List</i>	[Linear,Não-linear,Não informado]
Comportamento considerado	<i>Pick on list</i>	{Anisotrópico,Ortotrópico,Isotrópico,Não informado}
Tipo de elemento finito	<i>Pick on list</i>	{Barra,Casca,Sólido, Não informado}
Tipo de malha	<i>Pick on list</i>	{Tetraédrica,Hexaédrica,Triangular,Quadrangular, Não informado }
Finalidade da simulação	<i>Pick on list</i>	{Reprodução do experimento, Estudo paramétrico}
Interação da madeira com outros materiais	<i>Text</i>	
Fonte das propriedades constituintes	<i>Pick on list</i>	{Experimental,Literatura,Não informado}

Nota 1: *Pick on list* = escolha um na lista; *Pick on Many* = Escolha em vários; *Text* = campo texto aberto.

Fonte: Autor (2022).

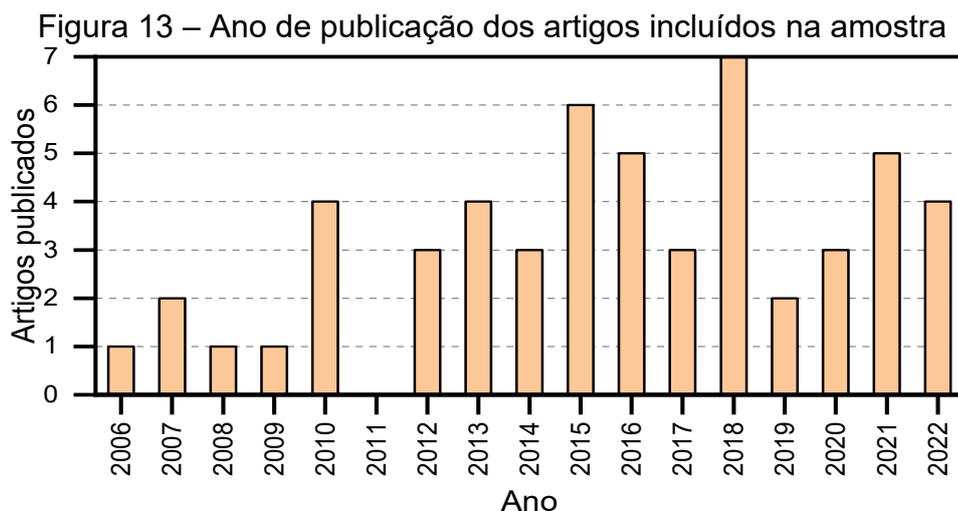
O fluxograma PRISMA da revisão é apresentado na Figura 12. A busca na base de dados retornou 1514 artigos, onde aproximadamente 3,6% foram selecionados para a etapa de inclusão. Ao desconsiderar os registros duplicados, o percentual de artigos selecionados foi de aproximadamente 6,7%.

Figura 12 – Fluxograma PRISMA da revisão sistemática sobre simulação de vigas de madeira pelo método dos elementos finitos



Fonte: Autor (2022).

De modo geral, os artigos não incluídos na amostra analisaram madeira laminada colada ou painel OSB (*Oriented Strand Board*) e painéis sanduíches. Ainda, foram encontrados vários artigos que não analisavam elementos de vigas, mas sim pilares, treliças e similares. Também foram encontrados artigos com análises dinâmicas em elementos de madeira, não abrangendo o escopo da pesquisa. O rol de artigos incluídos nessa amostra é apresentado no Apêndice A. A Figura 13 apresenta a distribuição dos artigos conforme o ano de publicação.

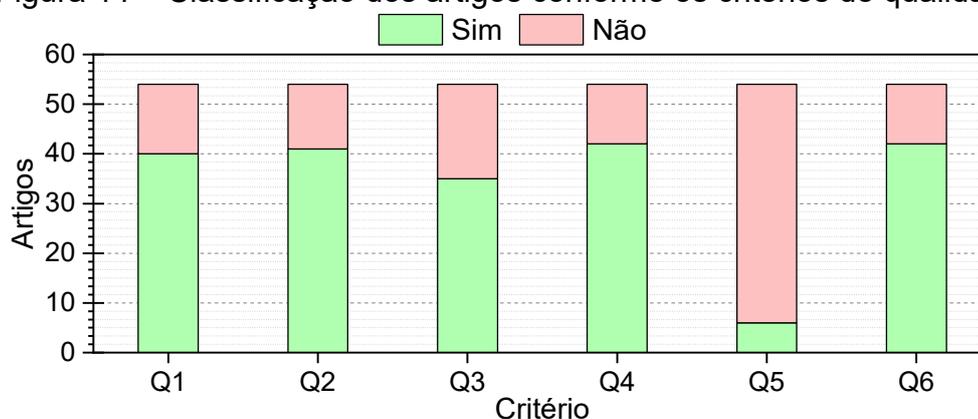


Fonte: Autor (2022).

Observa-se que houve um interesse constante na utilização do MEF para simulação de vigas de madeira serrada a partir de 2012. Isso pode ser justificado pela evolução da tecnologia de computadores e a facilidade em adquirir um equipamento para a realização das simulações. Nos últimos dez anos foram produzidos 83% dos artigos incluídos na amostra, sendo 44% nos últimos cinco anos. Desse modo, é razoável que futuras revisões sobre o tema possam se fixar em estudos mais recentes. Durante a leitura dos artigos para aceitação ou exclusão, verificou-se que uma vasta quantidade de pesquisadores se debruça para analisar madeira laminada colada via MEF, aparentemente sendo mais difundido neste meio do que a madeira serrada.

Nenhum critério de qualidade presente no Quadro 8 foi totalmente atendido pelos artigos da amostra. A Figura 14 ilustra como esses critérios foram observados.

Figura 14 – Classificação dos artigos conforme os critérios de qualidade



Fonte: Autor (2022).

Dentre os critérios de qualidade estipulados, cinco foram observados na maior parte dos artigos selecionados. O critério Q5, referente ao teste de malha, foi atendido apenas por 11,1% dos artigos selecionados. A maioria dos estudos apenas informam o tamanho de malha adotada, por vezes se referindo a outros artigos que utilizaram a mesma configuração.

Cerca de 74,1% dos artigos informam a espécie de madeira analisada (Q1) e 75,9% explicitam a origem das propriedades da madeira adotada na simulação (Q2). Essas informações são importantes para as reprodutividades do estudo e referência para pesquisas com espécies similares.

A seguir os dados e resultados da revisão serão apresentados, sendo agrupados em: utilização do método dos elementos finitos para análise de vigas de madeira, consideração do comportamento da madeira, configurações usuais das simulações, definições de malhas adotadas para vigas de madeira, consideração do contato da madeira com outros elementos e conclusão da revisão sistemática.

### **3.2.1 Utilização do método dos elementos finitos para análise de vigas de madeira**

Na amostra selecionada conforme os objetivos da revisão, foram encontradas diferentes aplicações e metodologias para o método dos elementos finitos, como análises de elementos isolados (ESLAMI; JAYASINGHE; WALDMANN, 2021), construções completas (DAI, 2020) e, inclusive, obras de arte como pontes (DAI, *et al.*, 2017). Os objetivos foram diversos: propostas de métodos de modelagem, estudo sobre a interação entre os elementos da estrutura, análise das propriedades dos elementos estruturais, dentre outros.

Segundo Patalas, Karolak e Nowak (2022), a utilização de análises numéricas é especialmente recomendada para conhecimento e avaliação do comportamento de estruturas em construções históricas, diminuindo as intervenções necessárias na etapa de estudos da estrutura.

Dai (2020) analisou via MEF uma ligação viga-pilar existente em uma construção histórica. Foram realizados ensaios na estrutura original para validação da análise numérica, sendo encontrado um erro de 2,9% no elemento de viga e 3,5% no pilar. O autor observou que a simulação de estrutura de construções históricas pelo

método dos elementos finitos pode ser empregada com as técnicas adequadas de levantamento de dados e suporte para modelagem computacional.

O estudo de Murata e Kanazawa (2007) ilustrou que o MEF apresenta potencial para a obtenção e correlação de propriedades mecânicas da madeira. A pesquisa dos autores teve como objetivo estimar os módulos de elasticidade e de cisalhamento de uma viga por meio de simulação numérica de um ensaio de flexão, sem os efeitos de concentração de tensão, validando seus resultados por meio de ensaios experimentais.

Considerando as diversas aplicações e possibilidades de análises, bem como a alta variabilidade física e geométrica da madeira, pesquisadores têm se dedicado a propor métodos de modelagem desse material para análises estruturais. O trabalho de Campilho *et al.* (2009) teve como objetivo desenvolver um procedimento para simulação da falha em estruturas de madeira com CFRP em situação de reparo. Ajustando os critérios de comportamento da madeira e validando a interação do reforço com a estrutura da viga, o modelo proposto pelos autores foi capaz de descrever de forma precisa o modo de falha, rigidez elástica e a carga máxima dos elementos analisados.

Uma estratégia de simulação não-linear para vigas de madeira reforçadas com CFRP foi proposta por Khelifa *et al.* (2014), adotando o critério de Hill e o acoplamento da elasticidade ortotrópica para descrever o comportamento da madeira no estado plástico. Os resultados obtidos foram validados experimentalmente.

Saad e Lengyel (2022) realizaram análises pelo MEF para obter curvas de carga-deflexão obtidas experimentalmente, visando prever adequadamente o comportamento da região do nó comumente encontrado em madeiras. Na investigação experimental, o nó se encontrava na região tracionada. Após a validação da simulação, foram elaborados novos modelos com o nó na região comprimida.

Eslami, Jayasinghe e Waldmann (2021) apresentaram uma proposta de obtenção da resposta mecânica não-linear da madeira, sendo adotada uma relação constitutiva da madeira baseada no modelo elastoplástico de endurecimento isotrópico por meio do critério de Hoffman. Foram realizadas simulações de elementos tracionados, comprimidos e uma das demonstrações foi em uma viga submetida à flexão por quatro pontos. Foi realizado um teste de malha para refinamento dos resultados. A validação do método se deu por meio de comparação com resultados

experimentais, onde os autores conseguiram resultados próximos dos ensaios em laboratório.

Xiao, Doudak e Mohaerb (2017) analisaram a capacidade elástica de vigas de madeira submetidas à torção lateral. A simulação foi validada com ensaios experimentais e seus resultados comparados com o preconizado no Eurocode 5 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2008). Foi encontrado um erro entre 0,83 (17%) e 1,29 (29%), com uma média de 1,02 (2%). Os autores avaliaram como uma variação de erro adequada, considerando as imperfeições e variações intrínsecas da madeira.

Toussaint *et al.* (2016) visaram reproduzir testes experimentais onde analisaram uma ligação de uma viga de dente gueber com um consolo. Com base nos ensaios experimentais, os autores selecionaram a amostra com maiores imperfeições para simulação numérica com objetivo de observar as maiores distorções entre a análise computacional e o modelo real. Apesar das imperfeições, os autores relataram que o comportamento do modelo numérico foi similar ao experimental, porém não apresentaram o erro percentual encontrado.

A junção de diferentes materiais com propriedades diferentes é comumente adotada na engenharia estrutural, sendo encontrados estudos que tratam de elementos de madeira compostos com partes em concreto, aço ou de FRP.

O comportamento de vigas mistas de madeira e concreto submetidas à cargas térmicas foi analisado por Molina e Calil Júnior (2018). A estratégia de análise ocorreu através da análise da seção transversal por meio de elementos finitos bidirecionais. Esse método de simulação é usual para esse tipo de análise (ZHANG *et al.*, 2012). Por meio do estudo, os autores puderam compreender o comportamento do elemento composto, em especial a observação da temperatura distribuída em toda a área da seção transversal.

Oudjene *et al.* (2018) se dedicaram a validar um modelo numérico de uma viga composta de madeira e concreto com parafusos como conectores mecânicos. O comportamento plástico da viga foi considerado por meio do critério de Hoffman.

Khorsandnia, Valipour e Crews (2013) realizaram uma análise não-linear de viga de madeira utilizando elementos finitos bidirecionais. O estudo se destinou a analisar o comportamento e falha apenas no sentido das fibras da viga. O modelo foi elaborado por camadas isotrópicas conectadas entre si por elementos de interface,

simulando a ortotropia do material. Como resultado, foi desenvolvida uma proposta de lei constitutiva para descrever o comportamento não-linear e carga de falha para vigas de madeira e conexões com vigas compostas de madeira e concreto, com o dano comparado com o critério de Hashin.

A utilização de elementos de aço nas simulações de vigas de madeira é considerada nos estudos de Koshcheev *et al.* (2018), onde analisaram um reforço inovador com cabos de aço inseridos na face inferior do elemento com uma trajetória curva, e Hiswa e Albutbahak (2018), em relação ao comportamento do conjunto à flexão. O contato entre esses elementos é um componente a ser definido na simulação para que se preveja adequadamente o comportamento do conjunto.

A utilização de materiais compósitos para recuperação e reforço de estruturas de madeira é um assunto de bastante interesse da comunidade científica, sendo comumente utilizadas lâminas e barras de FRP (CAMPILHO *et al.*, 2010). O estudo de Khelifa, Lahouar e Celzard (2015) analisou o comportamento à flexão de vigas de madeira com emendas dentadas no meio do vão reforçadas com CFRP, sendo encontrado um erro absoluto entre o modelo numérico e o experimental de 5%.

O estudo de Khelifa e Celzard (2014) desenvolveu uma formulação para capturar de modo eficiente a resposta global do comportamento de vigas de madeira reforçadas com CFRP.

Islam *et al.* (2019) avaliaram a capacidade de flexão e a posição do arco de compressão de vigas de madeira com diferentes reforços de CFRP, utilizando o critério de Hill para consideração do comportamento elastoplástico da madeira, sendo a consideração desse critério também feita por Khelifa, Lahouar e Celzard (2015), Khelifa, Fierro e Celzard (2015) e Saad e Lengyel (2021). O comportamento observado em laboratório foi reproduzido e foi possível determinar o caminho do arco de compressão em diferentes configurações da viga, destacando o efeito benéfico de confinamento gerado pelo reforço de CFRP. O estudo de Saad e Lengyel (2021) encontrou um erro entre 0,22% e 14,93% ao analisar o reforço de uma viga de madeira com CFRP instalada na face tracionada do elemento.

O reparo de vigas de madeira utilizando CFRP foi abordado por Carbas *et al.* (2015), Khelifa, Fierro e Celzard (2015) e Bergner *et al.* (2018). Carbas *et al.* (2015) utilizaram o Modelo de Zona Coesiva (MZC) para simular o início de propagação da fenda, possibilitando compreender esse fenômeno de modo mais criterioso. O MZC

também foi utilizado por Khelifa *et al.* (2015) em um estudo paramétrico para avaliar o efeito da variação do tamanho do CFRP utilizado como reforço à tração em vigas de madeira. Nesse estudo, os autores também variaram o arranjo e números de camadas do reforço. Os autores adotaram a simulação por simetria como estratégia para melhoria do desempenho computacional. O modelo elaborado foi capaz de prever adequadamente a capacidade de carga e a deflexão da viga, bem como o modo de falha. Ao avaliar a falha progressiva de uma viga de madeira com emenda central dentada com reforço de CFRP utilizando MZC, Khelifa *et al.* (2016) encontraram um erro entre o modelo numérico e a validação entre 1,6% e 9,4%.

Apenas o estudo de Reis *et al.* (2018), dentre a amostra, se dedicou a analisar a utilização de barras de CFRP em vigas de madeira. O objetivo da utilização do MEF foi obter dimensões ótimas do reforço por meio de um estudo paramétrico. Com a otimização da seção transversal da barra de CFRP, a rigidez do conjunto foi aumentada em 77%, contribuindo ainda com a resistência do conjunto.

### 3.2.2 Consideração do comportamento da madeira

Nas simulações numéricas, as estruturas de madeira são consideradas como materiais elastoplásticos, sem consideração de deslizamento e relaxamento, além da simplificação da anisotropia para um comportamento ortotrópico (ZHANG, *et al.*, 2015), conforme comentado no Capítulo 2.1. Os parâmetros materiais efetivamente utilizados no modelo de material ortotrópico são: módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e módulo de cisalhamento, todos nos três sentidos ortogonais (FAJDIGA *et al.*, 2019).

Entretanto, alguns autores consideram o comportamento da madeira de forma diferente. O comportamento isotrópico da madeira foi adotado por Bardella, Paterlini e Leronni (2014), sendo encontrados resultados coerentes com modelos analíticos relatados na literatura científica. O estudo teve como objetivo analisar o comportamento à flexão de vigas de madeira e concreto.

Normalmente a determinação das propriedades da madeira no sentido longitudinal é mais facilmente realizada, enquanto as propriedades nos sentidos radial e tangencial são de difícil obtenção. Segundo Nowak, Jasieńko e Czepizak (2013), apenas em casos onde os anéis anulares são paralelos às bordas a diferenciação da

ortotropia entre os sentidos tangencial e radial pode ser prescindida, porém essa situação é considerada rara.

Dias *et al.* (2010) destacam que as propriedades físicas e mecânicas de espécies de madeira disponíveis na literatura científica podem ser utilizadas para simulações numéricas.

Normalmente as simulações de elementos estruturais são realizadas considerando o comportamento não-linear do material. Entretanto, há situações onde pesquisadores simplificam a análise e consideram apenas o comportamento linear na simulação. Wang (2022) realizou uma análise de otimização de uma viga de madeira, visando alcançar o limite de deformação normativo atendendo os limites de resistência concomitantemente, conseguindo economizar 5,5% de volume de madeira. A análise foi realizada dentro do regime linear, sendo adotada em situações onde deseja-se prever situações em serviço, considerando as pequenas deformações e deslocamentos (CASCIATI; DOMANESCHI, 2007).

A simulação via MEF dentro do regime linear também foi adotada por Kim e Harries (2010), onde os autores analisaram o comportamento de vigas de madeira reforçadas com CFRP, sendo realizado um estudo paramétrico com diferentes propriedades do reforço e diferentes espécies de madeira. No trabalho experimental utilizado como referência pelos autores não foi constatado um comportamento plástico perceptível precedendo a falha, justificando a consideração de comportamento linear da madeira.

Nowak, Jasieńko e Czepizak (2013) realizaram simulações de vigas de madeira deteriorada reforçadas com CFRP visando obter dados complementares aos obtidos experimentalmente. Os autores fizeram simulações lineares e não-lineares, considerando o critério de Hill para prever o comportamento elastoplástico da madeira. A análise linear foi capaz de reproduzir o observado em laboratório, porém o modelo com simulação não-linear precisará de melhorias para descrever adequadamente o comportamento da madeira.

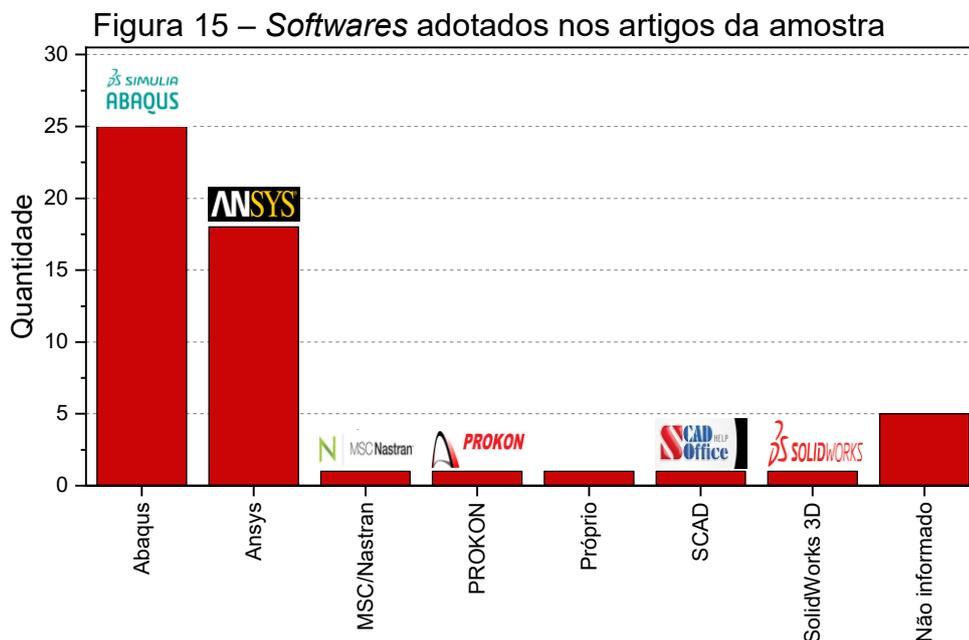
### **3.2.3 Configurações usuais das simulações**

Uma vantagem da utilização do MEF para análise de estruturas pode ser observada no estudo de Silva, Moura e Morais (2006), Khelifa *et al.* (2015) e Reis *et*

al. (2018), que optaram por proceder a simulação inserindo um deslocamento ao invés de uma carga para analisar o comportamento de uma viga com borda fissurada, com o objetivo dos autores era obter a taxa de liberação de energia de deformação. Na etapa de processamento, o valor do deslocamento inserido foi dividido em pequenos incrementos que correspondem à uma parcela de 0,0001 do total. Isso se apresenta eficaz para estudos que pretendem analisar vigas de madeira dentro dos limites normativos para projetos estruturais reais.

Um estudo similar ao de Silva, Moura e Morais (2006) foi desenvolvido por Yoshihara (2013), que utilizaram o método de redução de danos para realizar a simulação, destacando a influência da variação metodológica nas análises de fendas e descontinuidades da madeira.

A utilização do MEF em análises estruturais é realizada por meio de *softwares* especializados para a análise. A Figura 15 apresenta os programas utilizados nos estudos dos trabalhos considerados.



Fonte: Autor (2022).

Observa-se que o Abaqus é o programa mais adotado pelos artigos analisados (46,3%), sendo o Ansys o segundo mais utilizado (33,3%). O Abaqus e o Ansys são os programas mais difundidos na amostra. Os demais aparecem apenas em um estudo. Casciati e Domaneschi (2007) realizaram sua análise em um programa

desenvolvido pelos autores em ambiente Matlab. Cinco artigos não informaram o programa utilizado para o desenvolvimento do estudo.

### 3.2.4 Definições de malhas adotadas para vigas de madeira

A simulação das vigas de madeira dos artigos incluídos nessa revisão foi configurada na maioria dos artigos (57,4%) com elementos sólidos hexaédricos de oito nós. Três artigos modelaram a viga como elemento sólido, porém utilizaram elementos tetraédricos para realizar a simulação, como no estudo de Patalas, Karolak e Nowak (2022), onde os elementos tetraédricos foram adotados em regiões com descontinuidade para refinamento da análise na região. Dez artigos não informaram o tipo de elemento adotado, correspondendo a 18,6% da amostra.

Nowak, Jasieńko e Czepizak (2013) adotaram elementos sólidos hexaédricos de oito nós para prever o comportamento do CFRP utilizado no reforço. Essa consideração também foi feita por Campilho *et al.* (2009) e Carbas *et al.* (2015).

As imperfeições locais da madeira foram simuladas por Casciati e Domaneschi (2007) por meio de uma distribuição aleatória de elementos isotrópicos de pequena rigidez. Uma simulação sem a consideração das imperfeições resultou em deslocamentos 50% inferiores ao observado experimentalmente. Desse modo, os autores concluíram que a consideração adequada do nó e suas dimensões é uma variável importante para previsão do comportamento da viga.

No estudo de Saad e Lengyel (2022) a malha foi definida para considerar o desvio natural das fibras do nó. As simulações mostraram que o desvio das fibras na região do nó afetou de forma significativa o desempenho estrutural da viga, reduzindo sua resistência em até 28%. Não foram encontradas variações significativas nos modelos com nó na região comprimida, em relação aos modelos com nós na região tracionada. Os autores destacam a necessidade de prever adequadamente o desvio das fibras na região do nó. Os autores observaram que os nós na região tracionada podem ser simulados como vazios. Entretanto, na região comprimida, os nós devem ser simulados como elemento sólido.

Baño, Arriaga e Guaita (2013) analisaram a influência dos nós da madeira na resistência à flexão de elementos de viga. A malha de 10 mm foi adaptada na região do nó para se adequar à descontinuidade das fibras. Foi observado que os nós da

região comprimida impactam a resistência à flexão da viga, enquanto os nós na região tracionada possuem pouca influência em seu comportamento. A localização do nó em relação à linha neutra também tem influência no desempenho da estrutura.

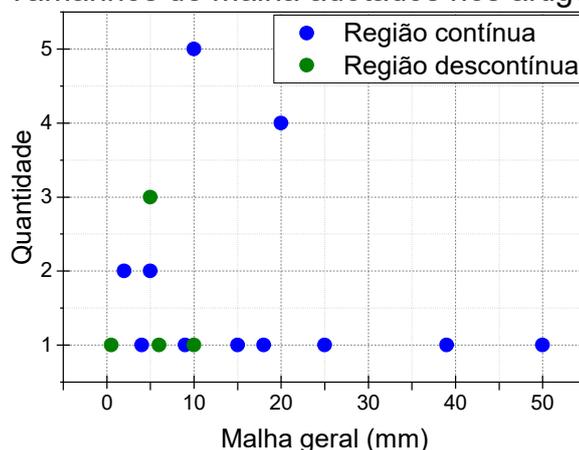
Alguns autores utilizam considerações generalistas para previsão do tamanho dos elementos finitos adotados na simulação. Kim e Harries (2010) consideraram uma limitação de 1,4% do comprimento da viga, sendo adotada uma malha com dimensões entre 15 mm e 39 mm, adaptando o tamanho para a área da seção correspondente. Nesse estudo, foi observado um erro de 10% no modelo numérico.

Iraola e Cabrero (2016) adotaram elementos com tamanho limites que correspondem a 1/15 da altura da viga e 1/10 da largura da seção transversal, adotando uma malha de 10 mm para analisar a implementação de um algoritmo para prever a falha progressiva de vigas de madeira.

Khorsandnia, Valipour e Crews (2013) recomendam que a modelagem preveja elementos finitos limitados à menor dimensão das irregularidades da madeira.

A configuração da malha acarreta impacto direto na qualidade do modelo elaborado e no tempo de processamento da estrutura. A Figura 16 apresenta uma distribuição dos tamanhos de malha observados nessa revisão.

Figura 16 – Tamanhos de malha adotados nos artigos da revisão



Fonte: Autor (2022).

Apesar da grande influência na qualidade da simulação, diversos autores apenas informam o tamanho de malha adotada, havendo então uma dispersão entre as considerações apresentadas em cada artigo. O tipo de região que está sendo modelada possui influência na definição da malha. Ao estudar o comportamento de

uma viga de madeira considerando suas imperfeições iniciais, Zhang *et al.* (2015) realizaram sua análise adotando elementos com 50 mm, sendo o maior valor encontrado nessa revisão. O erro encontrado na simulação foi de 22%. Os autores recomendam maiores estudos sobre a configuração da simulação para refinar o modelo e reduzir o erro para outras aplicações.

Para regiões contínuas, estudos com validações efetivas apresentaram malhas com 25 mm (LIU; MA; HAN, 2020), 20 mm (KHORSANDNIA; VALIPOUR; CREWS, 2013; MURATA; KANAZAWA, 2007; WANG, 2022), 10 mm (CAMPILHO *et al.*, 2009; CASCIATI; DOMANESCHI, 2007; SAAD; LENGYEL, 2022), 9 mm (BASTERRECHEA-ARÉVALO *et al.*, 2021), 5 mm (ŠPILÁK *et al.*, 2022). Chevalier *et al.* (2018) e Fadjiga *et al.* (2019) adotaram um tamanho de malha bastante inferior aos demais, sendo utilizados elementos com 2 mm.

Florisson, Vessby e Ormarsson (2021) estudaram o comportamento de vigas de madeira com variação de umidade, sendo possível observar a influência das condições climáticas no comportamento estrutural da viga. Na ocasião, em vigas de pequenas seções transversais, foi adotada uma malha de 4 mm. Em simulações com vigas altas, foi adotada uma malha de 20 mm.

Segundo Corradi *et al.* (2016) a modelagem de elementos utilizados como fixadores mecânicos, furos e descontinuidades similares devem receber maior atenção no processo de elaboração do modelo de simulação. Por essa razão, essas regiões são previstas com elementos de menores tamanhos, em comparação à região contínua (KUNECKÝ *et al.*, 2015; OUDJENE *et al.*, 2018; TOUSSAINT *et al.*, 2016). Basterrechea-Arévalo *et al.* (2021) adotaram uma estratégia de partição dos elementos na região próxima às descontinuidades para refinamento e adequação da malha.

Nas regiões com descontinuidade geométrica foram encontradas malhas densificadas com 10 mm (KHORSANDNIA; VALIPOUR; CREWS, 2013), 6 mm (CAMPILHO, R. D.S.G. *et al.*, 2009), 5 mm (KHORSANDNIA; VALIPOUR; CREWS, 2013; SAAD; LENGYEL, 2022), sendo encontrados valores de até 0,5 mm na simulação de Chevalier *et al.* (2018). A densificação de Saad e Lengyel (2022) ocorreu na região há 120 mm do nó.

Um método objetivo para determinação da malha ideal para o modelo consiste na realização de um teste de malha, avaliando diferentes tamanhos dos elementos

adotados, verificando juntamente o tempo de processamento. O teste de malha realizado por Eslami, Jayasinghe e Waldmann (2021) variou os elementos em 15 mm, 5 mm, 3 mm e 2 mm. Os autores observaram convergência com os modelos experimentais com a malha de 5 mm, aliando um bom desempenho computacional.

### 3.2.5 Consideração do contato da madeira com outros elementos

Kunecký *et al.* (2015) avaliaram experimental e numericamente uma emenda de face oblíqua com pinos em uma viga de madeira, com interesse especial no contato entre esses elementos. Para isso, realizaram um estudo paramétrico variando o coeficiente de atrito na emenda com valores entre 0,1 e 1, o diâmetro do pino entre 8 mm e 80 mm, a posição do pino e o ângulo da emenda. Os autores observaram que o coeficiente de atrito influenciou a rigidez da viga, porém não de forma significativa. Os erros encontrados no modelo numérico variaram entre 0,7% e 2,5%.

O teste de malha realizado por Molina e Calil Júnior (2018) ocorreu com elementos entre 5 mm e 56 mm. Na região contínua, os autores encontraram convergência com uma malha de 18 mm, enquanto que na região descontínua a malha mais adequada deveria possuir 5 mm.

O contato da madeira com outros materiais deve ser analisado de forma cuidadosa para que seja possível a reprodução do comportamento real do elemento na análise por elementos finitos. Essa consideração pode ser realizada por formas diversas, sendo comumente observadas nas estruturas de madeira a consideração de coeficientes de atrito ou, em casos específicos como em algumas análises de elementos fixados com adesivos (ISLAM *et al.*, 2019; LIU; MA; HAN, 2020), a perfeita adesão entre os materiais, desconsiderando qualquer deslizamento e perda de eficiência no contato.

Um exemplo da segunda alternativa pode ser observado nos estudos de Kim e Harries (2010) e Song *et al.* (2017). No trabalho de Kim e Harries (2010), com base no trabalho experimental de referência onde não foram observadas falhas na ligação madeira-reforço, os autores desconsideraram qualquer deslizamento relativo à ligação. Song *et al.* (2017) analisaram uma viga de madeira com cortes longitudinais e compararam com um modelo similar com parafusos autobrocantes dispostos na região inferior do elemento. Os autores consideraram como perfeita a aderência na

interface parafuso-viga. Entretanto, apesar dos autores considerarem a possibilidade dessa utilização no estudo apresentado, essa é uma estratégia pouco encontrada na amostra dessa revisão. Nowak, Jasieńko e Czepizak (2013) simularam esse comportamento como um contato tipo *tie* no *software* Abaqus.

Entretanto, existe uma perda de eficiência na ligação da madeira com outros materiais que deve ser considerada para que a simulação possa corresponder à estrutura real (CAMPILHO *et al.*, 2009).

No estudo de Jesus, Pinto e Morais (2012), que visou determinar das tensões na interface entre o reforço de CFRP e a viga de madeira, os modelos com resultados menos satisfatórios foram os em que foi desconsiderado o atrito entre a madeira e o reforço. Nesse caso, o erro chegou a 42,4%. Foram elaborados modelos com diferentes coeficientes de atrito (0,01, 0,02, 0,035 e 1) e os distantes de 1 apresentaram um erro máximo de 1,7%. Os autores destacaram que o fato dos modelos analíticos negligenciarem as deformações por cisalhamento, há a tendência de apresentarem resultados mais conservadores.

A pesquisa de Corradi *et al.* (2016) adotou um coeficiente de atrito de 0,4 para analisar a ligação entre viga de madeira reforçada com GFRP. Essa consideração também foi realizada por Iraola e Cabrero (2016) e Fajdiga *et al.* (2019).

Dias *et al.* (2010) apresentaram uma estratégia de modelagem para simular conexões de madeira com pinos metálicos. Foi desenvolvido um novo comportamento elastoplástico, com base no critério de Hill, propondo melhorias para os métodos anteriormente apresentados. O contato madeira-aço adotado foi por meio de um coeficiente de atrito de 0,5. O modelo elaborado foi capaz de prever o comportamento de três diferentes espécies de madeira selecionadas (duas coníferas e uma folhosa). Foi observado que as deformações na ligação são significativamente influenciadas pela não-linearidade da madeira, mesmo em níveis de solicitação em que comumente são analisadas como lineares, sendo mais evidente em conexões com menor rigidez inicial.

Oudjene *et al.* (2010) analisaram uma emenda de viga utilizando cavilha. O contato foi simulado com um coeficiente de atrito de 0,1. O modelo elaborado reproduziu com precisão o modo de falha observado experimentalmente.

Yu, Yang e Law (2021) estudaram a ligação viga-pilar por entalhe, sem conectores mecânicos. Guan, Kitamori e Komatsu (2008) analisaram ligações viga-

pilar com diferentes configurações. As tensões na região da ligação costumam ser críticas e difíceis de se analisar por métodos tradicionais.

Burdzik e Skorpen (2016), Koshcheev *et al.* (2018), Xue *et al.* (2020), Basterrechea-Arévalo *et al.* (2021), e Patalas, Karolak e Nowak (2022) realizaram análises utilizando elementos de aço reforçando estruturas de madeira, apresentando dados relevantes para sua simulação numérica.

Basterrechea-Arévalo *et al.* (2021) estudaram a ligação viga-pilar com pinos metálicos, com principal interesse na rigidez, na falha, atrito e distribuição da carga nos pinos. O coeficiente de atrito adotado na interface aço-madeira foi de 0,3 e de 1 para madeira-madeira. Os autores observaram que o aperto da instalação dos pinos confere uma rigidez adicional que deve ser considerada para validação do modelo numérico. Em situação de projeto, essa consideração pode acarretar em análises menos conservadoras. A análise numérica permitiu aos autores observarem que o padrão de distribuição das cargas nos pinos é diferente dos padrões estabelecidos em modelos analíticos.

Com principal objetivo em avaliar a rigidez e capacidade de carga do conjunto, Patalas, Karolak e Nowak (2022) pesquisaram as variações de emendas contínuas de vigas de madeira. As emendas foram compostas por diferentes entalhes e variações de reforço com chapas de aço parafusadas. O coeficiente de atrito variou conforme o material, sendo 0,5 para madeira-madeira, 0,3 para madeira-aço e 0,2 para aço-aço. Oudjene *et al.* (2018) adotaram 0,2 como valor do coeficiente de atrito entre a viga de madeira e parafusos.

Xue *et al.* (2020) analisaram o desempenho sísmico de conexões viga-pilar reforçadas com elementos de aço, observando os principais parâmetros que influenciam o comportamento da ligação. O coeficiente de atrito madeira-madeira foi de 0,35 e 0,2 para madeira-aço, com os resultados validados experimentalmente.

### **3.2.6 Conclusão da revisão sistemática**

O MEF é vastamente utilizado para análises envolvendo estruturas de madeira, porém alguns obstáculos como a variabilidade da geometria e de suas propriedades físicas, bem como a dificuldade em mensurar essas informações, tornam a análise desse material uma atividade mais hercúlea. Desse modo, os

pesquisadores da área realizam simplificações dos modelos, como a consideração de material ortotrópico – havendo ainda autores que considerem o comportamento isotrópico – e homogêneo, para que se possa realizar as simulações numéricas.

Entretanto, essas considerações resultam em erros nos resultados das simulações quando comparados com ensaios experimentais. Essa variação é inerente aos processos desenvolvidos para avaliar o material, visto que os próprios ensaios em laboratório possuem incertezas associadas. Desse modo, alguns artigos resultaram em simulações com altas taxas de erros, chegando a 42,4%. Porém a maioria dos trabalhos que informaram o erro encontrado em suas simulações relata que este não passou de 5%.

Os deslocamentos observados experimentalmente são comumente utilizados para validação do modelo numérico, sendo uma verificação recomendada para validação desse tipo de simulação (KUNECKÝ *et al.*, 2015).

Observa-se que a análise de vigas de madeira dentro do regime elástico é operacionalmente menos complexa do que uma análise não-linear, permitindo a avaliação adequada da estrutura em uma situação de projeto em serviço.

Algumas lacunas puderam ser observadas. A interação com outros materiais é abordada por alguns autores, porém uma determinação do coeficiente de atrito ou da correta consideração de adesivos de fixação ainda carecem de maiores contribuições. O estudo de elementos com grandes descontinuidades, como aberturas em vigas, também é pouco explorado. Um estudo sobre o refinamento da malha e distância do início do refinamento até a descontinuidade podem conduzir resultados mais próximos do real, sendo de grande importância para aplicações práticas.

### 3.3 CONCLUSÃO DAS REVISÕES DE LITERATURA

As revisões realizadas tiveram como interesse compreender o estado da arte nos temas pesquisados, visando fornecer subsídios para análises de vigas de madeira com reforço, em especial às utilizadas em construções históricas.

O percentual de artigos incluídos nas revisões é consideravelmente inferior aos resultados coletados nos bancos de dados. Isso se deve ao fato de que os termos presentes nas *strings* podem ser mencionados em regiões do texto, como resumo, porém não necessariamente a pesquisa é sobre eles. Na primeira revisão, sobre

recuperação de estruturas de madeira em patrimônios históricos, foram incluídos 3,4% dos registros coletados, totalizando 19 artigos. Na segunda, sobre simulação de vigas de madeira pelo método dos elementos finitos, 54 artigos foram incluídos, totalizando 6,7%.

O percentual da primeira revisão pode ser justificado pelo fato que muitos artigos que realizam diagnóstico de estruturas fazem comentários sobre recuperação, porém não realizam esse estudo. Isso faz com que o artigo seja incluído nos resultados coletados na base de dados e excluídos nos processos de leitura. Entretanto, as informações coletadas são consideradas significativas e permitiram compreender o atual estado do conhecimento em cada um dos temas de interesse.

Considerando que foram utilizadas três bases de dados, é comum de se obter alguns trabalhos iguais em mais de um banco de dados, sendo identificados inicialmente e excluídos da análise. Todos os percentuais citados foram calculados desconsiderando os trabalhos duplicados.

Destaca-se a diversidade de alternativas de recuperação para estruturas de madeira e o cuidado necessário para a realização de intervenções em construções de interesse histórico. A manutenção dos elementos existentes e adoção de materiais adicionais como reforço, explicitando a região original para quem estiver analisando o local, tem sido extensamente mais estudada na literatura do que as soluções que optam pela retirada dos materiais degradados. Além dos motivos já expostos, o interesse por esse estudo pode ocorrer também pelas limitações e especificidades de cada método, mesmo que todos acabem por possibilitar melhorias no desempenho estrutural.

Analisando os dados conjuntamente, observou-se que as propostas de recuperação as vigas de madeira dependem de grande esforço de engenharia diagnóstica para determinação das propriedades dos elementos deteriorados. A obtenção das relações constitutivas das espécies de madeira pode fornecer dados para a análise estrutural do reforço em situações de serviço (FAJDIGA *et al.*, 2019; ZHANG, *et al.*, 2015).

Tratando de construções históricas, a recuperação do elemento danificado é recomendada pela literatura especializada em detrimento da substituição, porém há uma dificuldade operacional na instrumentação das análises laboratoriais desses

elementos e uma impossibilidade de realização de ensaios destrutivos no local em virtude de estes descaracterizarem ainda mais o ambiente patrimonial.

Desse modo, a realização de ensaios não destrutivos e análise da estrutura via métodos computacionais se apresenta como uma solução viável para a preservação do patrimônio histórico. Entretanto ainda existem lacunas nas avaliações dos efeitos e aplicações de reforços em madeiras deterioradas, bem como existem diferentes propostas de análise via MEF que precisam de maiores estudos para se apresentarem como soluções definitivas.

Apesar do reforço com elementos colados na estrutura danificada apresentarem melhor eficiência na transmissão de esforços e, com isso, aproveitamento do reforço, alguns autores salientam que a condição da madeira é fator de preocupação na escolha do elemento de reforço, pois pode influenciar a eficiência do adesivo de fixação (ČEJKA *et al.*, 2015). Determinadas solicitações sofridas pela estrutura reforçada, como cargas térmicas, também podem diminuir a eficiência do adesivo utilizado.

Desse modo, a utilização de fixadores mecânicos como parafusos e pregos ainda é indispensável para a garantia de eficiência e durabilidade da estrutura. Poucos autores se dedicaram a estudar o tema e a simulação numérica do efeito de diferentes configurações de fixadores também é pouco explorada.

## **4 MÉTODO DE PESQUISA**

## 4 MÉTODO DE PESQUISA

O presente estudo foi realizado por meio de uma simulação paramétrica no *software* comercial de análise pelo método dos elementos finitos Abaqus. Conforme visto na Figura 15, o Abaqus é um *software* amplamente utilizado na área. Foram elaboradas vigas de madeira com seção transversal de 200 x 300 mm, com comprimento total de 6900 mm, biapoiadas com apoios previstos a uma distância de 300 mm da extremidade da viga, atendendo as dimensões de ensaio à flexão previstos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022).

A situação de carregamento foi definida para simular um ensaio de flexão à quatro pontos, conforme preconizado pelo documento normativo da *American Society for Testing and Materials* (ASTM) D198 (2015), dimensionada para atender o deslocamento máximo no Estado Limite de Serviço (ELS) de 31,5 mm (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2022). Desse modo, foram impostos os deslocamentos equivalentes de 27,39 mm nos pontos de aplicação das forças externas.

Foram realizadas análises lineares utilizando o *software* Abaqus visando compreender o comportamento dos elementos frente ao limite de utilização, conforme estudos já realizados por Casciati e Domaneschi (2007), Kim e Harries (2010), Nowak, Jasieńko e Czepizak (2013) e Wang (2022). Os resultados de interesse foram: a força resultante no ponto de aplicação do deslocamento e o deslocamento máximo obtido no centro da viga.

O reforço foi simulado com chapas de aço localizadas na região inferior central da viga, estando tracionada na simulação realizada. Essa escolha se deu para maior aproveitamento da capacidade de reforço da chapa, conforme observado por Jasieńko, Nowak e Czepizak (2010) e Lukin *et al.* (2021), uniformizando a solução para todos os modelos e verificando a capacidade de aumento de rigidez conforme cada variação de parâmetro.

Com os resultados das simulações, foi adotada a Equação 12 para obtenção do módulo de elasticidade apresentado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022) e a equação para obtenção do momento de inércia (Equação 13) para a obtenção da rigidez à flexão do conjunto estudado (Equação 14). A Equação

12 também foi utilizada por Isleyen e Kesik (2021) em seu estudo de restauração de vigas de madeira com CFRP.

$$E_M = \frac{(F_{50\%} - F_{10\%}) \cdot L^3}{(U_{50\%} - U_{10\%}) \cdot 4 \cdot b \cdot h^3} \quad \text{Eq. 12}$$

Onde  $E_M$  é o módulo de elasticidade à flexão, em MPa;  $F_{50\%}$  e  $F_{10\%}$  denotam, respectivamente, a metade e o décimo da força total obtida, em Newton;  $U_{50\%}$  e  $U_{10\%}$  denotam, respectivamente, a metade e o décimo do deslocamento máximo da viga, em mm;  $b$ ,  $h$  e  $L$  são as medidas da base e altura da seção transversal e o comprimento total da viga, respectivamente, em mm.

$$I_x = (\overline{I_{x,viga}} + A_{viga} \cdot d_{viga}^2) + (\overline{I_{x,chapa}} + A_{chapa} \cdot d_{chapa}^2) \quad \text{Eq. 13}$$

Onde  $I_x$  e  $\overline{I_x}$  denotam, respectivamente o momento de inércia do conjunto e de cada elemento isolado (viga e chapa), em mm<sup>4</sup>;  $A$  é a área da seção transversal de cada elemento, em mm<sup>2</sup>;  $d$  é a diferença entre o centro de gravidade (CG) do elemento isolado para o CG do conjunto, em mm.

$$(EI) = E_M \cdot I_x \quad \text{Eq. 14}$$

Onde  $(EI)$  denota a rigidez do conjunto, em N.mm<sup>2</sup>.

Para melhor descrever as etapas do estudo e os procedimentos adotados, esse capítulo é composto por dois subcapítulos: estudo paramétrico e simulação numérica. O subcapítulo de estudo paramétrico apresenta em detalhes as considerações e variações dos parâmetros adotados para a viga de madeira e para os elementos de reforço. O subcapítulo de simulação numérica ilustra como foram desenvolvidos os modelos e as configurações dentro do programa de análise por elementos finitos, bem como a validação e teste de malha realizado.

#### 4.1 ESTUDO PARAMÉTRICO

A configuração da viga teve o objetivo de atender os critérios apresentados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022) para madeiras folhosas. Para a realização do estudo paramétrico dos modelos com chapa de aço parafusada foram variados os parâmetros: classe de resistência da madeira conforme Tabela 1, quantidade e diâmetro dos parafusos e profundidade e localização do defeito da viga.

Considerando a dificuldade técnica para realizar uma caracterização completa de várias espécies de madeira, conforme observado por Dias *et al.* (2010), foram escolhidas espécies caracterizadas por outros pesquisadores para obtenção do módulo de elasticidade para cada classe de resistência. O Quadro 10 apresenta os dados obtidos da literatura. Destaca-se que os valores encontrados para as classes de resistência da madeira D20 e D60 diferem dos valores fornecidos pelo documento normativo brasileiro (Tabela 1) em 27% e 16% respectivamente. Os demais valores foram próximos aos previstos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022).

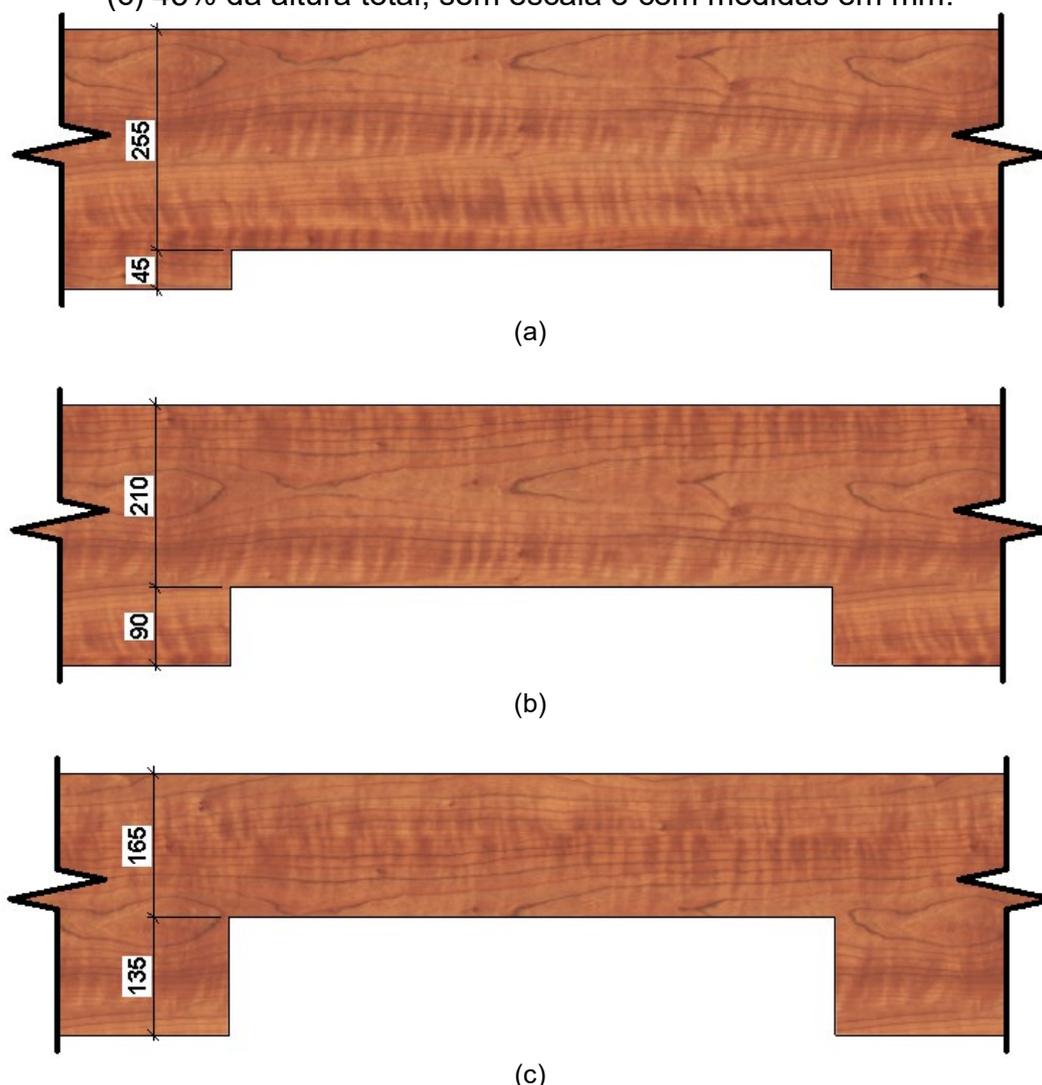
Quadro 10 – Espécies de madeira adotadas para cada classe de resistência

Classe de resistência	Espécie da madeira	Módulo de elasticidade (MPa)	Autores
D20	Paricá	7.320	Almeida <i>et al.</i> (2013)
D30	Angelim Araroba	12.167	Branco <i>et al.</i> (2014)
D40	Envira Branca	14.973	Christoforo <i>et al.</i> (2013)
D50	Canelão	15.355	Christoforo <i>et al.</i> (2013)
D60	Breu Vermelho	16.386	Christoforo <i>et al.</i> (2013)

Fonte: Autor (2022).

Os defeitos da madeira foram considerados na face inferior e superior do centro do vão da viga de forma prismática, sendo essa a região crítica do elemento na configuração proposta. Considerando a grande variedade de defeitos observados na revisão apresentada no Capítulo 3.1, foi definido um formato de abertura na viga sem transição geométrica na descontinuidade, adaptando o presente estudo à situação mais crítica. O comprimento longitudinal adotado para o defeito foi de 690 mm e transversalmente variou entre 45, 90 e 135 mm. Desse modo, o comprimento do defeito correspondeu a 10% do comprimento e a variação transversal foi de 15%, 30% e 45%. A Figura 17 ilustra a região central da viga com perda de seção nas fibras inferiores. Destaca-se que foram simuladas as mesmas perdas de seção nas fibras superiores.

Figura 17 – Região com perda de seção na área tracionada de (a) 15%; (b) 30%; e (c) 45% da altura total, sem escala e com medidas em mm.



Fonte: Autor (2022).

A chapa de aço foi prevista com módulo de elasticidade de 210 GPa (BASTERRECHEA-ARÉVALO *et al.*, 2021; OUDJENE *et al.*, 2018), espessura de 9,5 mm, comprimento de 1530 mm e largura de 200 mm. Essas dimensões foram determinadas para atender a espessura comercial e o comprimento mínimo necessário para fixação de seis parafusos de 15,9 mm divididos em dois grupos entre o defeito de 690 mm previsto e a largura corresponde à medida da base da viga.

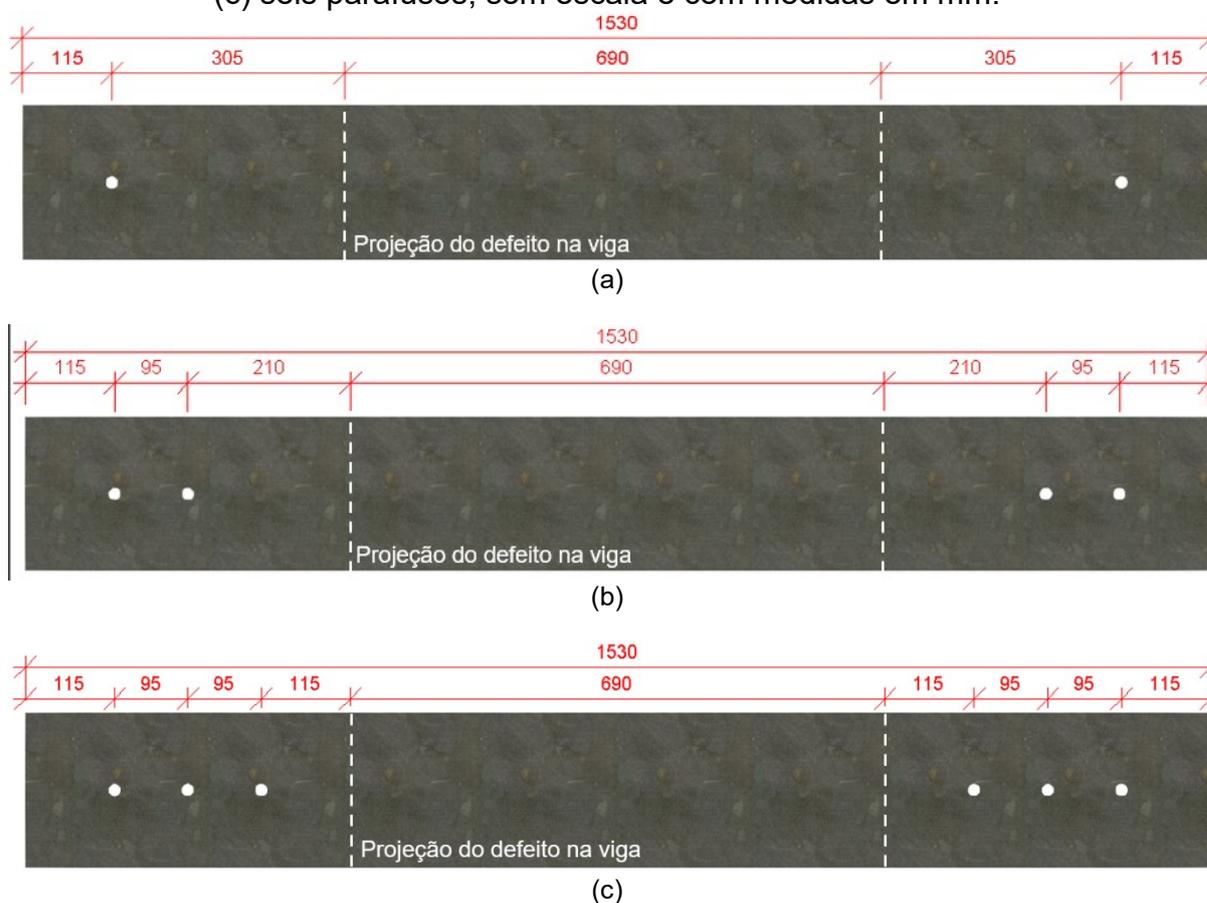
Os parafusos foram previstos com fixação alinhada no eixo da seção transversal, seguindo o modelo estudado por Burdzik e Skorpen (2016), sendo considerados com diâmetros comerciais de 12,7 mm e 15,9 mm, variando em

quantidade de 2, 4 e 6 parafusos com comprimento suficiente para transpassar a seção da viga, com módulo de elasticidade similar ao da chapa.

A fixação do reforço na região inferior da viga apresenta ainda benefícios ao, conforme apresentado por Corradi *et al.* (2016), contribui para que não ocorra ruptura à tração, tipicamente frágil na madeira. Outras formas de fixação da chapa de aço (nas regiões laterais e superiores) geralmente são de difícil execução pela falta de espaço para trabalho e utilização de ferramentas, bem como a presença de outros elementos originais ligados à viga de interesse.

Visando garantir maior rigidez ao utilizar a chapa de aço parafusada (LI *et al.*, 2021; WASEEM; MANZOOR; BHAT, 2022), o espaçamento entre parafusos foi determinado para atender o valor mínimo preconizado pelo documento normativo brasileiro. A distância entre a borda da chapa ao defeito foi de 115 mm e entre os parafusos foi de 95 mm. A Figura 18 apresenta com detalhes as dimensões e localização dos furos das chapas utilizadas nos modelos.

Figura 18 – Detalhe da chapa de aço para (a) dois parafusos, (b) quatro parafusos e (c) seis parafusos, sem escala e com medidas em mm.

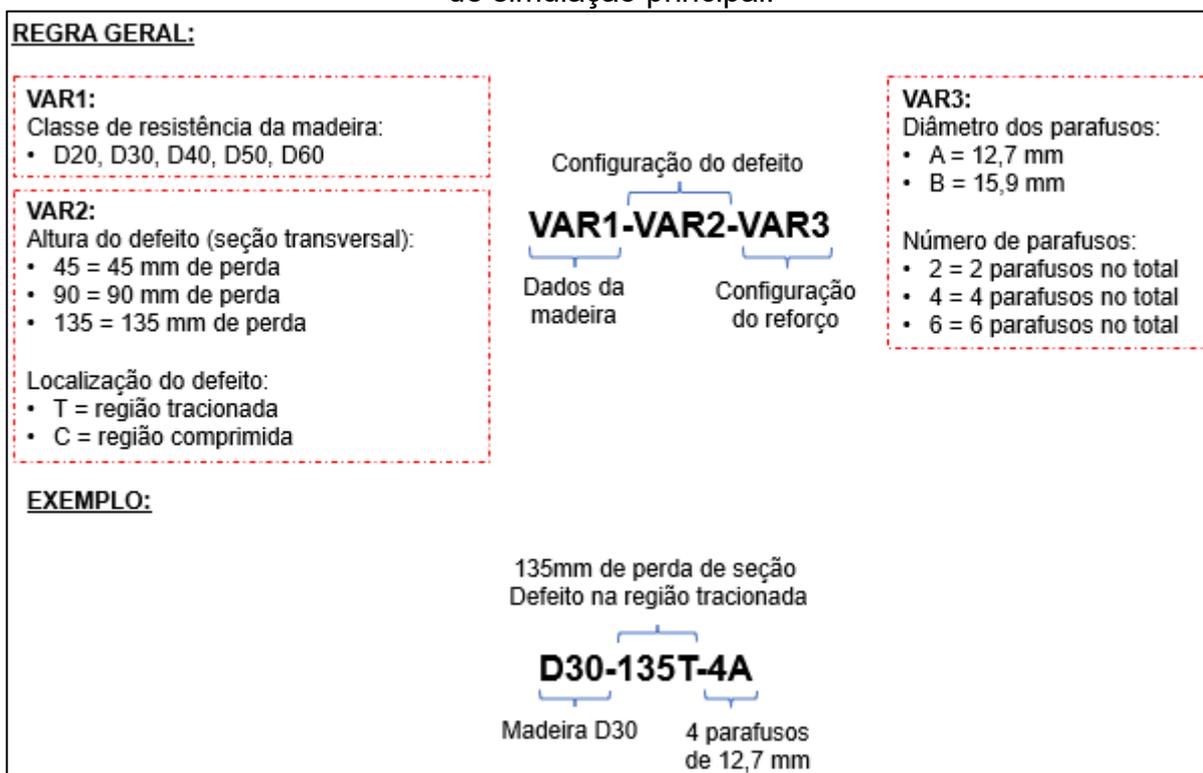


Fonte: Autor (2022).

O CFRP foi modelado com as mesmas dimensões da chapa de aço, apesar de não ser uma geometria usual, essa configuração foi escolhida para uniformizar os parâmetros de análise durante a simulação numérica. O módulo de elasticidade adotado para o CFRP foi de 240 GPa, conforme obtido no estudo de Fawzia, Al-Mahaidi e Zhao (2006) Schober *et al.* (2015). Para comparar e destacar os efeitos da utilização de conectores mecânicos, o CFRP foi considerado totalmente aderido à madeira para os fins desse estudo, visando o comportamento ideal do adesivo epóxi de fixação (ISLAM *et al.*, 2019; LIU; MA; HAN, 2020).

As simulações foram realizadas considerando dois grupos. O primeiro grupo, denominado como grupo principal, consiste nos modelos elaborados considerando as variações do defeito e do reforço. Para expressão dos resultados, foram definidos códigos alfanuméricos relacionando esses três tipos de variação. A Figura 19 ilustra o método adotado para definição dos códigos. Uma apresentação completa definindo os valores exatos para cada modelo é apresentado no Apêndice B. Ao total, o grupo principal foi composto por 215 modelos.

Figura 19 – Regra adotada para definição dos códigos alfanuméricos dos modelos de simulação principal.



Fonte: Autor (2022).

O segundo grupo foi denominado como grupo de comparação, sendo composto pelos modelos elaborados com reforço de CFRP. A definição do código alfanumérico foi realizada de forma similar ao apresentado na Figura 19, porém o valor de VAR3 passa a ser CFRP em todos os modelos. O Apêndice C apresenta a configuração exata de cada modelo com reforço de CFRP e sua respectiva identificação alfanumérica. O grupo de comparação foi composto por 30 modelos. Considerando todos os grupos que foram estudados, foram realizadas 245 simulações.

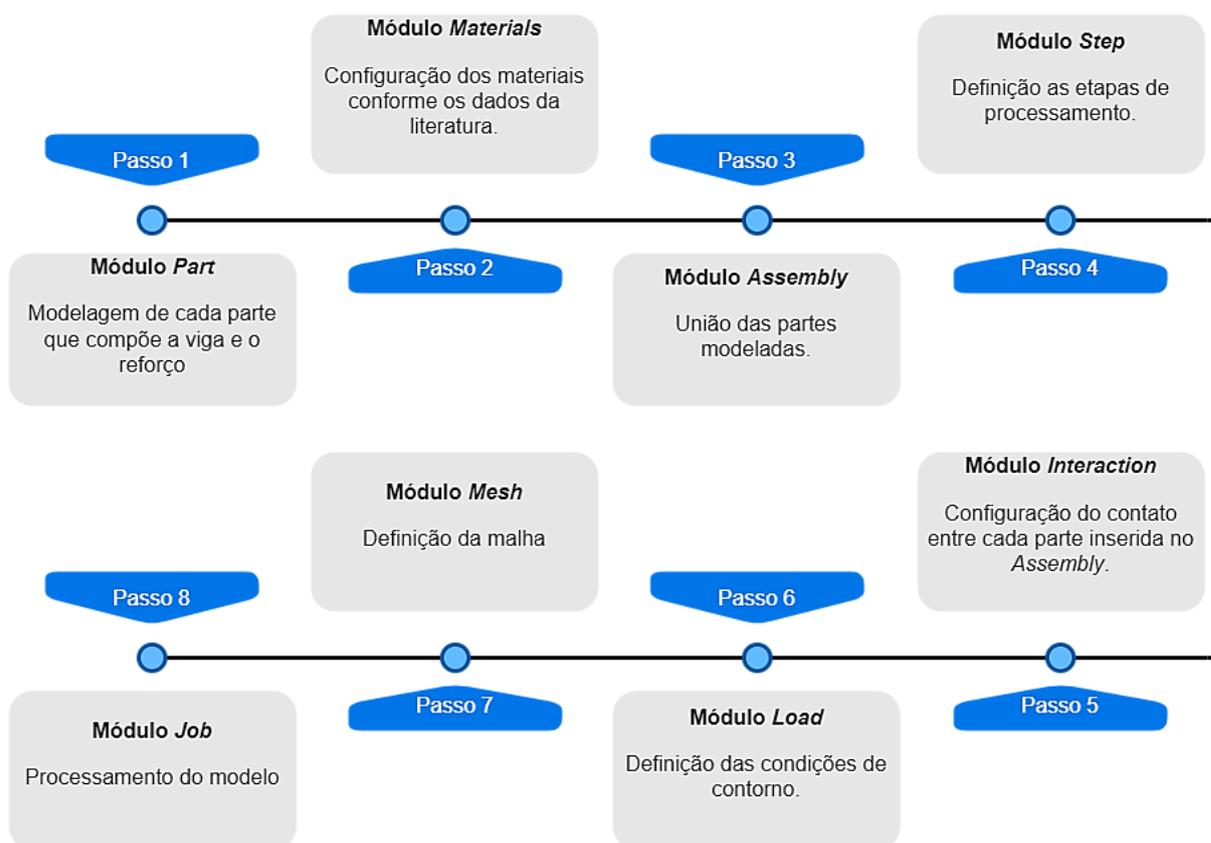
## **4.2 SIMULAÇÃO NUMÉRICA**

São apresentadas as duas etapas da configuração e processamento dos modelos no Abaqus: a elaboração dos modelos e configuração de simulação e a validação do modelo numérico e teste de malha. O processamento dos modelos foi precedido de um teste de malha para definição do tamanho dos elementos de forma otimizada, garantindo a validade da simulação e permitindo um tempo de processamento reduzido.

### **4.2.1 Elaboração dos modelos e configuração da simulação**

O processo geral de modelagem e configuração dentro do *software* Abaqus ocorreu conforme a Figura 20, iniciando pela modelagem de cada parte do modelo, definindo o critério dos materiais, unindo as partes, definindo as etapas de processamento, configurando o contato entre os elementos unidos, inserindo as condições de contorno, definindo a malha e processando.

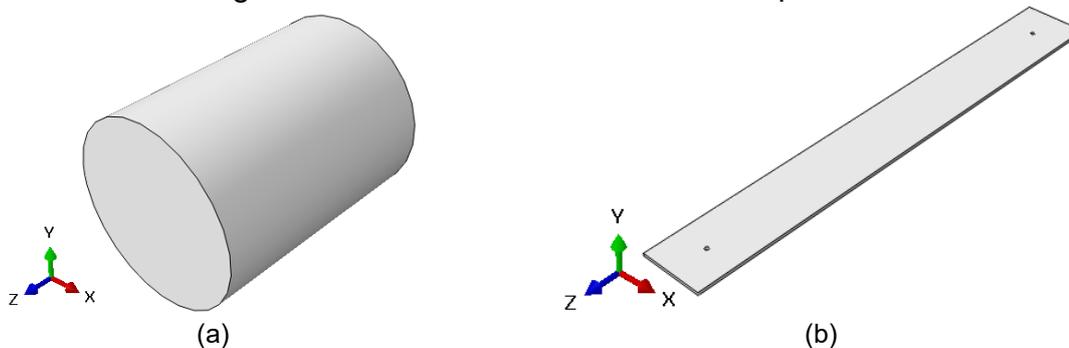
Figura 20 – Procedimento para modelagem e processamento no Abaqus.

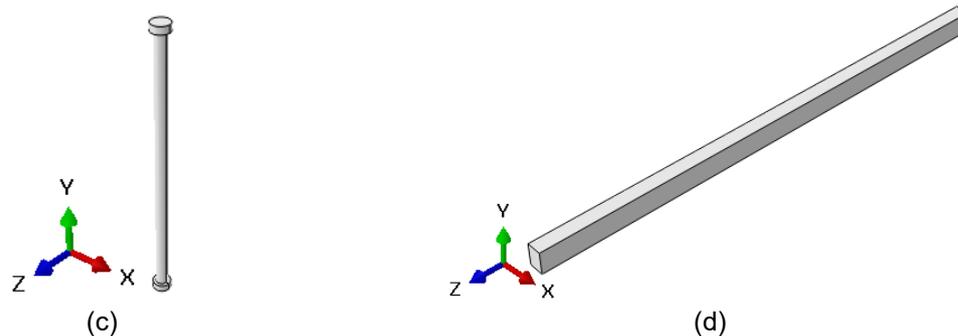


Fonte: Autor (2022).

A geometria dos modelos foi elaborada no módulo *Part* do Abaqus. Foram criadas quatro geometrias para a composição dos modelos que foram simulados: peça cilíndrica para ser utilizada como apoio e ponto de aplicação do deslocamento com 150 mm de diâmetro (Figura 21a), chapa conforme as informações apresentadas na Figura 18 (Figura 21b), parafuso (Figura 21c) e viga (Figura 21d).

Figura 21 – Geometrias criadas no Abaqus.



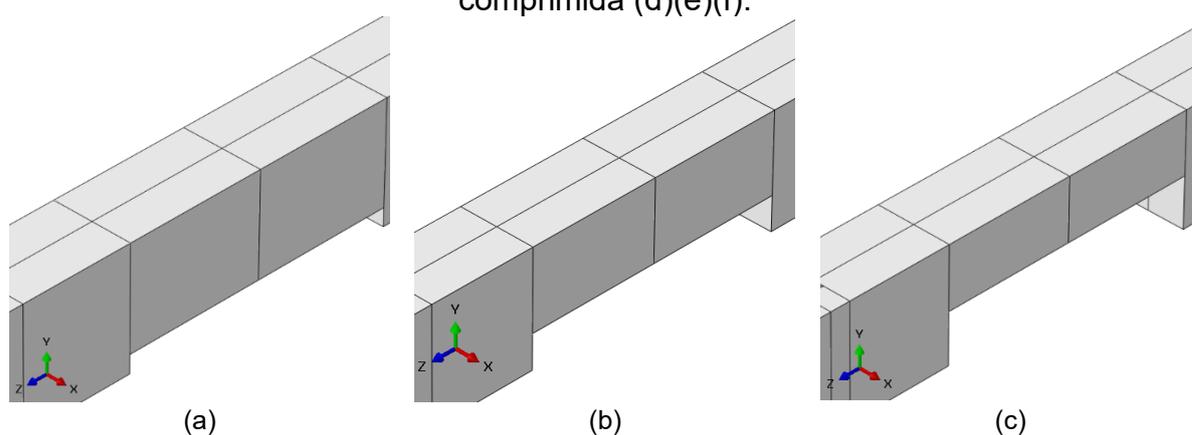


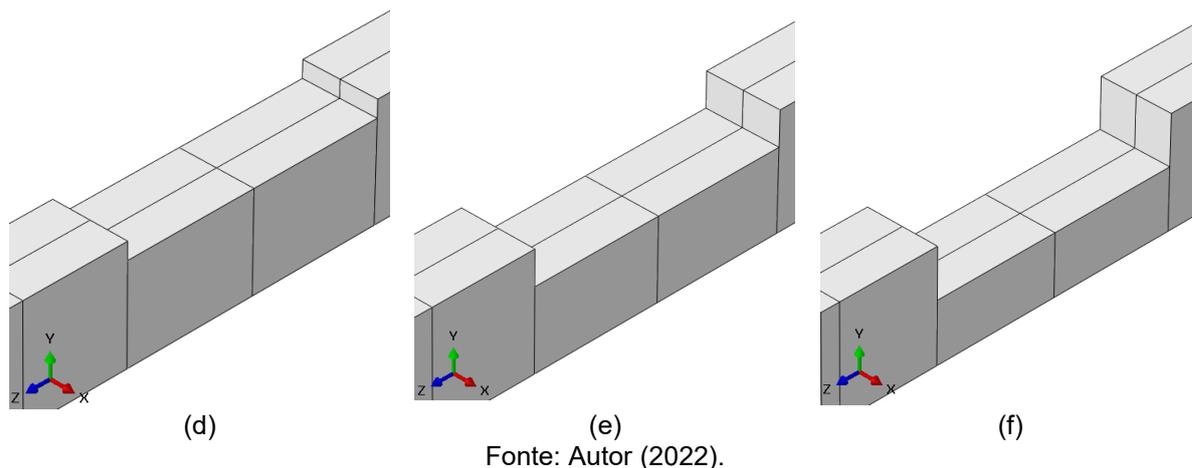
Fonte: Autor (2022).

Com objetivo de diminuir a quantidade de elementos no processamento, os apoios apresentados na Figura 21a foram definidos como elementos de casca, convertendo a geometria criada como sólido para casca por meio de um comando nativo do Abaqus. Por se tratar de um elemento de auxílio do processamento e que não será alvo de análises, o material foi considerado como de rigidez discreta para desconsiderar sua deformação (DASSAULT SYSTÈMES SIMULIA, 2011).

Os demais elementos foram criados como sólido. Os elementos de chapa e viga foram adaptados conforme a variação de parâmetros apresentados no Apêndice B. Foram criadas partições para facilitar a inserção dos furos e aberturas nas geometrias. A inserção das aberturas nas vigas (Figura 17) foi realizada por meio do comando *Partition cell* e o resultado é apresentado na Figura 22.

Figura 22 – Aberturas nas vigas na região tracionada (a)(b)(c) e na região comprimida (d)(e)(f).

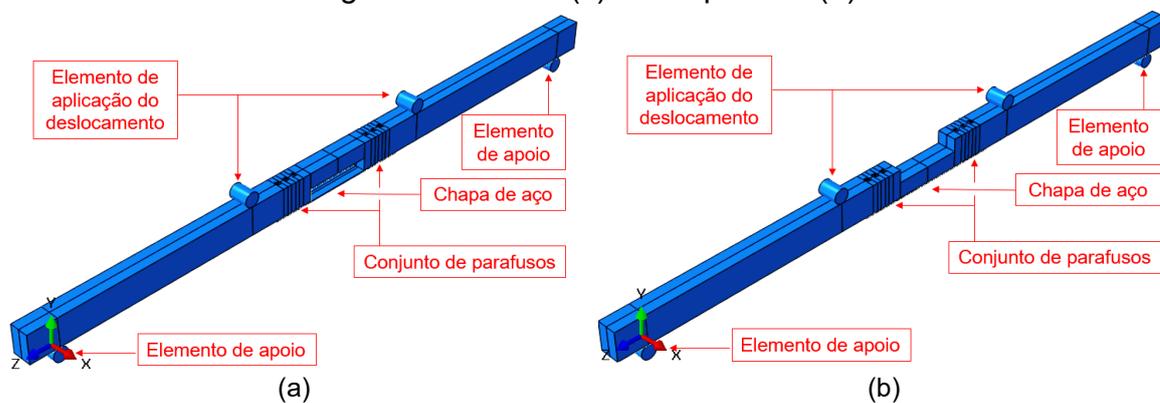


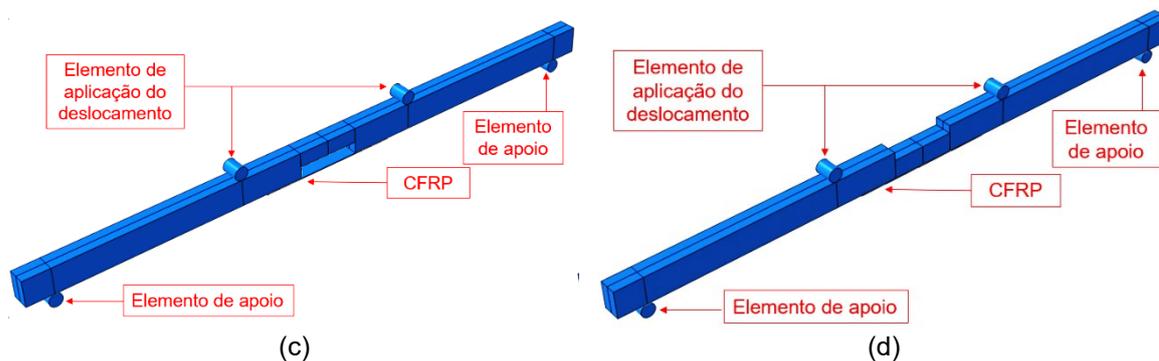


A configuração dos materiais foi realizada no módulo *Materials*, criando um material para cada espécie de madeira (Quadro 10), para o aço e o CFRP, conforme as propriedades informadas no início do Capítulo 4.

No módulo *Assembly* os elementos foram unidos conforme as configurações estabelecidas no Apêndice B e C. A Figura 23 apresenta os modelos completos das vigas com três parafusos em cada lado do reforço e modelos com CFRP.

Figura 23 – Modelos com reforço de chapa de aço parafusada com abertura na região tracionada (a) e comprimida (b) e com reforço de CFRP com abertura na região tracionada (c) e comprimida (d).





Fonte: Autor (2022).

As simulações foram realizadas em dois estágios de processamento, definidos no módulo *Step*: o inicial, onde o modelo será carregado com suas respectivas condições de contorno; e o de aplicação de deslocamento, onde será inserido o deslocamento configurado de forma incremental, por meio da configuração de tipo de passo *General Static* (DASSAULT SYSTEMES SIMULIA, 2011).

O critério de convergência adotado foi por incremento automático de deslocamento, com limite máximo de  $10^4$  incrementos de tamanho inicial de 0,001, máximo de 0,01 e mínimo de  $10^{-15}$ .

No módulo *Interaction* foram configurados dois tipos de contatos: por atrito e outro simulando aderência total. O contato por atrito foi configurado com duas propriedades de contato nativas do Abaqus: comportamento tangencial e normal. A propriedade de comportamento tangencial foi configurada com a formulação de fricção do tipo *Penalty* e um coeficiente de atrito de 0,4 adotado conforme a literatura (CORRADI *et al.*, 2016; FAJDIGA *et al.*, 2019; IRAOLA; CABRERO, 2016). O comportamento normal da interação foi configurado com a propriedade *Hard Contact*.

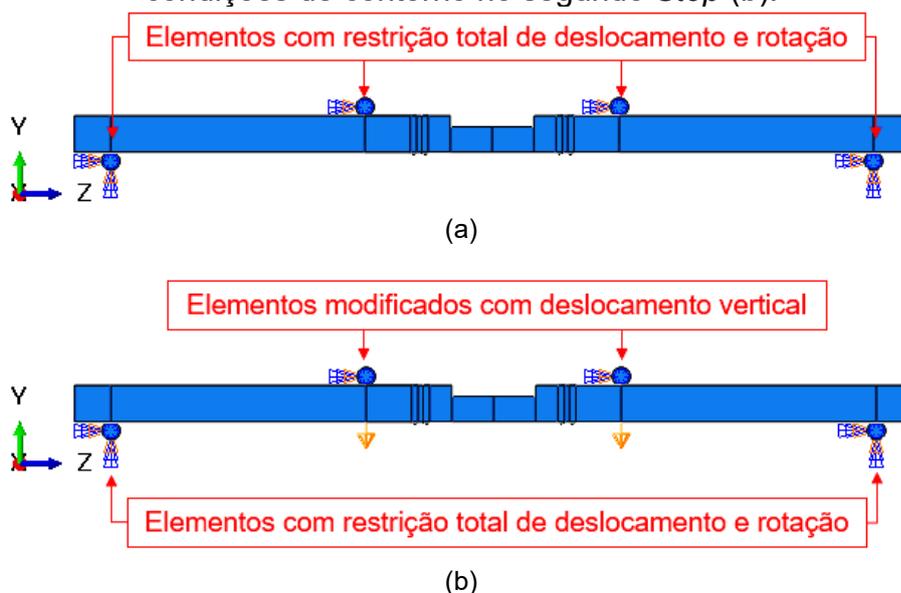
O elemento *tie* foi utilizado para o contato do CFRP com a viga de madeira, permanecendo utilizado o atrito como contato entre a viga e os elementos de apoio nesses modelos.

Nos modelos com reforço de chapa de aço parafusada, o contato por atrito foi configurado para todos os elementos (apoio, viga, chapa e parafusos), conforme observado na literatura (JESUS; PINTO; MORAIS, 2012). Nos modelos com reforço de CFRP, o contato entre os apoios e a viga foram configurados como atrito e o contato entre o CFRP e a viga foi configurado com o elemento *tie*, utilizado no estudo de Nowak, Jasieńko e Czepizak (2013).

Foram criadas duas condições de contorno no módulo *Load*: a primeira para travamento dos apoios e a segundo para inserção do deslocamento incremental. As condições de contorno podem ser inseridas ou ser modificadas em diferentes estágios do processamento (DASSAULT SYSTÈMES SIMULIA, 2011). Ambas foram criadas no *Step* inicial, porém o deslocamento incremental foi modificado no segundo *Step*.

O travamento dos apoios se deu ao restringir todos os seus deslocamentos e rotações. Os elementos utilizados para aplicar o deslocamento na viga foram restringidos de modo análogo aos elementos de apoio, porém foram modificados no segundo *Step*, onde foi inserido o deslocamento vertical. A Figura 24 apresenta graficamente a alteração das condições de contorno no decorrer da simulação.

Figura 24 – Condições de contorno carregadas no *Step* inicial (a) e modificação das condições de contorno no segundo *Step* (b).



Fonte: Autor (2022).

No módulo *Mesh* todos os elementos finitos e suas dimensões foram definidos. Nessa etapa foi realizado um teste de malha e validação do método de modelagem proposto. Os detalhes sobre essa etapa do estudo são apresentados no Capítulo 4.2.2.

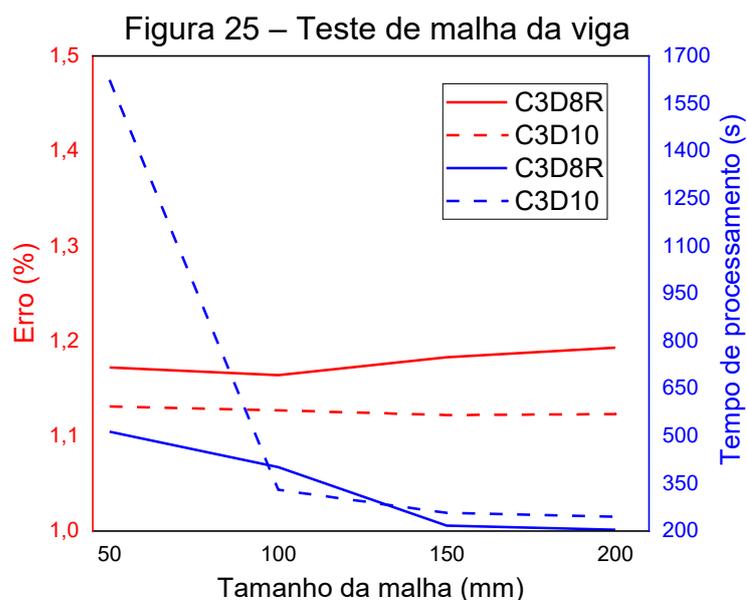
Como última etapa da configuração da simulação, foram definidos os parâmetros de processamento da estrutura. O processamento foi definido conforme a configuração padronizada do Abaqus, apenas otimizando o menu *Parallelization* para

permitir que o programa utilize todos os processadores lógicos do computador, agilizando o processamento.

#### 4.2.2 Validação do modelo numérico e teste de malha

Cada elemento da simulação foi validado isoladamente, sendo comparados os resultados de deslocamentos obtidos no Abaqus com seus respectivos resultados analíticos de 31,5 mm no centro do vão, variando o tipo e tamanho da malha, sendo um método de validação encontrado na literatura (KUNECKÝ *et al.*, 2015). Todos os componentes foram simulados como elementos sólidos com malhas hexaédricas de oito nós (C3D8R) e tetraédricas (C3D10), variando o tamanho dos elementos.

Considerando o limite apresentado em Kim e Harries (2010), a malha deve se aproximar de 1,4% do comprimento da viga, correspondendo a 96,6 mm. Desse modo, o teste de malha foi definido com elementos próximos a esse valor, sendo adotados 50 mm, 100 mm, 150 mm e 200 mm. Destaca-se que esses valores são superiores ao comumente encontrado na literatura (Figura 16), porém o comprimento da viga simulada é consideravelmente superior ao mencionado na literatura. O erro e o tempo de processamento encontrados no teste de malha da viga são apresentados na Figura 25.



Fonte: Autor (2022).

Observa-se que o erro encontrado em todas as simulações foi inferior a 1,2%, sendo um resultado condizente com o observado na literatura. Na revisão apresentada no Capítulo 3.2, 53% dos artigos reportaram que encontraram um erro de até 5%, destes, 33% apresentam um erro de até 2%. Desse modo, qualquer tipo de elemento e geometria foram considerados válidos para reproduzir o comportamento de vigas de madeira submetidas à flexão de quatro pontos.

Entretanto, a malha tetraédrica (C3D10) apresentou um comportamento ligeiramente superior à hexaédrica (C3D8R). A diferença entre o erro das malhas foi de 0,04%, 0,04%, 0,06% e 0,07% para os tamanhos de 50 mm, 100 mm, 150 mm e 200 mm, respectivamente. Apesar da pequena diferença, as malhas com 50 mm e 100 mm apresentam os resultados mais próximos entre a C3D10 e a C3D8R.

Analisando o tempo de processamento, a malha tetraédrica demorou consideravelmente mais para realizar a simulação, em especial para a malha de 50 mm. Há uma aproximação entre os resultados na malha de 100 mm, porém, considerando a necessidade de densificação da malha em regiões descontínuas, o tempo de processamento em elementos com um maior número de nós tende a aumentar. Considerando os resultados do teste de malha, foi definida a utilização do elemento C3D8R com de tamanho 100 mm. A definição da malha é apresentada na Figura 26.

Figura 26 – Viga com a malha definida



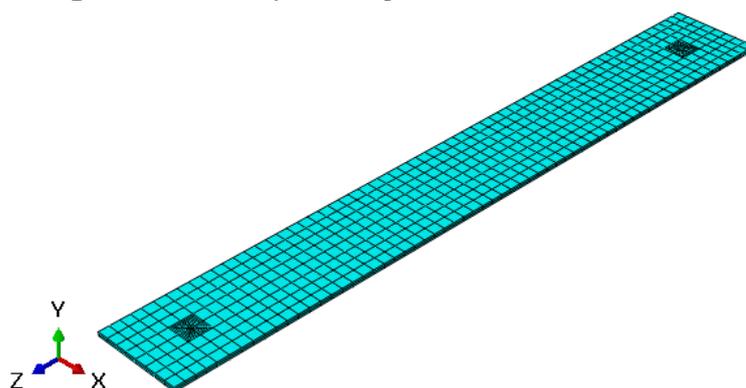
Fonte: Autor (2022).

Nas regiões com discontinuidades geométricas (furo dos parafusos e abertura central) a malha foi densificada para obter resultados mais precisos, considerando a alteração do fluxo de tensão. Essa estratégia é extensamente

recomendada pela literatura (KUNECKÝ *et al.*, 2015; OUDJENE *et al.*, 2018; TOUSSAINT *et al.*, 2016). Na região central da viga, entre os elementos de aplicação de deslocamento, onde ficaram previstas as instalações dos parafusos e da abertura, a malha da viga foi diminuída em quatro vezes (KHORSANDNIA; VALIPOUR; CREWS, 2013), resultando em elementos com 25 mm.

O teste de malha da chapa de aço foi realizado com elementos de 10, 25 e 50 mm e a validação se deu em comparação com o modelo analítico da chapa submetida à tração, comparando o deslocamento encontrado. Todos os resultados numéricos apresentaram diferenças abaixo de 0,5% em relação ao analítico, convergindo a partir dos elementos de 25 mm. Desse modo, foi escolhida a configuração de malha hexaédrica com 25 mm. Na região do furo, a malha foi refinada com elementos de 5 mm (Figura 27).

Figura 27 – Chapa de aço com a malha definida



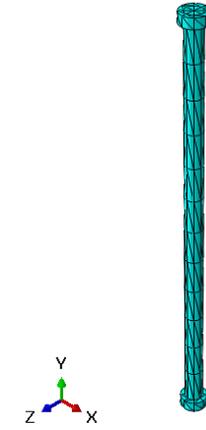
Fonte: Autor (2022).

O CFRP foi simulado com as mesmas configurações que a chapa de aço, obtendo resultados similares. Dessa forma, foi utilizada uma malha hexaédrica com 25 mm nas modelagens do reforço.

O parafuso foi testado com elementos de 20, 10 e 5 mm e a validação ocorreu de forma análoga à chapa. Foi verificado que o uso de elementos tetraédricos com 20 mm resultou em um comportamento mais próximo ao obtido analiticamente, com uma diferença pouco significativa em relação aos demais tamanhos de mesma geometria em referência ao modelo analítico (2,53%) e com melhor tempo de processamento, sendo adotado para o prosseguimento do estudo. Os elementos

hexaédricos apresentaram diferenças de até 9,71% em relação ao analítico. A Figura 28 ilustra a malha definida para o parafuso.

Figura 28 – Parafuso com a malha definida



Fonte: Autor (2022).

## **5 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

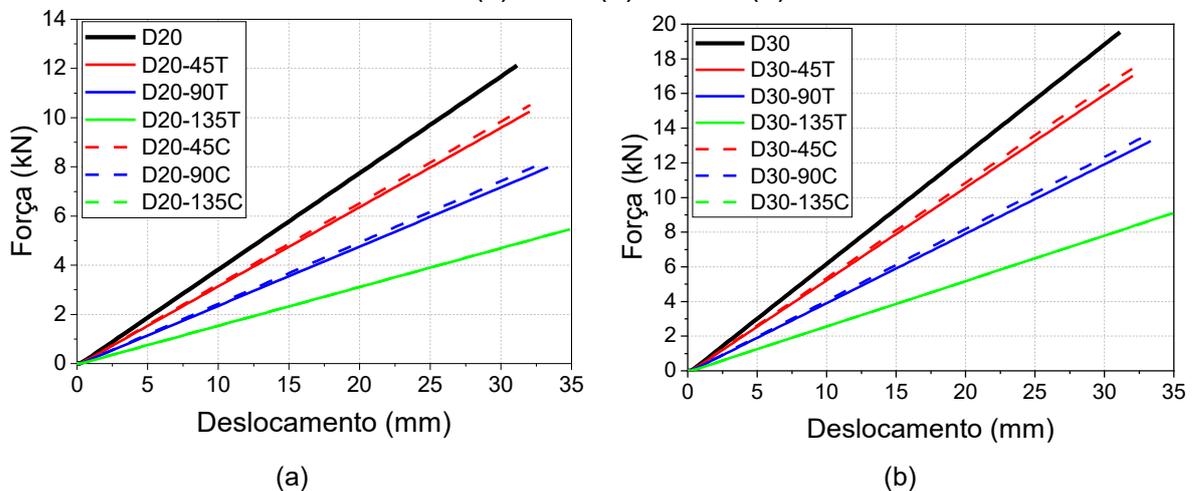
## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

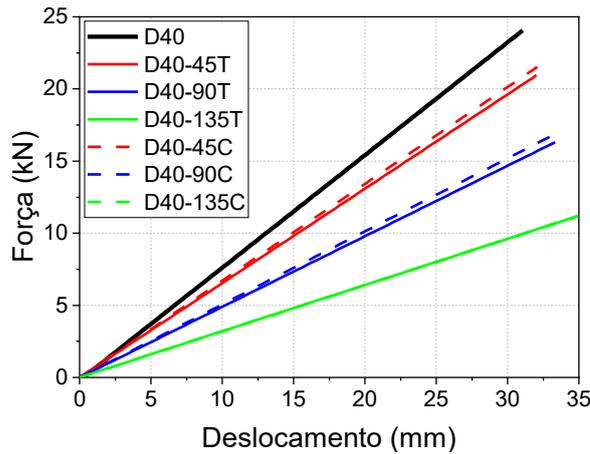
Neste capítulo estão apresentados os resultados obtidos nas simulações realizadas, sendo exposto inicialmente um estudo sobre o efeito da perda de seção transversal no elemento e, posteriormente, a contribuição da utilização da chapa de aço com parafusos para o efeito da rigidez à flexão, os resultados das simulações utilizando CFRP e o desempenho dos parafusos na transmissão dos esforços à chapa.

### 5.1 COMPORTAMENTO DA VIGA COM PERDA DE SEÇÃO TRANSVERSAL

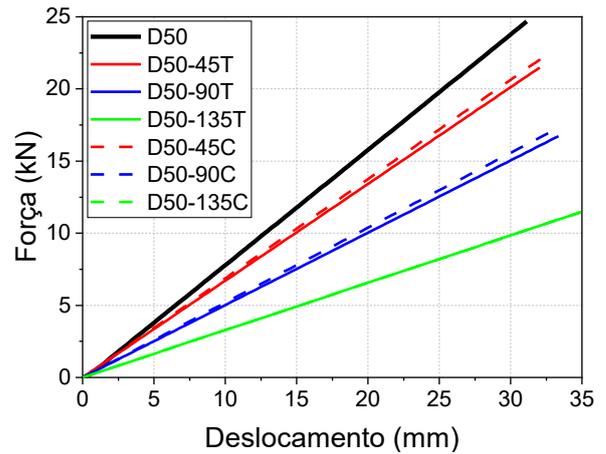
Visando conhecer o efeito da perda de seção transversal na rigidez da viga, foram simulados os modelos apresentados na Apêndice B, sem a consideração do reforço e sem a redução do módulo de elasticidade, e comparados com o modelo de referência, sem a consideração do defeito e do reforço, para cada classe de resistência. Os resultados foram sintetizados e estão apresentados na Figura 29.

Figura 29 – Resultados dos modelos com defeito para as classes D20 (a); D30 (b); D40 (c); D50 (d); e D60 (e)

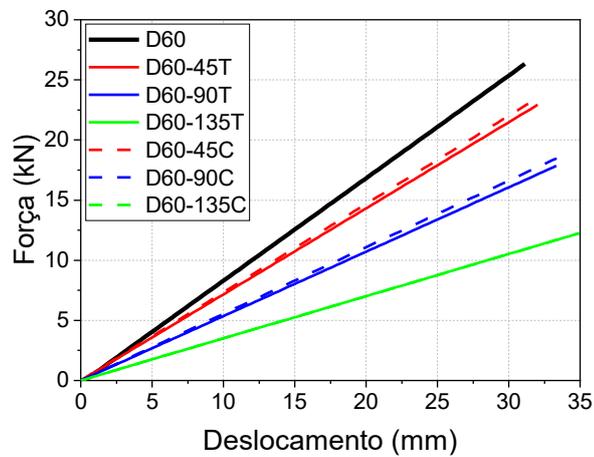




(c)



(d)

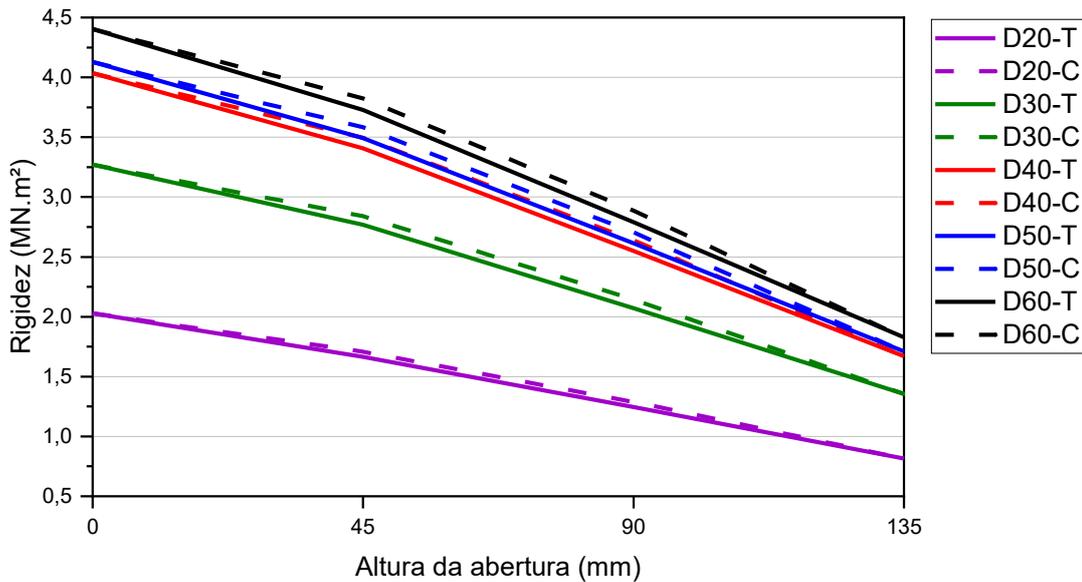


(e)

Fonte: Autor (2022).

Os modelos estudados simulando apenas os efeitos da perda de seção transversal apresentaram comportamento similar em todas as classes de resistência e não foi encontrada variação significativa entre os defeitos na face inferior e superior para uma área de seção perdida. A Figura 30 apresenta o gráfico da variação de rigidez desses modelos conforme o tamanho da abertura, iniciando pelo modelo de referência (sem defeitos). Os dados foram divididos por classe de resistência e região da abertura (T = tração e C = compressão).

Figura 30 – Variação da rigidez da viga nos modelos sem reforço



Fonte: Autor (2022).

Foi observado que nos modelos com 45 mm de perda de seção, a rigidez encontrada foi 14,7% inferior à viga referência. Por sua vez, nos modelos com 90 mm e 135 mm de perda de seção a rigidez foi, respectivamente, 36% e 59% inferior à referência. A região onde ocorre a perda de seção não foi um fator determinante para a perda de rigidez à flexão. Isso se deve ao fato de as perdas de seção possuírem as mesmas dimensões em ambas regiões, não alterando a rigidez do elemento. Entretanto uma pequena variação é observada nos modelos com aberturas de 45 mm e 90 mm na região tracionada, que influenciaram negativamente o comportamento da viga. Nos modelos com abertura de 135 mm a rigidez tendeu a se equivaler nos modelos com aberturas nas regiões tracionada e comprimida.

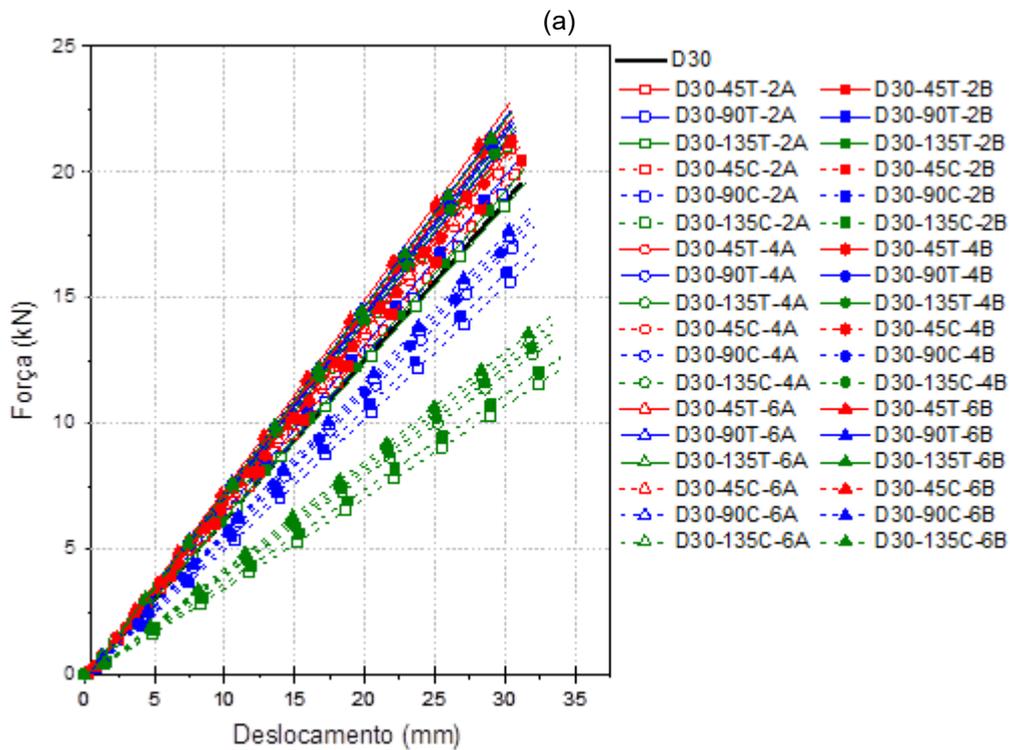
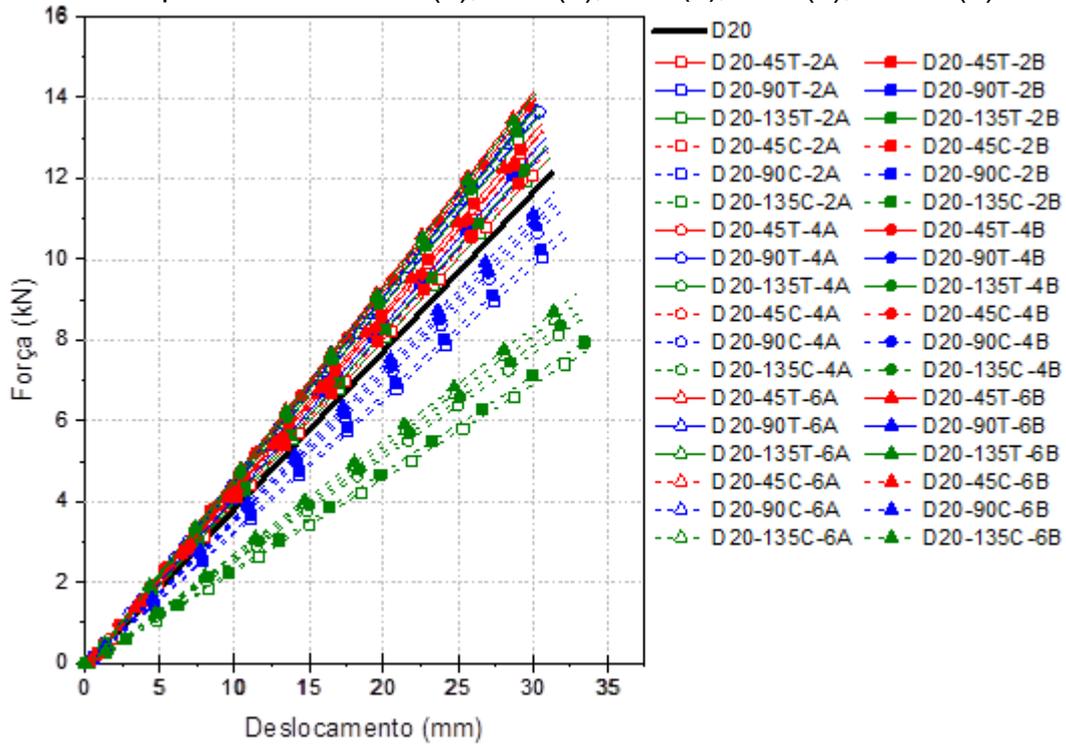
As classes D40, D50 e D60 apresentaram resultados com pouca variação entre si, com diferenças entre 7% e 9%. As variações mais expressivas entre as demais classes foram encontradas nas classes D20 e D30, com 40% e 19%, respectivamente, em relação à classe imediatamente superior.

## 5.2 COMPORTAMENTO DA VIGA COM PERDA DE SEÇÃO TRANSVERSAL E REFORÇO COM CHAPA DE AÇO FIXADA POR PARAFUSOS

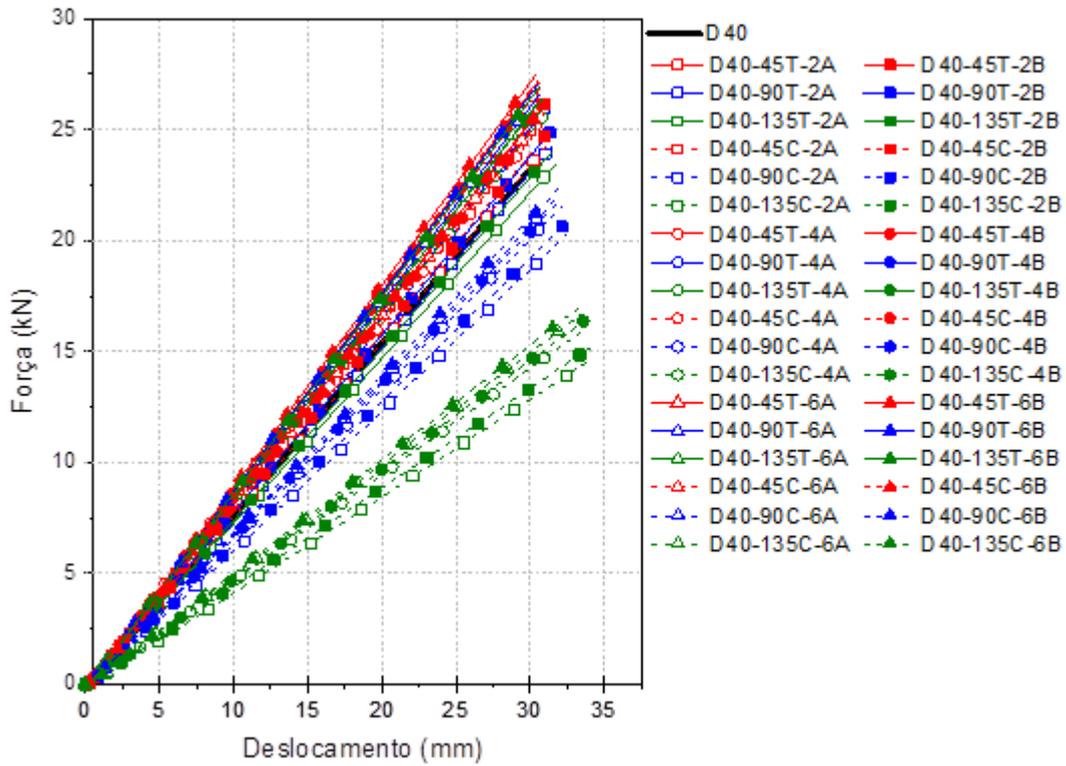
Os resultados dos modelos com chapa de aço fixada por parafusos, apresentados no Apêndice B, foram simulados e seus resultados estão apresentados

por classe de resistência da madeira sem a redução do módulo de elasticidade, na Figura 31.

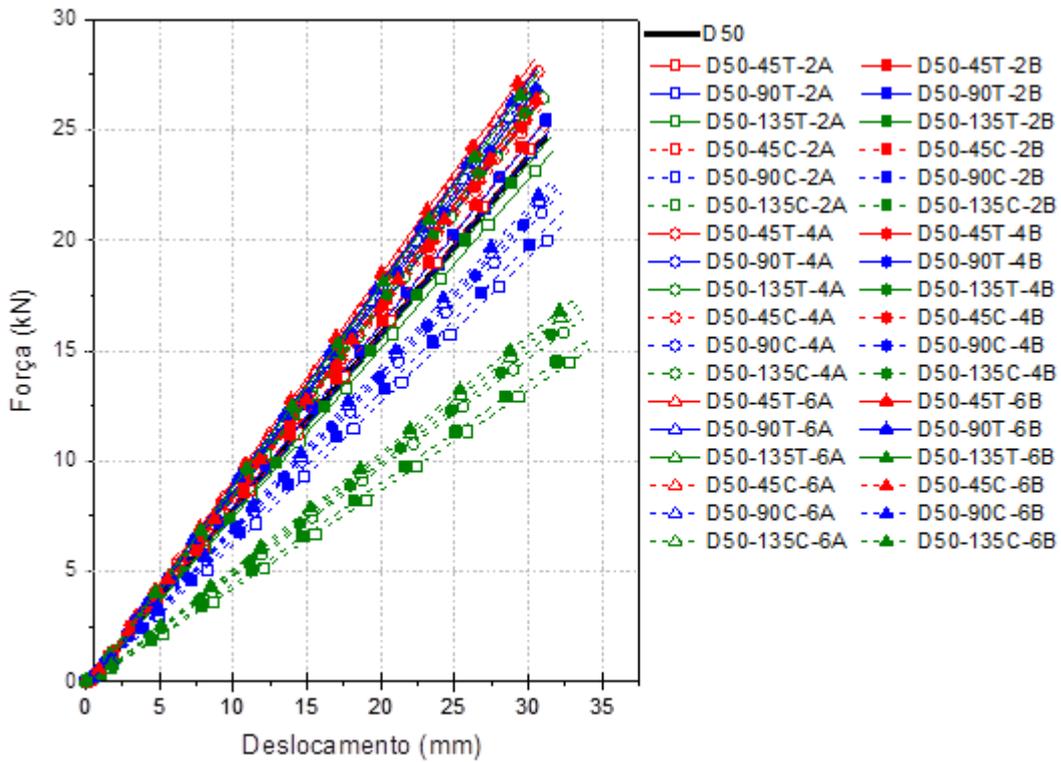
Figura 31 – Relação força-deslocamento dos modelos com chapa de aço parafusada para a classe D20 (a); D30 (b); D40 (c); D50 (d); e D60 (e)



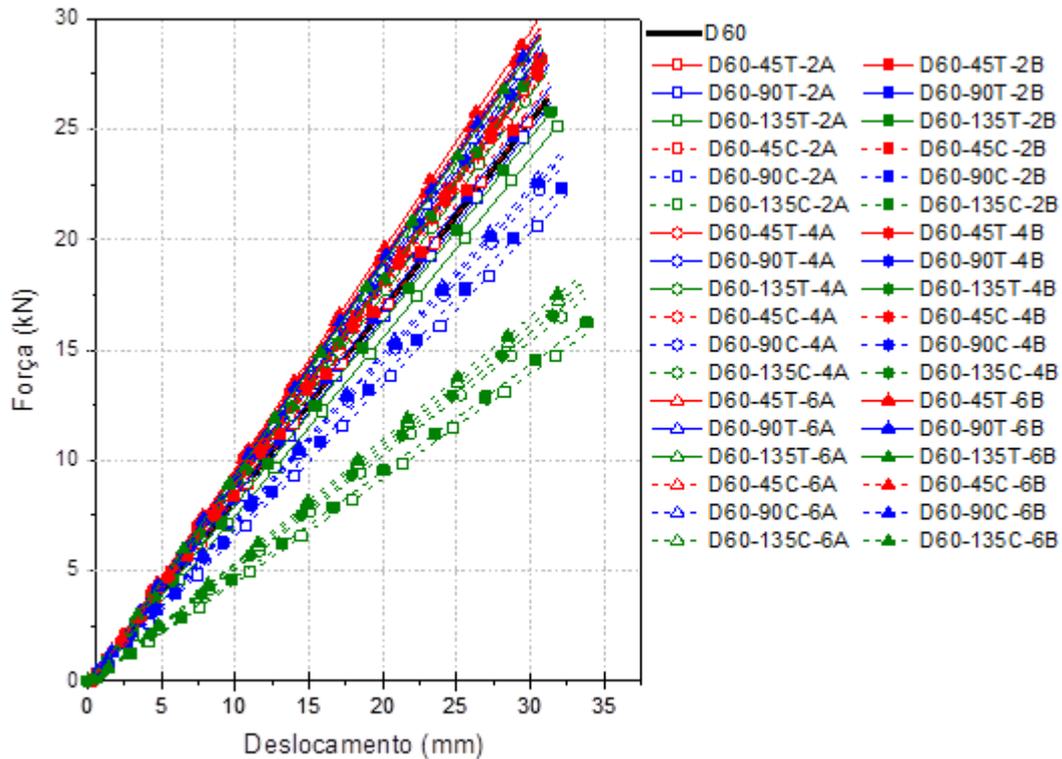
(b)



(c)



(d)



(e)

Fonte: Autor (2022).

Foi possível observar que a região onde o defeito se encontra nos modelos com chapa de aço, é um fator crítico no comportamento da viga. Efeito não encontrado nos modelos sem o reforço (Figura 29). Isso ocorreu pois, nos modelos com o defeito localizado na região de tração, a chapa de aço localizada na região inferior da viga permite a obtenção de um momento de inércia da seção maior do que a encontrada nos modelos com defeito na área originalmente comprimida da seção. Todos os modelos com 135 mm de altura de defeito, localizados na região superior da viga, não alcançaram o comportamento obtido no modelo de referência. Nesses modelos, o deslocamento não apresentou variação significativa, resultando em valores aproximadamente 10% superiores ao modelo de referência. A força máxima encontrada variou entre 60% (D60-135C-2A) e 76% (D20-135C-6B) da referência, sendo esse resultado mais crítico.

Nas simulações com 90 mm de altura do defeito localizado na região superior, os resultados de deslocamento foram equivalentes à referência. Por sua vez, os

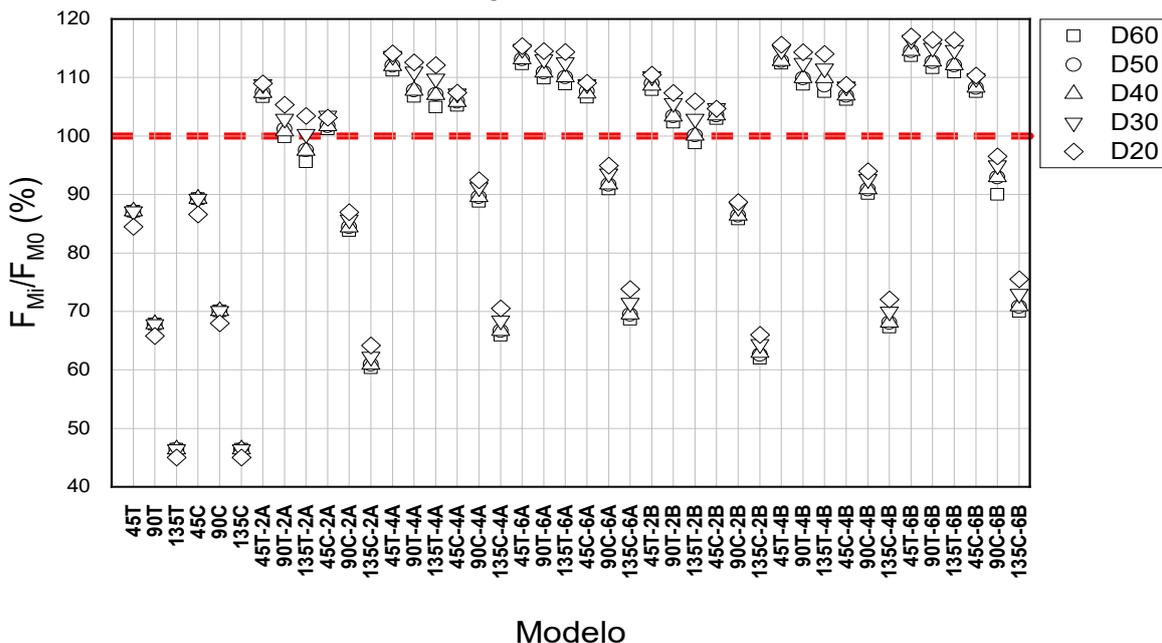
valores da força máxima obtidos não alcançaram o resultado da referência, chegando a ser 11% inferior no modelo D60-90C-6A.

Para a mesma região do defeito, os modelos com 45 mm de altura apresentaram resultados equivalentes à referência, com um desempenho ligeiramente superior quando se observou a força máxima obtida.

Todas as simulações realizadas com o defeito na região inferior da viga apresentaram resultados de deslocamento máximo e força máxima superiores ao modelo referência, resistindo a um maior carregamento e resultando em um menor deslocamento. Isso se deve à participação da chapa de aço no conjunto, atribuindo maior resistência à viga. Similar ao encontrado nos modelos sem o reforço, a variação dos resultados obtidos para as classes D40, D50 e D60 foi pouco significativa.

Após obtenção desses resultados, foi avaliada a capacidade de restauração de rigidez da viga. A Figura 32 apresenta os resultados da recuperação da capacidade de carga em todos os modelos estudados relacionando a força obtida em cada modelo ( $F_{Mi}$ ) com a força obtida no modelo inicial ( $F_{M0}$ ) em todas as classes de resistência, com seu resultado em percentual. Os resultados maiores que 100% apresentam os modelos que possuem capacidade de carga superior ao modelo referência quando aplicado o deslocamento equivalente.

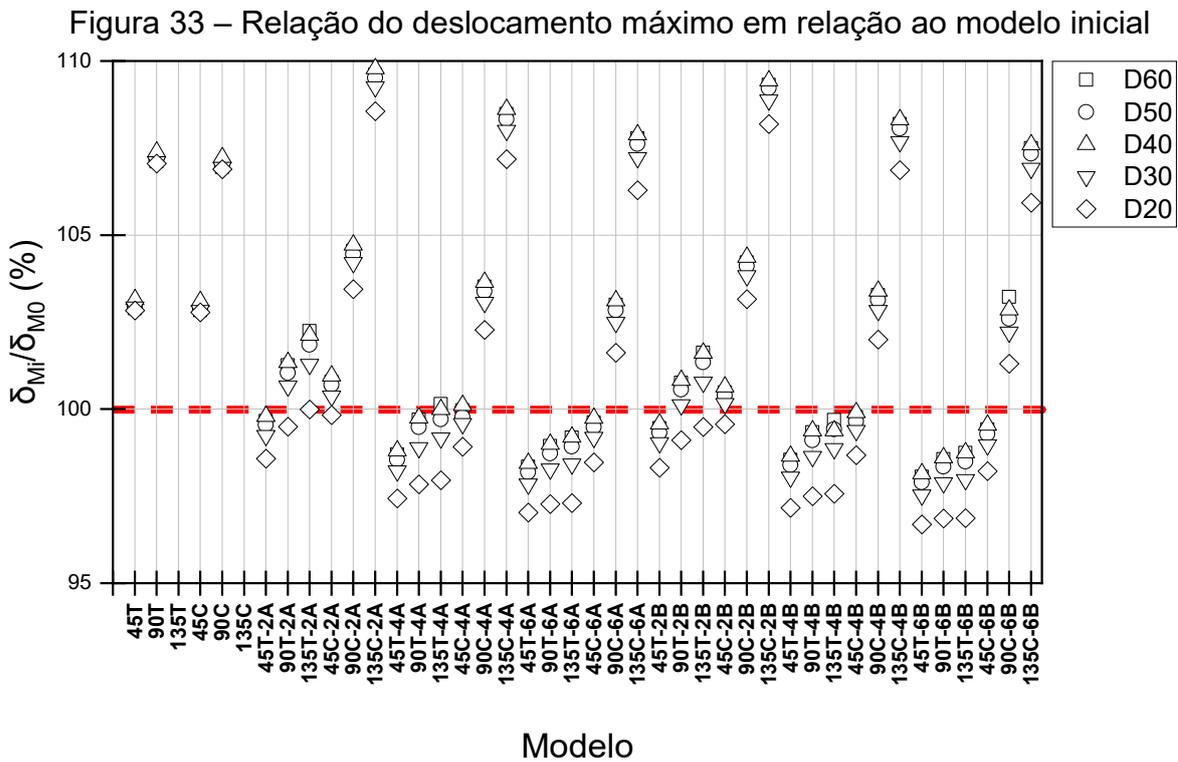
Figura 32 – Relação da força obtida no ponto de aplicação do deslocamento em relação ao modelo inicial



Fonte: Autor (2022).

Foi possível observar que todos os modelos com defeitos de 45 mm em ambas regiões e os modelos com 90 mm e 135 mm de defeito na região inferior apresentaram maior capacidade de suporte de carga que o modelo de referência. A variação da classe de resistência da madeira não afetou significativamente a força máxima encontrada nas simulações.

A Figura 33 apresenta a relação do deslocamento máximo obtido no centro da viga de cada modelo ( $\delta_{Mi}$ ) com o deslocamento máximo obtido no modelo inicial ( $\delta_{M0}$ ) em todas as classes de resistência, com seu resultado em percentual. Os modelos com resultados maiores que 100% apresentam deslocamento superior ao modelo M0 quando aplicado o deslocamento equivalente.



Fonte: Autor (2022).

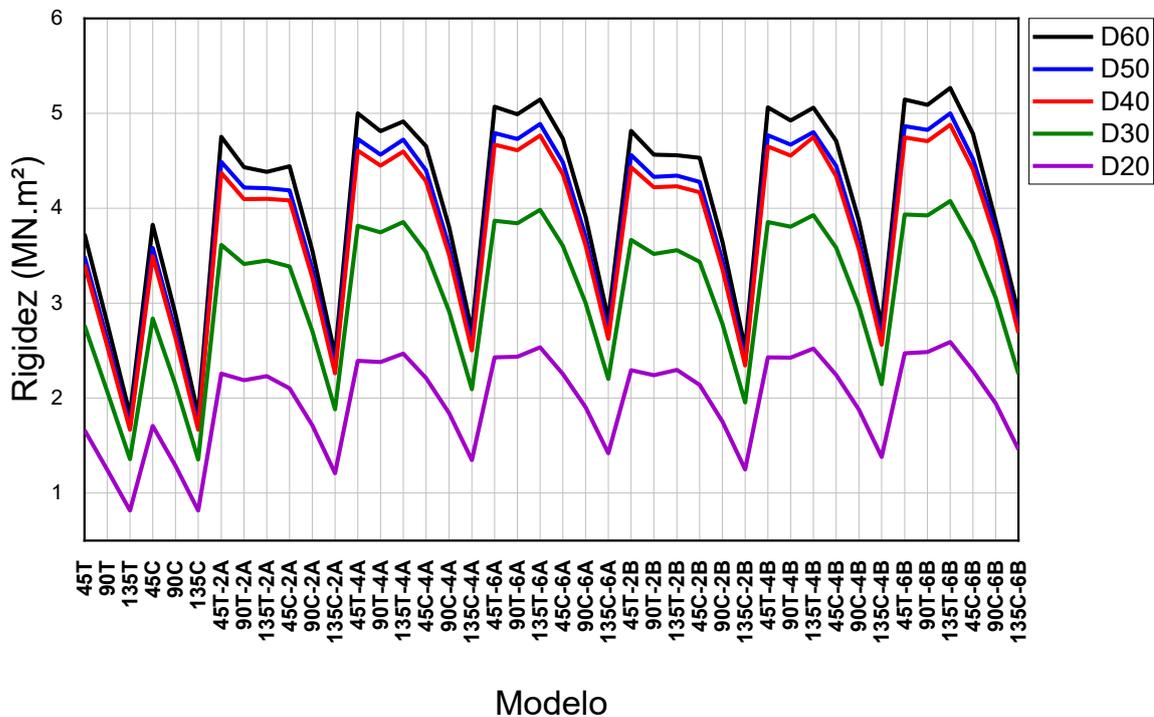
Diferentemente do comportamento observado nos modelos sem reforço, onde o resultado observado não apresenta variação significativa ao variar a classe de resistência, os modelos com reforço possuem variação entre si conforme é alterada a classe da madeira. Com exceção aos modelos com maior defeito na região superior

(135C), todos os modelos estudados da classe D20 apresentaram deslocamento inferior ao encontrado no modelo de referência. Todos os modelos com 135 mm de defeito na região superior apresentaram deslocamentos superiores aos modelos sem reforço.

O efeito da classe de resistência da madeira na capacidade do reforço também foi observado por Kim e Harries (2010) e Isleyen e Kesik (2021), onde constataram que madeiras de menor classe de resistência ou com redução de suas propriedades físico-mecânicas tendem a ter maior recuperação de rigidez à flexão.

Com base dos resultados obtidos, foi calculada a rigidez à flexão do conjunto, conforme Equação 14, e seu resultado é apresentado na Figura 34.

Figura 34 – Rigidez do conjunto madeira-chapa de aço



Fonte: Autor (2022).

Observando o comportamento de cada modelo, é possível aferir o comportamento benéfico que esta metodologia de reforço proporciona ao elemento estrutural. Apesar de alguns modelos resultarem em deslocamentos superiores ou força máxima inferior, quando a rigidez é analisada, todos os modelos apresentam melhores resultados quando comparados aos seus respectivos modelos sem reforço. Esse efeito pode ser explicado pelo elevado valor do módulo de elasticidade do aço.

Entretanto, para todas as classes, os modelos com 90 mm e 135 mm de defeito na região superior não foram capazes de restaurar a rigidez encontrada na referência, evidenciando a possibilidade de utilização de reforço parcial para recuperação de vigas de madeira, conforme também observado por Jesus, Pinto e Morais (2012).

Para os resultados positivos os modelos com dois parafusos apresentaram os resultados mais próximos do modelo inicial (aproximadamente 10% superior), sendo encontrados melhores resultados em configurações com mais parafusos (variação entre 11 e 22% superior em relação à referência).

Em comparação com os modelos com defeito e sem reforço, foi observado efeito benéfico à rigidez do elemento. Nos modelos com defeitos de 45 mm, nas duas faces da viga, o aumento da rigidez obtida variou entre 16% (D60-45C-2A) e 48% (D20-45T-4B).

Nos demais tamanhos de defeito, a diferença da localização se torna perceptível nos resultados. Para defeitos de 90 mm situados na região tracionada, foi observado uma variação no aumento da rigidez entre 59% (D60-90T-2A) e 100% (D20-90T-6B). Para os defeitos na região comprimida, a variação foi de 23% (D60-90C-2A) até 51% (D20-90C-6B).

Nos defeitos de 135 mm, foi encontrada uma rigidez entre 34% (D60-135C-2A) e 79% (D20-135C-6B) superior ao modelo sem reforço para região comprimida e entre 140% (D60-135T-2A) e 218% (D20-135T-6B) para a região tracionada. Observa-se que, ao analisar todos os resultados obtidos, a diferença entre os modelos com perda de seção em diferentes regiões se torna maior conforme o tamanho do defeito aumenta.

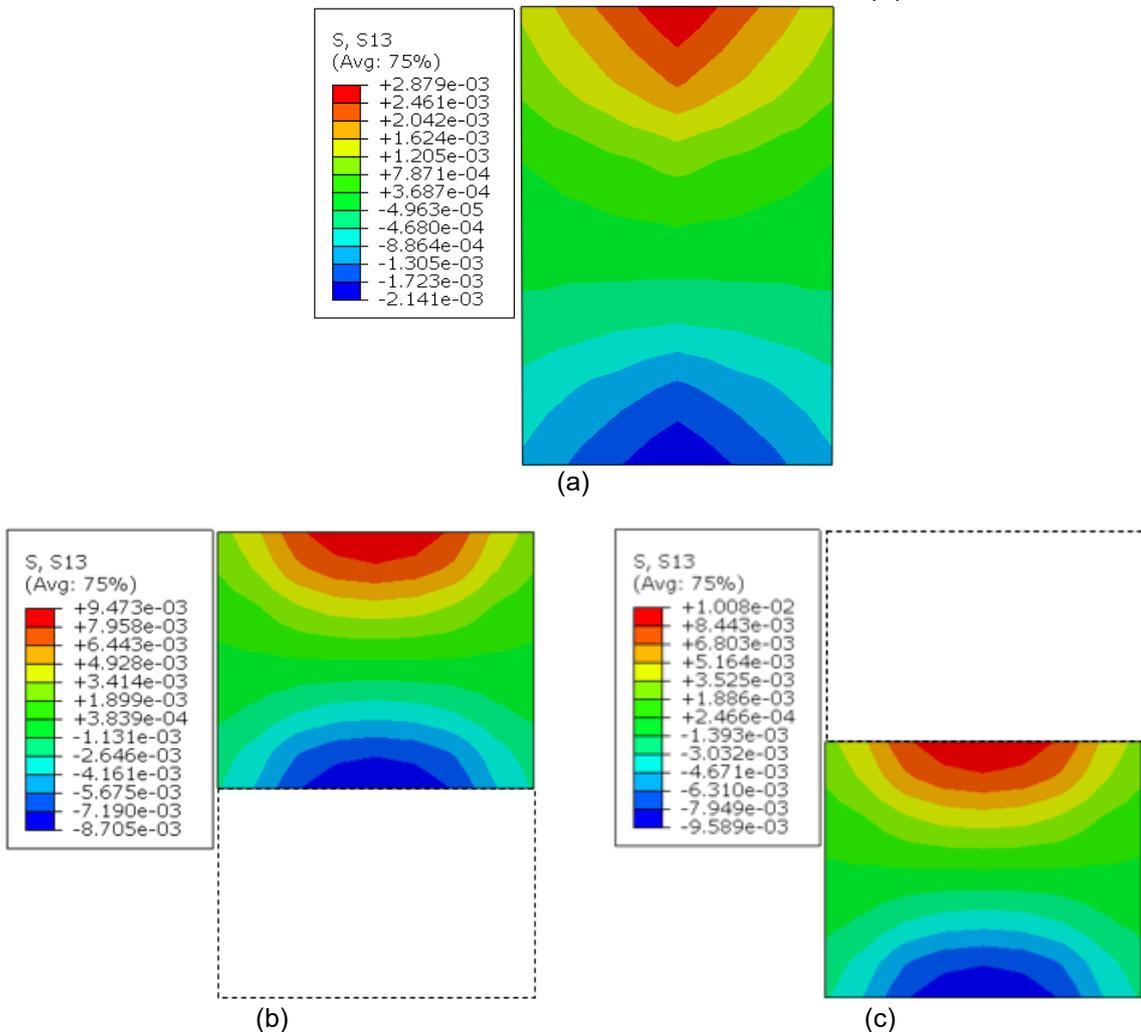
Analisando esses resultados, se torna evidente que a participação da madeira na rigidez do sistema aumenta conforme sua resistência também aumenta, assim como observado por Kim e Harries (2010), Burdzik e Skorpen (2016) e Isleyen e Kesik (2021). Dessa forma, os melhores resultados obtidos foram com reforço em peças de madeira com menores valores de resistência. Não foram encontradas diferenças significativas entre as classes D40, D50 e D60.

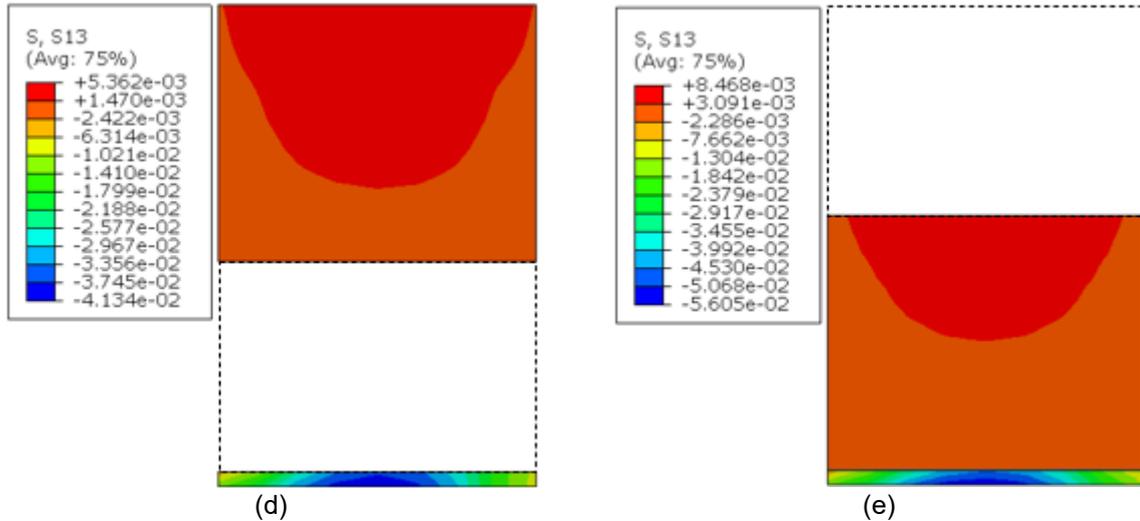
Nos estudos de Jasięńko e Nowak (2014) foi encontrado um aumento de 58% em relação ao modelo de referência ao analisar a fixação de chapas de aço com epóxi nas faces inferior ou superior. Nas simulações analisadas, os modelos que atingiram

os resultados de Jasieńko e Nowak (2014) foram os que possuíam 90 mm e 135 mm de perda de seção na região tracionada, mesmo utilizando um parafuso em cada lado.

O efeito da variação da rigidez é observado na distribuição das tensões na viga. A Figura 35 apresenta as tensões normais atuantes na seção transversal do centro da viga de madeira de classe D20, sendo apresentados os resultados do modelo inicial (Figura 35a), modelo com maiores defeitos nas regiões inferior (Figura 35b) e superior (Figura 35c) e, para o mesmo defeito, as seções dos modelos com maior quantidade de parafusos (Figura 35d e Figura 35e).

Figura 35 – Tensão normal à seção transversal da viga D20 (a); D20-135T (b); D20-135C (c); D20-135T-6B (d) e D20-135C-6B (e)

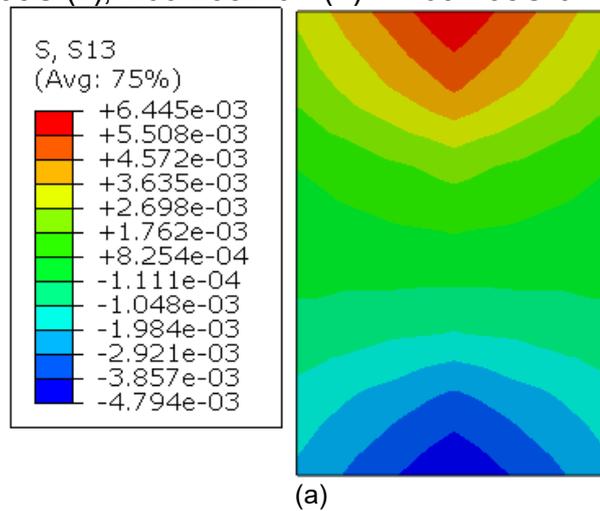


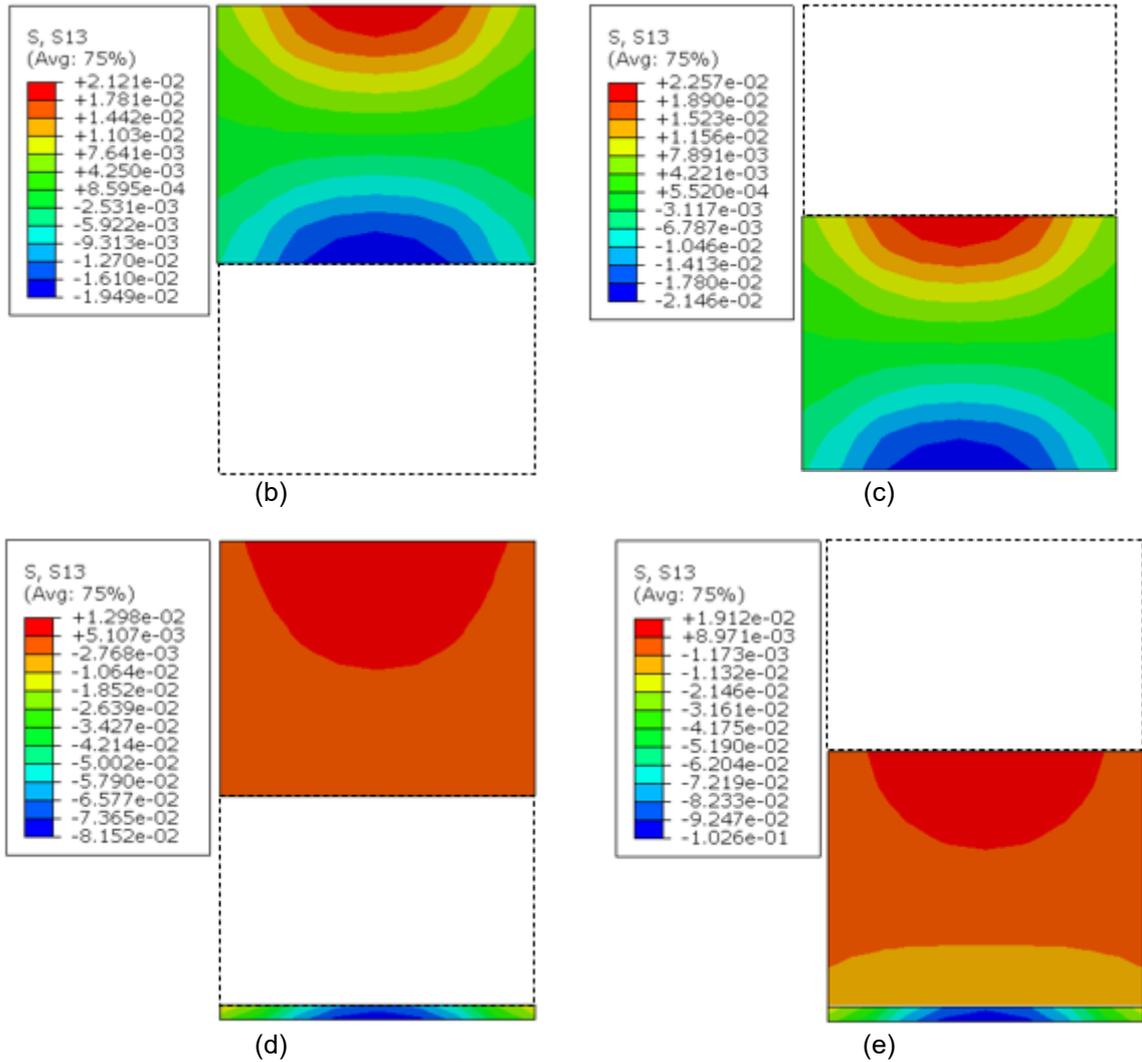


Fonte: Autor (2022).

Com o interesse em ilustrar a participação da resistência da madeira na distribuição das tensões da seção transversal, a Figura 36 apresenta as mesmas configurações que a Figura 35 para viga da classe D60.

Figura 36 – Tensão normal à seção transversal da viga D60 (a); D60-135T (b); D60-135C (c); D60-135T-6B (d) e D60-135C-6B (e)





Fonte: Autor (2022).

A perda de seção transversal acarreta em maiores tensões atuantes na região. Observa-se que os modelos com perda de seção na região superior apresentam tensões normais ligeiramente superiores aos modelos com perda de seção na região inferior.

Kim e Harries (2010) destacam um considerável deslocamento da linha neutra nas vigas quando reforçadas com material de grande módulo de elasticidade. Esse efeito também é observável nas figuras 35 e 36.

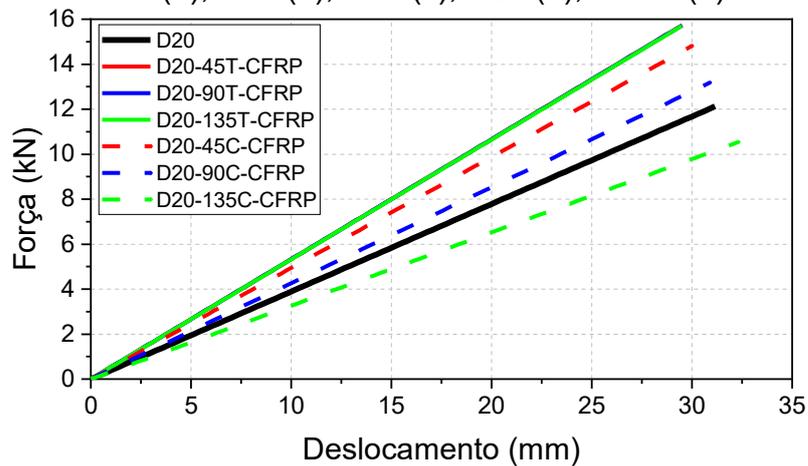
Avaliando o efeito do reforço, para esses casos, observa-se que os parafusos proporcionaram a capacidade de consideração de seção composta para a viga e a chapa de aço. Nessas condições, a parte de madeira está submetida a esforços de compressão, com exceção do modelo apresentado na Figura 36e onde a madeira possui uma região submetida a pequenos esforços de tração.

Em comparação com as seções sem reforço, a tensão de compressão a qual a seção está submetida é consideravelmente inferior, chegando a 60% do valor sem reforço para os modelos 135T-6B apresentados e 85% para os modelos 135C-6B apresentados.

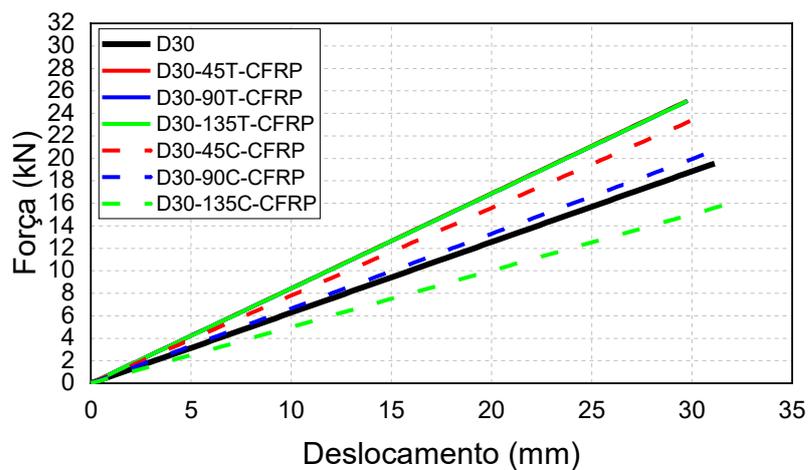
### 5.3 MODELOS COM REFORÇO DE CFRP

Este capítulo apresenta os resultados das simulações dos modelos do grupo de comparação apresentados na Apêndice C. A Figura 37 mostra os gráficos força-deslocamento desses modelos.

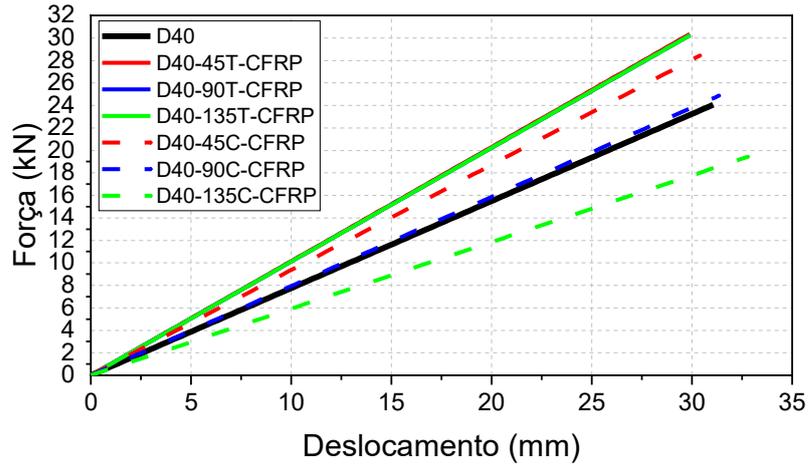
Figura 37 – Relação força-deslocamento dos modelos com CFRP para as classes D20 (a); D30 (b); D40 (c); D50 (d); e D60 (e)



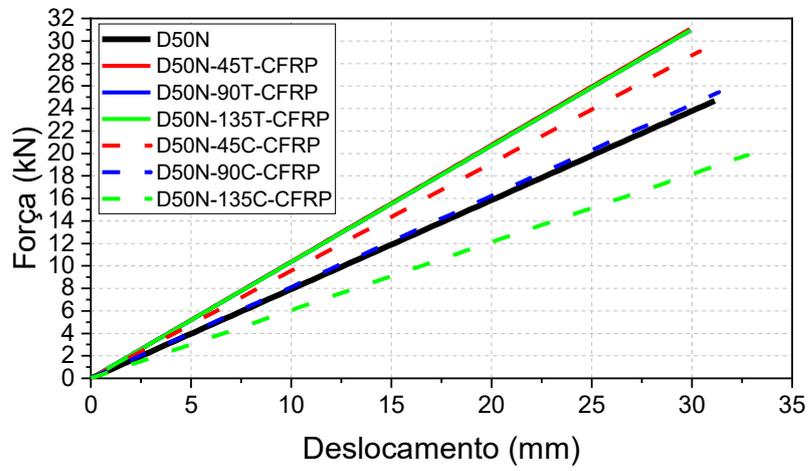
(a)



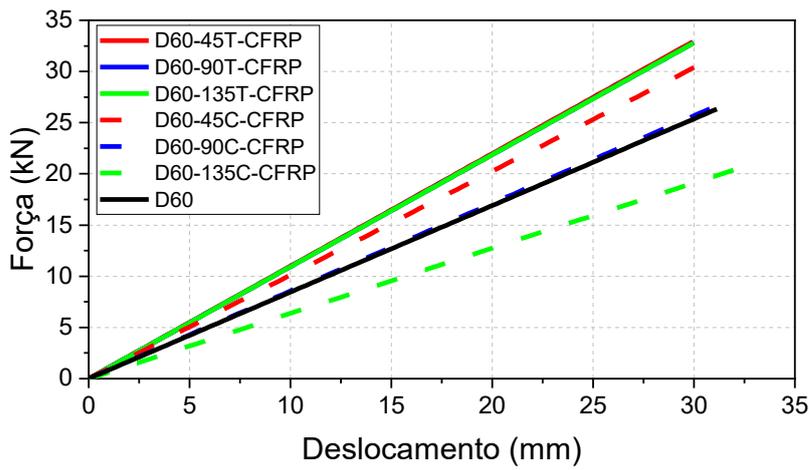
(b)



(c)



(d)



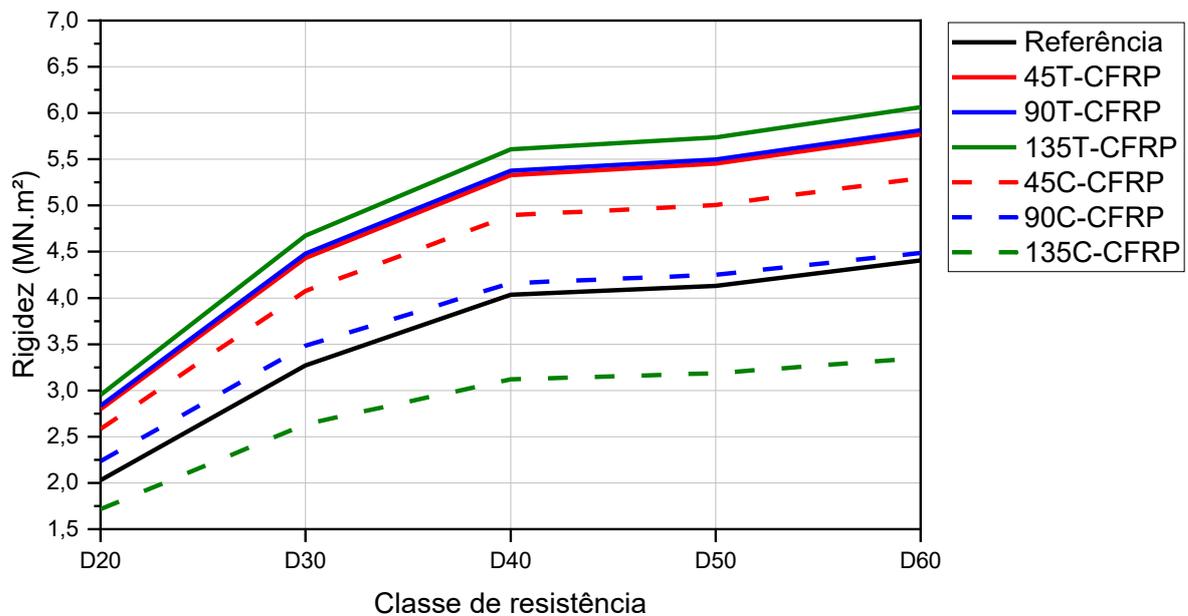
(e)

Fonte: Autor (2022).

Foi observado que, quanto maior a classe de resistência da madeira, maior sua contribuição para o comportamento do elemento em serviço, efeito também visto por Kim e Harries (2010) e Isleyen e Kesik (2021). Uma hipótese para isso é que as madeiras de maiores classes de resistência possuem maiores valores de módulo de elasticidade e contribuem para uma maior rigidez do elemento. Todos os defeitos localizados na região inferior apresentaram valores equivalentes e nenhum dos modelos com defeito de 135 mm localizado na região superior foram capazes de recuperar a capacidade de suporte do modelo de referência.

A rigidez do conjunto foi analisada por meio da Equação 14 e seu resultado é ilustrado na Figura 38.

Figura 38 – Rigidez do conjunto madeira-CFRP



Fonte: Autor (2022).

Apesar do CFRP ter sido modelado considerando uma uniformidade na transmissão dos esforços, no modelo com maior defeito na região superior, ele ainda não permitiu a recuperação da rigidez referente à referência, chegando a uma rigidez 24% inferior à referência na classe de resistência D60.

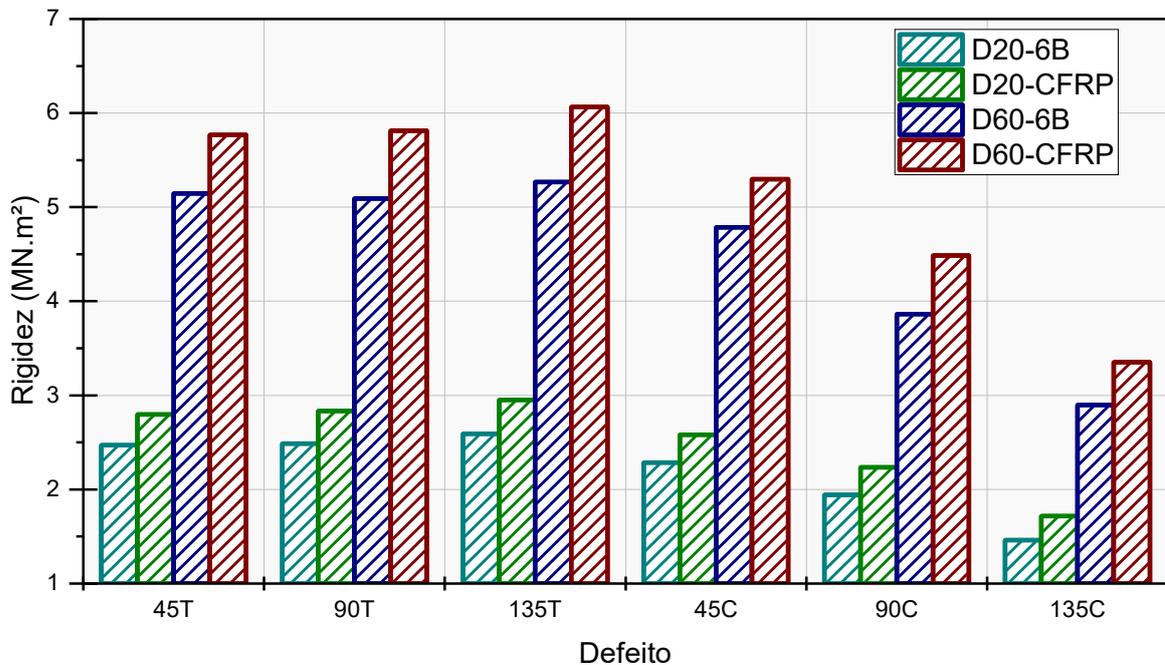
Para as configurações estudadas, o modelo com maior defeito na região positiva (135T-CFRP) resultou como mais rígido para todas as classes de resistência, com valores entre 38% (D60) e 46% (D20) superiores à referência.

Os modelos com 45 mm e 90 mm na região inferior apresentaram resultados estatisticamente equivalentes, com rigidez aproximadamente 6% inferior ao 135T-CFRP. O modelo 45C-CFRP, dos que possuem perda de seção na região superior, foi o que apresentou maior rigidez em relação à referência. O modelo com resultado mais próximo à referência foi o 90C-CFRP com variação de rigidez entre 2% (D60) e 10% (D20) acima do inicial.

Em relação os resultados observados na literatura, os modelos 45C-CFRP se assemelharam aos resultados obtidos por Isleyen e Kesik (2021) ao reforçarem madeiras antigas com CFRP (19,41%), variando entre 20% (D60) e 27% (D20). Ao reforçar madeiras novas com CFRP, os autores obtiveram um aumento de rigidez de 12,7%, inferior ao obtido com madeira antiga, confirmando uma maior eficiência do reforço em madeiras com propriedades físico-mecânicas inferiores.

Em comparação com os modelos simulados com chapa de aço parafusada, foram obtidos os resultados apresentados na Figura 39 para a classe D60 e para classe D20. Os modelos com reforço de chapa de aço considerados foram os maiores graus de reforço (modelos 6B).

Figura 39 – Comparação da rigidez obtida nos modelos com chapa de aço parafusada com os modelos de CFRP para as classes D20 e D60



Fonte: Autor (2022).

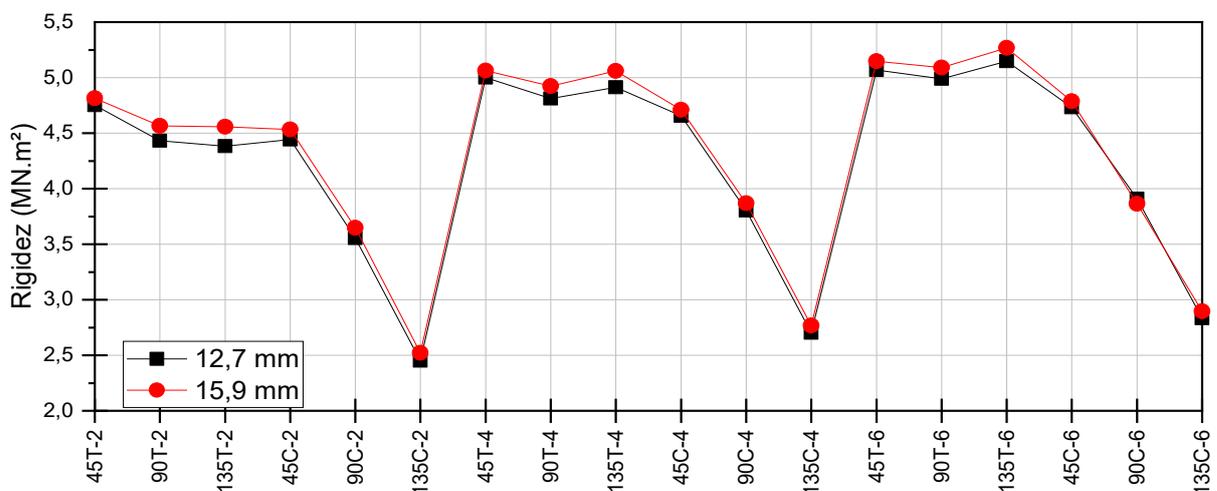
Conforme apresentado na Figura 39, os modelos com CFRP apresentam melhores resultados quando comparados com as chapas de aço parafusadas. Tal ponto se deve à perfeita aderência e, portanto, melhor transmissão dos esforços da peça de madeira para o elemento de reforço, conforme já apontado por Wasem *et al.* (2022) e Jasieńko e Nowak (2014).

Um efeito adicional ao reforço de CFRP observado por Isleyen e Kesik (2021) foi a mudança do modo de ruptura, sendo observado uma ruptura à tração (frágil) nas amostras sem reforço e uma ruptura por esmagamento da zona comprimida, garantindo um modo de falha dúctil desejável ao projeto. Entretanto, Kim e Harries (2010) ainda obtiveram ruptura frágil em vigas de madeira com módulo de elasticidade inferior a 8,4 GPa, mesmo reforçadas com CFRP.

#### 5.4 INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DOS PARAFUSOS NA RIGIDEZ DA VIGA

A influência dos parafusos na rigidez da viga foi estudada, variando o diâmetro e a quantidade. Os resultados a seguir foram obtidos dos modelos simulados para a classe de resistência da madeira D60, que apresentou o desempenho mínimo nos estudos. Conforme apresentado na Figura 40, foi observado que a variação do diâmetro do parafuso apresentou influência na rigidez do elemento nas regiões de defeito na zona comprimida da viga.

Figura 40 – Variação da rigidez com o aumento da bitola do parafuso para a classe D60

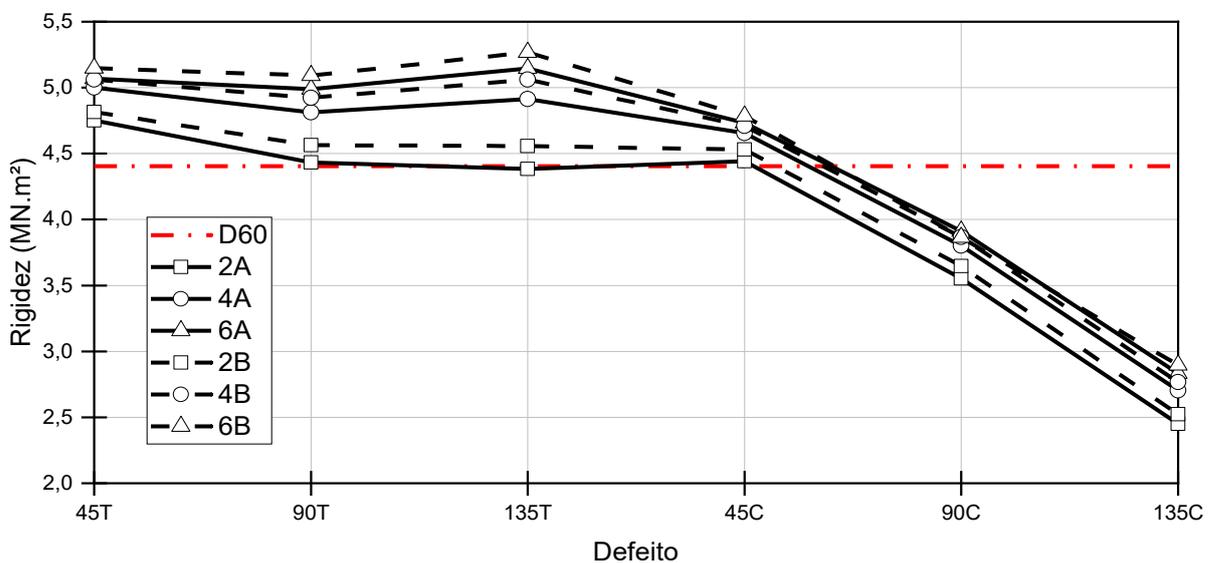


Fonte: Autor (2022).

Apesar de ser identificada alguma contribuição nas simulações de defeito na região comprimida, o resultado mais positivo encontrado foi de um aumento de 3% na rigidez ao comparar parafusos de 15,9 mm com 12,7 mm. Avaliando a mesma relação com os defeitos na região tracionada, foi encontrado um aumento de rigidez de 10%.

A Figura 41 apresenta o comportamento da rigidez com o aumento da quantidade de parafusos para os modelos simulados com madeira de classe de resistência D60.

Figura 41 – Variação da rigidez com o aumento da quantidade de parafusos para a classe D60



Fonte: Autor (2022).

De modo similar às análises anteriores, foi observada uma maior rigidez nos elementos com defeito na região inferior da viga, onde todas as simulações foram capazes de reestabelecer a rigidez esperada no modelo referência.

Com o aumento da quantidade de parafusos, houve também o aumento da rigidez em todos os casos estudados. Entretanto, o ganho de rigidez foi maior nos modelos com 90 mm e 135 mm de defeito na região positiva.

Foi identificado que com defeitos de maiores dimensões, o aumento da quantidade de parafusos se torna crítico para o ganho de rigidez. Ao utilizar dois parafusos em cada lado, foi observado um aumento de 7%, 14% e 29% na rigidez, respectivamente, para os defeitos de 45 mm, 90 mm e 135 mm na região tracionada.

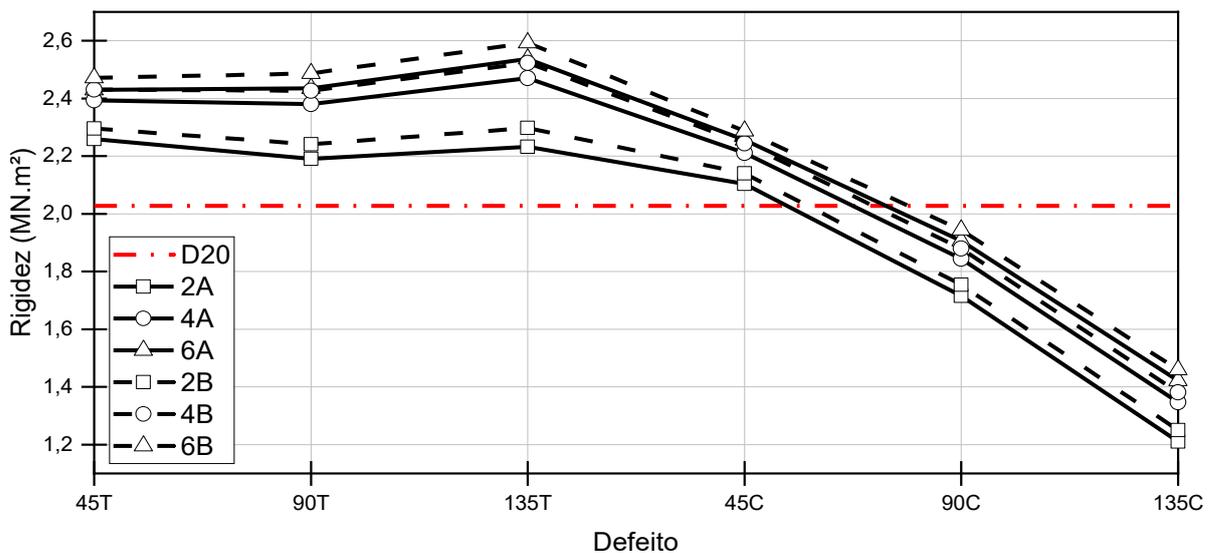
Ao se fazer a mesma análise na região comprimida, foram encontrados os valores de 6%, 9% e 14%.

Comparando os modelos com três parafusos com os de dois parafusos de cada lado, foram obtidos ganhos de 2%, 6% e 13% para a região tracionada e 2%, 4% e 7% para a região comprimida. Comparando os modelos com três parafusos com os de um parafuso em cada lado, os resultados foram: 9%, 20% e 42% de aumento de rigidez na região tracionada e 8%, 13% e 21% para a região comprimida.

Conforme observado por Corradi *et al.* (2016), com o aumento da quantidade de parafusos, ocorre uma transmissão mais eficiente das ações internas entre a viga e o reforço, sendo relevante para o ganho de rigidez.

A Figura 42 apresenta o comportamento da rigidez com o aumento da quantidade de parafusos para os modelos simulados da classe D20.

Figura 42 – Variação da rigidez com o aumento da quantidade de parafusos para a classe D20



Fonte: Autor (2022).

A variação dos resultados encontrados foi similar ao obtido nos modelos da classe D60. Entretanto, para os modelos da classe D20, foi observado um melhor desempenho do reforço nessas análises, em especial para os modelos com maiores defeitos na região tracionada. Para esses modelos, houve um maior ganho na rigidez ao comparar os resultados das simulações com dois parafusos em cada lado com as

simulações com um parafuso em cada lado. Isso ocorreu porque o módulo de elasticidade do aço foi o mesmo para todas as simulações e, com isso, o ganho de rigidez para vigas com madeiras de menor módulo de elasticidade é de percentualmente superior quando se compara com madeiras de maior módulo de elasticidade.

O aumento da quantidade de parafusos também garante uma melhor distribuição das tensões da ligação, reduzindo os valores encontrados nesses elementos, conforme apontado por Corradi *et al.* (2016) e Patalas, Karolak e Nowak (2022).

## **6 CONCLUSÕES**

## 6 CONCLUSÕES

Conforme os resultados obtidos, a madeira possui grande influência na rigidez à flexão de vigas nos modelos estudados, sendo esse comportamento observado na literatura científica. A predominância do esforço de compressão na parte de madeira da seção transversal crítica foi fundamental para que fosse possível obter a recuperação da capacidade estrutural do elemento em serviço, com o elemento de reforço resistindo os esforços de tração na seção dos modelos estudados.

Diferentemente dos modelos com reforço da chapa de aço parafusada, as simulações com CFRP foram elaboradas considerando a perfeita transmissão dos esforços entre a viga de madeira e o elemento de reforço. Apesar o módulo de elasticidade do CFRP ser similar ao aço, devido à capacidade de transmissão dos esforços de forma contínua proporcionou melhores resultados ao utilizar o CFRP como elemento de reforço em todos os tipos de defeito analisados. Ainda assim, o reforço com chapa de aço parafusada garantiu a recuperação da rigidez à flexão nos mesmos modelos que o CFRP.

O aumento da rigidez obtida com o aumento do diâmetro do parafuso foi pouco significativo para quaisquer quantidades de parafusos estudadas. Alterar o diâmetro dos parafusos contribuiu para o aumento da rigidez, chegando a apresentar 10% de ganho em alguns modelos. A eficiência dessa solução foi maior para defeitos na região tracionada. Para situações de reforço em vigas com perdas de seção na região originalmente comprimida, essa solução não apresentou grandes benefícios à rigidez do conjunto.

O aumento da quantidade de parafusos proporcionou um considerável aumento da rigidez do elemento estrutural, chegando a resultados 42% superiores ao comparar a utilização de três parafusos em cada lado do defeito com um parafuso.

Foi observada uma maior eficiência no reforço com chapa de aço parafusada para os modelos com madeira de classes de resistência inferiores, enquanto o reforço com CFRP com adesivo epóxi apresentou uma eficiência relativa maior para classes de resistência da madeira superiores.

Em situações de projeto com madeiras de baixa classe de resistência ou com redução das propriedades físico-mecânicas do material, afetando a rigidez do elemento, a utilização de chapa de aço parafusada se apresenta como alternativa para

a recuperação do desempenho em serviço, aliado a uma técnica executiva menos complexa.

Para os defeitos na região tracionada foi observado um comportamento satisfatório, consideravelmente superior à referência sem perda da seção transversal, para qualquer nível de defeito de defeito. Ainda, a variação da quantidade de parafusos possui grande influência nos resultados observados.

De forma geral, para defeitos localizados na região comprimida, em especial com grandes perdas de seção, o reforço estudado apresentou resultados menos satisfatórios que os obtidos para defeitos na região tracionada.

Independentemente da quantidade ou diâmetro dos parafusos, todos os modelos simulados com defeitos de região tracionada e os modelos simulados com defeito de 45 mm na região comprimida foram capazes de superar a rigidez do modelo inicial.

## **REFERÊNCIAS**

## REFERÊNCIAS

ABREU, L. B. de; LIMA, J. T.; RABELO, G. F.; GOMES, F. C.; TRUGILHO, P. F.; ELOY, F. de S. Avaliação não destrutiva de estruturas de madeiras em edifício histórico de Tiradentes, MG. **Cerne**, vol. 19, no. 3, p. 481–487, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0104-77602013000300016>.

ALMEIDA, D. H. de; SCALIANTE, R. de M.; MACEDO, L. B. de; MACÊDO, A. N.; DIAS, A. A.; CHRISTOFORO, A. L.; CALIL JUNIOR, C. Caracterização completa da madeira da espécie amazônica Paricá (*Schizolobium amazonicum* Herb) em peças de dimensões estruturais. **Revista Árvore**, vol. 37, no. 6, p. 1175–1181, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622013000600019>.

ALVES FILHO, A. **Elementos Finitos: a base da tecnologia CAE**. 6th ed. São Paulo: Érica, 2013.

ALVES FILHO, A. **Elementos finitos: a base da tecnologia CAE - análise não linear**. São Paulo: Érica, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 198: Standard test methods of static tests of lumber in structural sizes**. West Conshohocken: ASTM, 2015. <https://doi.org/10.1520/D0198-15>.

ANDREACCI, F.; MELO JUNIOR, J. C. F. de. Madeiras históricas do barroco mineiro: interfaces entre o patrimônio cultural material e a anatomia da madeira. **Rodriguesia**, vol. 62, no. 2, 2011. <https://doi.org/10.1590/2175-7860201162202>.

AQUINO, V. B. de M.; SOARES, L. S. Z. R.; RUTHES, H. C.; ARROYO, F. N.; FRAGA, I. F.; LAHR, F. A. R.; CHRISTOFORO, A. L. Evaluation of moisture content variation on strength and stiffness properties of *Cedrella* sp. wood specie.

**International Engineering Journal**, vol. 75, no. 2, p. 111–116, 2022.

<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1590/0370-44672021750069>.

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

BAJNO, D.; BEDNARZ, Ł.; NOWAK, T. Problems relating to assessment, repair and restoration of wooden roof structures in historic buildings, as exemplified by two case studies in southern Poland. **Advanced Materials Research**, vol. 778, p. 888–894, 2013. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.778.888>.

BAJNO, D.; GRZYBOWSKA, A.; BEDNARZ, Ł. Old and modern wooden buildings in the context of sustainable development. **Energies 2021, Vol. 14, Page 5975**, vol. 14, no. 18, p. 5975, 2021. <https://doi.org/10.3390/EN14185975>.

BAÑO, V.; ARRIAGA, F.; GUAITA, M. Determination of the influence of size and position of knots on load capacity and stress distribution in timber beams of *Pinus sylvestris* using finite element model. **Biosystems Engineering**, vol. 114, no. 3, p. 214–222, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.12.010>.

BARDELLA, L.; PATERLINI, L.; LERONNI, A. Accurate modelling of the linear elastic flexure of composite beams warped by midlayer slip, with emphasis on concrete-timber systems. **International Journal of Mechanical Sciences**, vol. 87, p. 268–280, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2014.06.011>.

BASTERRECHEA-ARÉVALO, M.; CABRERO, J. M.; IRAOLA, B.; GOÑI, R. Modelling of moment transmitting beam-to-column timber connections accounting for frictional transmission. **Engineering Structures**, vol. 247, p. 113122, 2021. DOI 10.1016/j.engstruct.2021.113122. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113122>.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção**. 5th ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2015. vol. 2, .

BERGNER, K.; TOSCH, M.; ZAUER, M.; SPICKENHEUER, A.; WAGENFÜHR, A.; HEINRICH, G. Process development for the manufacture of fiber reinforced wood composites (FRWC). **Construction and Building Materials**, vol. 180, p. 275–284, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.001>.

BERTOLINI, M. da S.; MACEDO, L. B. de; ALMEIDA, D. H. de; ICIMOTO, F. H.; LAHR, F. A. R. Restoration of structural timber elements using epoxy resin: Analysis of mechanical properties. **Advanced Materials Research**, vol. 778, p. 582–587, 2013. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.778.582>.

BITTENCOURT, M. L. **Análise computacional de estruturas**. Campinas: Editora Unicamp, 2010.

BLANCHETTE, R. A.; HELD, B. W.; JURGENS, J.; STEAR, A.; DUPONT, C. Fungi attacking historic wood of Fort Conger and the Peary Huts in the High Arctic. **PLoS ONE**, vol. 16, no. 1 January, p. 1–16, 2021. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0246049>.

BOLINA, F. L.; TUTIKIAN, B. F.; HELENE, P. R. do L. **Patologia de estruturas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2019.

BRANCO, L. A. M. N.; CHAHUD, E.; CHRISTOFORO, A. L.; ROCCO LAHR, F. A.; BATTISTELLE, R. A. G.; VALARELLI, I. D. Influence of moisture content in some mechanical properties of two brazilian tropical wood species. **Advanced Materials Research**, vol. 1025–1026, p. 42–45, 2014. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1025-1026.42>.

BRITES, R. D.; NEVES, L. C.; SAPORITI MACHADO, J.; LOURENÇO, P. B.; SOUSA, H. S. Reliability analysis of a timber truss system subjected to decay.

**Engineering Structures**, vol. 46, p. 184–192, 2013.

<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.07.022>.

BRITO, L. D.; CHRISTOFORO, A. L.; SEGUNDINHO, P. G. de A.; LAHR, F. A. R.; CALIL JUNIOR, C. Historic “HAUFF” timber roofs in Poços de Caldas in Brazil.

**International Journal of Materials Engineering**, vol. 6, no. 3, p. 113–118, 2016.

<https://doi.org/10.5923/j.ijme.20160603.09>.

BURDZIK, W. M. G.; SKORPEN, S. Experimental and analytical investigation into the stiffness of composite steel-reinforced timber beams with flexible shear connectors.

**Journal of the South African Institution of Civil Engineering**, vol. 58, no. 4, p.

11–20, 2016. <https://doi.org/10.17159/2309-8775/2016/V58N4A2>.

CAMPILHO, R. D.S.G.; MOURA, M. F. S. F.; BARRETO, A. M. J. P.; MORAIS, J. J. L.; DOMINGUES, J. J. M. S. Experimental and numerical evaluation of composite repairs on wood beams damaged by cross-graining. **Construction and Building**

**Materials**, vol. 24, no. 4, p. 531–537, 2010.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.006>.

CAMPILHO, R. D.S.G.; MOURA, M. F. S. F.; BARRETO, A. M. J. P.; MORAIS, J. J. L.; DOMINGUES, J. J. M. S. Fracture behaviour of damaged wood beams repaired with an adhesively-bonded composite patch. **Composites Part A: Applied Science**

**and Manufacturing**, vol. 40, no. 6–7, p. 852–859, 2009.

<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.04.007>.

CAMPILHO, Raul Duarte Salgueiral Gomes. **Método dos elementos finitos: ferramentas para análise estrutural**. Porto: Publindústria Produção de Comunicação Ltda, 2012.

CANDELAS-GUTIÉRREZ, A.; BORRALLO-JIMENEZ, M. Methodology of restoration of historical timber roof frames. Application to traditional spanish structural carpentry. **International Journal of Architectural Heritage**, vol. 14, no. 1, p. 51–74, 2020. <https://doi.org/10.1080/15583058.2018.1506833>.

CARBAS, R. J. C.; VIANA, G. M. S. O.; DA SILVA, L. F. M.; CRITCHLOW, G. W. Functionally Graded Adhesive Patch Repairs of Wood Beams in Civil Applications. **Journal of Composites for Construction**, vol. 19, no. 2, p. 1–11, 2015. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cc.1943-5614.0000500](https://doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000500).

CARRASCO, E. V. M.; ALVES, R. C.; VON KRUGER, P. G.; REZENDE, M. A. P. de; PIZZOL, V. D.; MANTILLA, J. N. R.; GUIMARÃES, M. A. S. de C. Determination of constant elastic of Pequi wood using ultrasound. **MIX Sustentável**, vol. 6, no. 4, p. 139–144, 2020. <https://doi.org/10.29183/2447-3073.mix2020.v6.n4.139-144>.

CASCIATI, S.; DOMANESCHI, M. Random imperfection fields to model the size effect in laboratory wood specimens. **Structural Safety**, vol. 29, no. 4, p. 308–321, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2006.07.014>.

ČEJKA, T.; KROFTOVÁ, K.; ŠMIDTOVÁ, M.; ZIGLER, R. Rehabilitation of historic half-timbered walls with composite materials based on high-strength. **The Civil Engineering Journal**, vol. 24, no. 4, p. 1–7, 2015. <https://doi.org/10.14311/cej.2015.04.0020>.

CESTARI, C. B.; INVERNIZZI, S.; MARZI, T.; TULLIANI, J.-M. The reinforcement of ancient timber-joints with carbonnano-composites. **Meccanica**, vol. 48, p. 1925–1935, 2013. <https://doi.org/10.1007/s11012-013-9735-6>.

CHEN, Y.; GUO, W. Nondestructive evaluation and reliability analysis for determining the mechanical properties of old wood of ancient timber structure. **BioResources**,

vol. 12, no. 2, p. 2310–2325, 2017. <https://doi.org/10.15376/biores.12.2.2310-2325>.

CHEVALIER, L.; MAKHLOUF, H.; JACQUET-FAUCILLON, B.; LAUNAY, E. Modeling the influence of connecting elements in wood products behavior: A numerical multi-scale approach. **Mechanics and Industry**, vol. 19, no. 3, 2018.

<https://doi.org/10.1051/meca/2018004>.

CHOIDIS, P.; KRANIOTIS, D.; LEHTONEN, I.; HELLMUM, B. A modelling approach for the assessment of climate change impact on the fungal colonization of historic timber structures. **Forests**, vol. 12, no. 7, 2021. <https://doi.org/10.3390/f12070819>.

CHORLTON, B.; GALES, J. Fire performance of cultural heritage and contemporary timbers. **Engineering Structures**, vol. 201, 2019.

<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109739>.

CHRISTOFORO, André Luis; ANÉRIS BLECHA, K.; LUIS, A.; DE CARVALHO, C.; FERNANDO, L.; REZENDE, S.; ANTONIO, F.; LAHR, R. Characterization of Tropical Wood Species for Use in Civil Constructions. **Journal of Civil Engineering Research**, vol. 2013, no. 3, p. 98–103, 2013.

<https://doi.org/10.5923/j.jce.20130303.02>.

CHRISTOFORO, André Luís; LIBARDI, W. **Mecânica dos sólidos e introdução aos métodos numéricos para engenharia civil**. São Carlos: EdUFSCar, 2019.

COLI, M.; IWASAKI, Y. Novel approaches and technologies for heritage buildings conservation: Editorial. **Applied Sciences (Switzerland)**, vol. 11, no. 22, 2021.

<https://doi.org/10.3390/app112210597>.

CORRADI, M.; BORRI, A.; CASTORI, G.; SPERANZINI, E. Fully reversible reinforcement of softwood beams with unbonded composite plates. **Composite**

**Structures**, vol. 149, p. 54–68, 2016.

<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.04.014>.

DAI, G.; GE, H.; SU, M.; CHEN, Y. F. Century-old covered bridge with cantilever beams in China. **Structural Engineering International**, vol. 27, no. 2, p. 255–262, 2017. <https://doi.org/10.2749/101686617X14881932436050>.

DAI, L. Finite-element model updating of the traditional beam–column joint in Tibetan heritage buildings using uniform design. **Advances in Structural Engineering**, vol. 23, no. 9, p. 1890–1901, 2020. <https://doi.org/10.1177/1369433220903984>.

DALFRÉ, G. M. **Polímeros reforçados com fibras na construção civil: dimensionamento de sistemas de reforço e armaduras não metálicas à flexão e ao cisalhamento segundo normas ACI**. São Carlos: EdUFSCar, 2022.

DASSAULT SYSTÈMES SIMULIA. **Abaqus/CAE user's manual**. 6.11. [S. l.]: Dassault Systèmes Simulia, 2011.

DIAS, A. M. P. G.; VAN DE KUILEN, J. W.; CRUZ, H. M. P.; LOPES, S. M. R. Numerical modeling of the load-deformation behavior of doweled softwood and hardwood joints. **Wood and Fiber Science**, vol. 42, no. 4, p. 480–489, 2010. .

DIAS, F. M.; LAHR, F. A. R. Estimativa de propriedades de resistência e rigidez da madeira através da densidade aparente. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, no. 65, p. 102–113, 2004. .

ENDERE, M. L.; ZULAICA, M. L. SUSTENTABILIDAD SOCIO-CULTURAL Y BUEN VIVIR EN SITIOS PATRIMONIALES: EVALUACIÓN DEL CASO AGUA BLANCA, ECUADOR. **Ambiente & Sociedade**, vol. 18, no. 4, p. 265–290, 2015. <https://doi.org/10.1590/1809-4422ASOC1317V1842015>.

ESLAMI, H.; JAYASINGHE, L. B.; WALDMANN, D. Nonlinear three-dimensional anisotropic material model for failure analysis of timber. **Engineering Failure Analysis**, vol. 130, no. April, p. 105764, 2021.

<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105764>.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **BS EN 1995-1-1: Design of timber structures. Part 1-1: General- Common rules and rules for buildings.**

Brussels: Eurocode 5, 2008.

FAJDIGA, G.; RAJH, D.; NEČEMER, B.; GLODEŽ, S.; ŠRAML, M. Experimental and numerical determination of the mechanical properties of spruce wood. **Forests**, vol. 10, no. 12, 2019. <https://doi.org/10.3390/F10121140>.

FAWZIA, S.; AL-MAHAIDI, R.; ZHAO, X. L. Experimental and finite element analysis of a double strap joint between steel plates and normal modulus CFRP. **Composite Structures**, vol. 75, no. 1–4, p. 156–162, 2006.

<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2006.04.038>.

FERREIRA, I.; FERREIRA, A.; ROSÁRIO, A. L. do. Normas internacionais de preservação do patrimônio histórico e cultura (1931-2003). **Rev. Iberoam. Patrim. Histórico-Educativo**, vol. 6, p. 1–28, 2020. <https://doi.org/10.20888/ridphe>.

FLORISSON, S.; VESSBY, J.; ORMARSSON, S. **A three-dimensional numerical analysis of moisture flow in wood and of the wood's hygro-mechanical and visco-elastic behaviour.** [S. l.]: Springer Berlin Heidelberg, 2021. vol. 55, . DOI 10.1007/s00226-021-01291-9. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00226-021-01291-9>.

FRUNZIO, G.; DI GENNARO, L. Seismic structural upgrade of historical buildings through wooden deckings strengthening: The case of study of Palazzo Ducale in

Parete, Italy. **Procedia Structural Integrity**, vol. 11, p. 153–160, 2018.  
<https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.11.021>.

GRAMMONT, A. M. de. A construção do conceito de patrimônio histórico: restauração e cartas patrimoniais. **PASOS - Revista de Turismo y Patrimonio Cultural**, vol. 4, no. 3, 2006.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.25145/j.pasos.2006.04.030>.

GUAN, Z. W.; KITAMORI, A.; KOMATSU, K. Experimental study and finite element modelling of Japanese “Nuki” joints - Part two: Racking resistance subjected to different wedge configurations. **Engineering Structures**, vol. 30, no. 7, p. 2041–2049, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2008.01.004>.

GUEVARA, J. L.; TOIRAC, Y. A.; MARISY, C. M. C. An approach to the convent of Santa Clara de Asís in Havana. Study of its conservation status and intervention proposals. **Revista ALCONPAT**, vol. 9, no. 2, p. 228–246, 2019.  
<https://doi.org/10.21041/ra.v9i2.354>.

HAN, Y.; CHUN, Q.; WANG, H. Quantitative safety evaluation of ancient Chinese timber arch lounge bridges. **Journal of Wood Science**, vol. 68, no. 1, p. 1–14, 2022.  
<https://doi.org/10.1186/s10086-022-02011-y>.

HISWA, A. A. M. R.; ALBUTHBAHAK, O. M. The bending behavior of composit timber-steel beams. **International Journal of Civil Engineering and Technology**, vol. 9, no. 4, p. 783–794, 2018. .

IRAOLA, B.; CABRERO, J. M. An algorithm to model wood accounting for different tension and compression elastic and failure behaviors. **Engineering Structures**, vol. 117, p. 332–343, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.03.021>.

ISLAM, M.; SIDDIQUE, A.; POURHASSAN, A.; CHOWDHURY, A.; TASNIM, J. Flexural Capacity Enhancement of Timber Beams Partially Confining the Principal Compression Arch using Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites.

**Transportation Research Record**, vol. 2673, no. 11, p. 276–285, 2019.

<https://doi.org/10.1177/0361198119851051>.

IŞLEYEN, Ü. K.; KESİK, H. İ. Experimental and numerical analysis of compression and bending strength of old wood reinforced with CFRP strips. **Structures**, vol. 33, no. May, p. 259–271, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.04.070>.

JASIEŃKO, J.; NOWAK, T.; CZEPIZAK, D. Numerical analysis of CFRP-reinforced wooden beams under bending. 1., 2010. **11th World Conference on Timber Engineering 2010** [...]. Trentino: WCTE 2010, 2010. vol. 1, p. 611–618.

JASIEŃKO, J.; NOWAK, T. P. Solid timber beams strengthened with steel plates - Experimental studies. **Construction and Building Materials**, vol. 63, p. 81–88, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.020>.

JESUS, A. M. P.; PINTO, J. M. T.; MORAIS, J. J. L. Analysis of solid wood beams strengthened with CFRP laminates of distinct lengths. **Construction and Building Materials**, vol. 35, p. 817–828, 2012.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.124>.

KHELIFA, M.; AUCHET, S.; MÉAUSOONE, P. J.; CELZARD, A. Finite element analysis of flexural strengthening of timber beams with Carbon Fibre-Reinforced Polymers. **Engineering Structures**, vol. 101, p. 364–375, 2015.

<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.07.046>.

KHELIFA, M.; CELZARD, A. Numerical analysis of flexural strengthening of timber beams reinforced with CFRP strips. **Composite Structures**, vol. 111, no. 1, p. 393–

400, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.01.011>.

KHELIFA, M.; CELZARD, A.; OUDJENE, M.; RUELLE, J. Experimental and numerical analysis of CFRP-strengthened finger-jointed timber beams. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, vol. 68, p. 283–297, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2016.04.007>.

KHELIFA, M.; LAHOUAR, M. A.; CELZARD, A. Flexural strengthening of finger-jointed Spruce timber beams with CFRP. **Journal of Adhesion Science and Technology**, vol. 29, no. 19, p. 2104–2116, 2015. <https://doi.org/10.1080/01694243.2015.1057395>.

KHELIFA, M.; VILA LOPERENA, N.; BLERON, L.; KHENNANE, A. Analysis of CFRP-strengthened timber beams. **Journal of Adhesion Science and Technology**, vol. 28, no. 1, p. 1–14, 2014. <https://doi.org/10.1080/01694243.2013.815096>.

KHELIFA, Mourad; FIERRO, V.; CELZARD, A. FE simulation of repaired timber beams under tensile load using CFRP patches. **Journal of Adhesion Science and Technology**, vol. 29, no. 3, p. 158–170, 2015. <https://doi.org/10.1080/01694243.2014.979028>.

KHORSANDNIA, N.; VALIPOUR, H. R.; CREWS, K. Nonlinear finite element analysis of timber beams and joints using the layered approach and hypoelastic constitutive law. **Engineering Structures**, vol. 46, p. 606–614, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.08.017>.

KIM, Y. J.; HARRIES, K. A. Modeling of timber beams strengthened with various CFRP composites. **Engineering Structures**, vol. 32, no. 10, p. 3225–3234, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.06.011>.

KOSHCHEEV, A. A.; ROSHCHINA, S. I.; LUKIN, M. V.; LISYATNIKOV, M. S. Wooden beams with reinforcement along a curvilinear trajectory. **Magazine of Civil Engineering**, vol. 81, no. 5, p. 193–201, 2018. <https://doi.org/10.18720/MCE.81.19>.

KUNECKÝ, J.; SEBERA, V.; HASNÍKOVÁ, H.; ARCISZEWSKA-KĘDZIOR, A.; TIPPNER, J.; KLOIBER, M. Experimental assessment of a full-scale lap scarf timber joint accompanied by a finite element analysis and digital image correlation. **Construction and Building Materials**, vol. 76, p. 24–33, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.034>.

LAHR, F. A. R.; CHAHUD, E.; ARROYO, F. N.; CHRISTOFORO, A. L.; RODRIGUES, E. F. C.; ALMEIDA, J. P. B.; AQUINO, V. B. de M. Análise da representatividade da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras da classe C60 da norma brasileira de estruturas de madeira. **Revista Materia**, vol. 27, no. 1, 2022. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620220001.1334>.

LAHR, F. A. R.; CHAHUD, E.; ARROYO, F. N.; CHRISTOFORO, A. L.; RODRIGUES, E. F. C.; ALMEIDA, J. P. B.; AQUINO, V. B. de M.; SANTOS, H. F. dos. Ratio analysis between compression and shearing of 72 brazilian wood species. **Wood Research**, vol. 66, no. 5, 2021. <https://doi.org/doi.org/10.37763/wr.1336-4561/66.5.711720>.

LI, G.; LIU, Z.; TANG, W.; HE, D.; SHAN, W. Experimental and Numerical Study on the Flexural Performance of Assembled Steel-Wood Composite Slab. **Sustainability** **2021, Vol. 13, Page 3814**, vol. 13, no. 7, p. 3814, 2021. <https://doi.org/10.3390/SU13073814>.

LI, H.; QIU, H.; ZHAO, Z.; LU, Y. Axial compression behaviour of retrofitted long timber columns. **Advances in Structural Engineering**, vol. 21, no. 3, p. 445–459, 2018. <https://doi.org/10.1177/1369433217719984>.

LI, Y. F.; TSAI, M. J.; WEI, T. F.; WANG, W. C. A study on wood beams strengthened by FRP composite materials. **Construction and Building Materials**, vol. 62, p. 118–125, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.03.036>.

LICHTENSTEIN, N. B. **Patologia das construções: Procedimento para formulação do diagnóstico de falhas e definição de conduta adequada à recuperação de edificações**. 1985. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1985.

LIU, Q.; MA, S.; HAN, X. Study on the flexural behavior of poplar beams externally strengthened by BFRP strips. **Journal of Wood Science**, vol. 66, no. 1, 2020. <https://doi.org/10.1186/s10086-020-01887-y>.

LUKIN, M.; PRUSOV, E.; ROSHCHINA, S.; KARELINA, M.; VATIN, N. Multi-Span composite timber beams with rational steel reinforcements. **Buildings**, vol. 11, no. 2, p. 1–12, 2021. <https://doi.org/10.3390/buildings11020046>.

MACKERLE, J. Finite element analyses in wood research: a bibliography. **Wood Science and Technology**, vol. 39, no. 7, p. 579–600, 2005. <https://doi.org/10.1007/s00226-005-0026-9>.

MARINI, L. J.; ALMEIDA, T. H.; ALMEIDA, D. H.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Estimativa da resistência e da rigidez à compressão paralela às fibras da madeira de Pinus sp. pela colorimetria. **Ambiente Construído**, vol. 21, no. 1, p. 149–160, 2021. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212021000100499>.

MARTÍNEZ, I.; MARTÍNEZ, E. Qualitative timber structure assessment with passive IR thermography. Case study of sources of common errors. **Case Studies in Construction Materials**, vol. 16, no. September 2021, p. e00789, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00789>.

MARTINS, J. F. A.; FIORITI, C. F. Avaliação de manifestações patológicas identificadas nas estruturas em madeira do centro de eventos IBC (Instituto Brasileiro do Café). **REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, vol. 12, no. 3, p. 43–55, 2016. <https://doi.org/10.5216/reec.v12i3.39267>.

MASCIA, N. T.; LAHR, F. A. R. Remarks on orthotropic elastic models applied to wood. **Materials Research**, vol. 9, no. 3, p. 301–310, 2006. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392006000300010>.

MASCIA, N. T.; SARTORTI, A. L. Identification and analysis of pathologies in bridges of urban and rural roads. **Revista ingeniería de construcción**, vol. 26, no. 1, p. 05–24, 2011. <https://doi.org/10.4067/S0718-50732011000100001>.

MESQUITA, E. F. T. **Engenharia do patrimônio**. Curitiba: Editora Íthala, 2019.

MIOTTO, J. L.; DIAS, A. A. Reforço e recuperação de estruturas de madeira. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, vol. 27, no. 2, p. 163–174, 2006. .

MOLINA, J. C.; CALIL JUNIOR, C. Sistema misto de madeira e concreto: uma abordagem numérico e experimental para altas temperaturas. **Matéria (Rio de Janeiro)**, vol. 23, no. 3, 2018. <https://doi.org/10.1590/s1517-707620180003.0517>.

MORESCHI, J. C. **Biodegradação da Madeira**. 4th ed. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2013. vol. 1, .

MOTLAGH, B.; GHOLIPOUR, Y.; EBRAHIMI, G. H. Experimental investigation on mechanical properties of old wood members reinforced with FRP composite. **Wood Research**, vol. 57, no. 2, p. 285–296, 2012. .

MURATA, K.; KANAZAWA, T. Determination of Young's modulus and shear modulus by means of deflection curves for wood beams obtained in static bending tests.

**Holzforschung**, vol. 61, no. 5, p. 589–594, 2007.

<https://doi.org/10.1515/HF.2007.082>.

NEGRÃO, J. H. Rehabilitation of the roof timber trusses of a multiuse pavilion. **Civil Engineering Journal (Iran)**, vol. 6, no. 12, p. 2437–2447, 2020.

<https://doi.org/10.28991/cej-2020-03091628>.

NOGUEIRA, M. C. J. A.; DE ARAUJO, V. A.; VASCONCELOS, J. S.; GUTIÉRREZ-AGUILAR, C. M.; DA CRUZ, J. N.; VASCONCELOS, J. C. S.; PRATAVIERA, F.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Caracterización físico-mecánica de la madera de *Eucalyptus camaldulensis* para uso estructural proveniente de Restinga, Brasil.

**Revista Forestal del Perú**, vol. 33, no. 1, p. 52, 2018.

<https://doi.org/10.21704/rfp.v33i1.1155>.

NOWAK, T. P.; JASIEŃKO, J.; CZEPIZAK, D. Experimental tests and numerical analysis of historic bent timber elements reinforced with CFRP strips. **Construction and Building Materials**, vol. 40, p. 197–206, 2013.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.106>.

OUDJENE, M.; KHELIFA, M.; SEGOVIA, C.; PIZZI, A. Application of numerical modelling to dowel-welded wood joints. **Journal of Adhesion Science and Technology**, vol. 24, no. 2, p. 359–370, 2010.

<https://doi.org/10.1163/016942409X12541266699473>.

OUDJENE, M.; MEGHLAT, E. M.; AIT-AIDER, H.; LARDEUR, P.; KHELIFA, M.; BATOZ, J. L. Finite element modelling of the nonlinear load-slip behaviour of full-scale timber-to-concrete composite T-shaped beams. **Composite Structures**, vol. 196, no. March, p. 117–126, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.04.079>.

OZELTON, E. C.; BAIRD, J. A. **Timber designer's manual**. 3rd ed. Oxford: Blackwell Science, 2006.

PARISI, M. A.; PIAZZA, M. Restoration and Strengthening of Timber Structures: Principles, Criteria, and Examples. **Practice Periodical on Structural Design and Construction**, vol. 12, no. 4, p. 177–185, 2007. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1084-0680\(2007\)12:4\(177\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1084-0680(2007)12:4(177)).

PATALAS, F.; KAROLAK, A.; NOWAK, T. P. Numerical analyses of timber beams with stop- splayed scarf carpentry joints. **Engineering Structures**, vol. 266, no. June, p. 114626, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114626>.

PAULA, K. D. A.; FARIA, T. C. D. A. Percepção dos turistas frente ao patrimônio histórico cultural: análise dos principais marcos religiosos de Tiradentes – MG a partir da Social Media Mining. **Caderno Virtual de Turismo**, vol. 21, no. 2, p. 12, 2021. <https://doi.org/10.18472/cvt.21n2.2021.1855>.

PETRUCCI, E. G. R. **Materiais de construção**. Porto Alegre: Globo, 1975.

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

PIEADADE, A. R. da; PIEADADE, A. R. da; FERREIRA, R. F.; VIEIRA, Y. C. S. Percepção sobre a efetivação das políticas públicas urbanas na revalorização e preservação do patrimônio histórico , cultural e público de espaços de lazer em São Luís , Maranhão. **Revista Interdisciplinar em Cultura e Sociedade (RICS)**, vol. 4, no. Número Especial, p. 613–633, 2018. .

PORTEOUS, J.; KERMANI, A. **Structural timber design to Eurocode 5**. New Jersey: Blackwell Publishing, 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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.107>.

REIS, J. P.; MOURA, M. F. S. F.; SILVA, F. G. A.; DOURADO, N. Dimensional optimization of carbon-epoxy bars for reinforcement of wood beams. **Composites Part B: Engineering**, vol. 139, no. December 2017, p. 163–170, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.11.046>.

RIGGIO, M.; TOMASI, R.; PIAZZA, M. Refurbishment of a traditional timber floor with a reversible technique: Importance of the investigation campaign for design and control of the intervention. **International Journal of Architectural Heritage**, vol. 8, no. 1, p. 74–93, 2014. <https://doi.org/10.1080/15583058.2012.670364>.

SAAD, K.; LENGYEL, A. Accurate finite element modelling of knots and related fibre deviations in structural timber. **Journal of King Saud University - Engineering Sciences**, no. xxxx, 2022. DOI 10.1016/j.jksues.2022.01.005. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2022.01.005>.

SAAD, K.; LENGYEL, A. Inverse calculation of timber-CFRP composite beams using finite element analysis. **Periodica Polytechnica Civil Engineering**, vol. 65, no. 2, p. 437–449, 2021. <https://doi.org/10.3311/PPci.16527>.

SCHOBBER, K. U.; HARTE, A. M.; KLIGER, R.; JOCKWER, R.; XU, Q.; CHEN, J. F. FRP reinforcement of timber structures. **Construction and Building Materials**, vol. 97, p. 106–118, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.020>.

SHABANI, A.; KIOUMARSI, M.; PLEVRIS, V.; STAMATOPOULOS, H. Structural vulnerability assessment of heritage timber buildings: A methodological proposal. **Forests**, vol. 11, no. 8, p. 1–20, 2020. <https://doi.org/10.3390/f11080881>.

SILVA, M. A. L.; MOURA, M. F. S. F.; MORAIS, J. J. L. Numerical analysis of the ENF test for mode II wood fracture. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, vol. 37, no. 9, p. 1334–1344, 2006.

<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.08.014>.

SONG, X.; JIANG, Y.; GU, X.; WU, Y. Load-Carrying Capacity of Lengthwise Cracked Wood Beams Retrofitted by Self-Tapping Screws. **Journal of Structural Engineering**, vol. 143, no. 6, p. 1–11, 2017. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0001742](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0001742).

SORIANO, H. L. **Elementos finitos: formulação e aplicação na estática e dinâmica das estruturas**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2009.

SOUZA, H. A. de; ARAÚJO, E. C. de; FRANÇA, K. D. L. Reforço de vigas de madeira com elementos de aço. **Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural**, vol. 13, no. 3, p. 52–67, 2016. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10535/rsae.v13i3.306>.

SOUZA, R. V.; DEMENIGHI, A. L. Tratamentos preservantes naturais de madeiras de floresta plantada para a construção civil. **MIX Sustentável**, vol. 3, no. 1, p. 84, 2017. <https://doi.org/10.29183/2447-3073.mix2017.v3.n1.84-92>.

ŠPILÁK, D.; MAJLINGOVÁ, A.; KAČÍKOVÁ, D.; TISCHLER, P. Determining the Charred Layer of Wooden Beams with Finite Element Analysis Based on Enthalpy Approach. **Buildings**, vol. 12, no. 7, 2022. <https://doi.org/10.3390/buildings12070875>.

TANKUT, N.; TANKUT, A. N.; ZOR, M. Finite Element Analysis of Wood Materials. **Drvna Industrija**, vol. 65, no. 2, p. 159–171, 2014. <https://doi.org/10.5552/drind.2014.1254>.

TORERO, J. L. Fire Safety of Historical Buildings: Principles and Methodological Approach. **International Journal of Architectural Heritage**, vol. 13, no. 7, p. 926–940, 2019. <https://doi.org/10.1080/15583058.2019.1612484>.

TOUSSAINT, E.; FOURNELY, E.; MOUTOU PITTI, R.; GRÉDIAC, M. Studying the mechanical behavior of notched wood beams using full-field measurements. **Engineering Structures**, vol. 113, p. 277–286, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.01.052>.

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. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.778.1072>.

VERBIST, M.; MATOS, F. T.; BRANCO, J. M. Structural and health assessment of historic timber roofs from the Convent of Christ in Tomar. **Journal of Civil Structural Health Monitoring**, vol. 9, no. 4, p. 491–511, 2019. <https://doi.org/10.1007/s13349-019-00347-6>.

VILELA, R.; MASCIA, N. T. Avaliação de propriedade mecânicas da madeira Pinus taeda provenientes de placas de cross laminated timber. **Ambiente Construído**, vol. 21, no. 4, p. 89–110, 2021. <https://doi.org/10.4322/floram.2012.041>.

WANG, P.; LI, S.; MACCHIONI, N.; PALANTI, S.; MILANI, G. Comprehensive evaluation method of historical timber structural building taking Fujju Zhou house as an example. **Forests**, vol. 12, no. 9, p. 1172, 2021. <https://doi.org/10.3390/f12091172>.

WANG, W. Optimization of larch timbering cross section based on finite element. **EAI Endorsed Transactions on Scalable Information Systems**, vol. 9, no. 5, p. 1–8,

2022. <https://doi.org/10.4108/eai.26-1-2022.172998>.

WASEEM, S. A.; MANZOOR, Z.; BHAT, J. A. An Experimental Investigation into the Behavior of Steel-Timber Composite Beams. **Practice Periodical on Structural Design and Construction**, vol. 27, no. 1, p. 04021055, 2022.

[https://doi.org/10.1061/\(asce\)sc.1943-5576.0000636](https://doi.org/10.1061/(asce)sc.1943-5576.0000636).

WDOWIAK-POSTULAK, A. Natural fibre as reinforcement for vintage wood.

**Materials**, vol. 13, no. 21, p. 1–17, 2020. <https://doi.org/10.3390/ma13214799>.

WOLENSKI, A. R. V.; PEIXOTO, R. G.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R.; DIAS, A. M. P. G. Estimativa da resistência característica à tração da madeira na direção paralela às fibras por meio de modelos probabilísticos. **Matéria (Rio de Janeiro)**, vol. 24, no. 4, 2019. <https://doi.org/10.1590/s1517-707620190004.0856>.

XIAO, Q.; DOUDAK, G.; MOHAREB, M. Numerical and experimental investigation of lateral torsional buckling of wood beams. **Engineering Structures**, vol. 151, p. 85–92, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.08.020>.

XUE, J.; REN, G.; ZHANG, J.; XU, D. Seismic performance of semi-tenon joints reinforced by steel angle in traditional timber buildings. **Advances in Structural Engineering**, vol. 23, no. 11, p. 2318–2332, 2020.

<https://doi.org/10.1177/1369433220912349>.

YILMAZ KARAMAN, O.; TANAC ZEREN, M. A study on timber structural elements of a traditional turkish house. **Advanced Materials Research**, vol. 778, p. 42–49, 2013. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.778.42>.

YOSHIHARA, H. Initiation and propagation fracture toughness of solid wood under the mixed Mode I/II condition examined by mixed-mode bending test. **Engineering**

---

**Fracture Mechanics**, vol. 104, p. 1–15, 2013.

<https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2013.03.023>.

YU, P.; YANG, Q.; LAW, S. seong. Lateral behavior of heritage timber frames with loose nonlinear mortise-tenon connections. **Structures**, vol. 33, no. April, p. 581–592, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.04.061>.

ZHANG, J.; LIU, Z. H.; XU, Y. X.; MA, S. W.; XU, Q. F. An experimental and numerical study on the charring rate of timber beams exposed to three-side fire. **Science China Technological Sciences**, vol. 55, no. 12, p. 3434–3444, 2012. <https://doi.org/10.1007/s11431-012-4996-1>.

ZHANG, J.; XU, Q. feng; XU, Y. xiang; ZHANG, M. Research on residual bending capacities of used wood members based on the correlation between non-destructive testing results and the mechanical properties of wood. **Journal of Zhejiang University: Science A**, vol. 16, no. 7, p. 541–550, 2015. <https://doi.org/10.1631/jzus.A1400276>.

ZIENKIEWICZ, O. C.; TAYLOR, R. L. **The Finite Element Method Volume 1 : The Basis**. 5th ed. Barcelona: Butterworth Heinemann, 2000. vol. 1, .

**APÊNDICE A – ARTIGOS SELECIONADOS NA  
REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE SIMULAÇÃO DE  
VIGAS DE MADEIRA PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS  
FINITOS**

**APÊNDICE A – ARTIGOS SELECIONADOS NA REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE SIMULAÇÃO DE VIGAS DE MADEIRA PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS**

<b>Nome do periódico</b>	<b>Título do artigo</b>	<b>Autores</b>	<b>Ano de publicação</b>
<i>Materiales de Construccion</i>	<i>Determinación de la curva tensión-deformación en madera de 'Pinus sylvestris' L. para la simulación numérica de vigas de madera libre de defectos</i>	Baño, V. Argüelles-Bustillo, R. Regueira, R. Gaita, M.	2012
<i>Biosystems Engineering</i>	<i>Determination of the influence of size and position of knots on load capacity and stress distribution in timber beams of Pinus sylvestris using finite element model</i>	Baño, Vanessa Arriaga, Francisco Gaita, Manuel	2013
<i>International Journal of Mechanical Sciences</i>	<i>Accurate modelling of the linear elastic flexure of composite beams warped by midlayer slip, with emphasis on concrete-timber systems</i>	Bardella, Lorenzo Paterlini, Luisa Leronni, Alessandro	2014
<i>Engineering Structures</i>	<i>Modelling of moment transmitting beam-to-column timber connections accounting for frictional transmission</i>	Basterrechea-Arévalo, M. Cabrero, J. M. Iraola, B. Goñi, R.	2021
<i>Construction and Building Materials</i>	<i>Process development for the manufacture of fiber reinforced wood composites (FRWC)</i>	Bergner, K. Tosch, M. Zauer, M. Spickenheuer, A. Wagenführ, A. Heinrich, G.	2018
<i>Journal of the South African Institution of Civil Engineering</i>	<i>Experimental and analytical investigation into the stiffness of composite steel-reinforced timber beams with flexible shear connectors</i>	Burdzik, W M G Skorpen, S	2016
<i>Construction and Building Materials</i>	<i>Experimental and numerical evaluation of composite repairs on wood beams damaged by cross-graining</i>	Campilho, R. D.S.G. Moura, M. F.S.F. Barreto, A. M.J.P. Morais, J. J.L. Domingues, J. J.M.S.	2010

Continuação...

<i>Composites Part A: Applied Science and Manufacturing</i>	<i>Fracture behaviour of damaged wood beams repaired with an adhesively-bonded composite patch</i>	Campilho, R. D.S.G. Moura, M. F.S.F. Barreto, A. M.J.P. Morais, J. J.L. Domingues, J. J.M.S.	2009
<i>Journal of Composites for Construction</i>	<i>Functionally Graded Adhesive Patch Repairs of Wood Beams in Civil Applications</i>	Carbas, R. J. C. Viana, G. M. S. O. Silva, L. F. M. Critchlow, G. W.	2015
<i>Structural Safety</i>	<i>Random imperfection fields to model the size effect in laboratory wood specimens</i>	Casciati, Sara Domaneschi, Marco	2007
<i>Mechanics and Industry</i>	<i>Modeling the influence of connecting elements in wood products behavior: A numerical multi-scale approach</i>	Chevalier, Luc Makhlouf, Heba Jacquet-Faucillon, Benoît Launay, Eric	2018
<i>Composite Structures</i>	<i>Fully reversible reinforcement of softwood beams with unbonded composite plates</i>	Corradi, Marco Borri, Antonio Castori, Giulio Speranzini, Emanuela	2016
<i>Structural Engineering International</i>	<i>Century-old covered bridge with cantilever beams in China</i>	Dai, Gonglian Ge, Hao Su, Miao Chen, Y. Frank	2017
<i>Advances in Structural Engineering</i>	<i>Finite-element model updating of the traditional beam-column joint in Tibetan heritage buildings using uniform design</i>	Dai, Lu	2020
<i>Wood and Fiber Science</i>	<i>Numerical modeling of the load-deformation behavior of doweled softwood and hardwood joints</i>	Dias, Alfredo Manuel Pereira Geraldés Van De Kuilen, Jan Willem Cruz, Helena Maria Pires Lopes, Sergio Manuel Rodrigues	2010
<i>Engineering Failure Analysis</i>	<i>Nonlinear three-dimensional anisotropic material model for failure analysis of timber</i>	Eslami, Hooman Jayasinghe, Laddu Bhagya Waldmann, Daniele	2021

Continuação...

Forests	<i>Experimental and numerical determination of the mechanical properties of spruce wood</i>	Fajdiga, Gorazd Rajh, Denis Nečemer, Branko Glodež, Srečko Šraml, Matjaž	2019
Wood Science and Technology	<i>A three-dimensional numerical analysis of moisture flow in wood and of the wood's hygro-mechanical and visco-elastic behaviour</i>	Florisson, Sara Vessby, Johan Ormarsson, Sigurdur	2021
Engineering Structures	<i>Experimental study and finite element modelling of Japanese "Nuki" joints - Part two: Racking resistance subjected to different wedge configurations</i>	Guan, Z. W. Kitamori, A. Komatsu, K.	2008
International Journal of Civil Engineering and Technology	<i>The bending behavior of composit timber-steel beams</i>	Hiswa, Ashraf A.M.R. Albutbahak, Oday M.	2018
Engineering Structures	<i>An algorithm to model wood accounting for different tension and compression elastic and failure behaviors</i>	Iraola, B. Cabrero, J. M.	2016
Transportation Research Record	<i>Flexural Capacity Enhancement of Timber Beams Partially Confining the Principal Compression Arch using Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites</i>	Islam, Mashfiquel Siddique, Ashfia Pourhassan, Alireza Chowdhury, Arman Tasnim, Jarin	2019
Construction and Building Materials	<i>Analysis of solid wood beams strengthened with CFRP laminates of distinct lengths</i>	Jesus, Abílio M.P. Pinto, José M.T. Morais, José J.L.	2012
Engineering Structures	<i>Finite element analysis of flexural strengthening of timber beams with Carbon Fibre-Reinforced Polymers</i>	Khelifa, M. Auchet, S. Méausoone, P. J. Celzard, A.	2015
International Journal of Adhesion and Adhesives	<i>Experimental and numerical analysis of CFRP-strengthened finger-jointed timber beams</i>	Khelifa, M. Celzard, A. Oudjene, M. Ruelle, J.	2016
Composite Structures	<i>Numerical analysis of flexural strengthening of timber beams reinforced with CFRP strips</i>	Khelifa, M. Celzard, A.	2014
Journal of Adhesion Science and Technology	<i>Flexural strengthening of finger-jointed Spruce timber beams with CFRP</i>	Khelifa, M. Lahouar, M. A. Celzard, A.	2015

Continuação...

<i>Journal of Adhesion Science and Technology</i>	<i>Analysis of CFRP-strengthened timber beams</i>	Khelifa, M. Vila Loperena, N. Bleron, L. Khennane, A.	2015
<i>Journal of Adhesion Science and Technology</i>	<i>FE simulation of repaired timber beams under tensile load using CFRP patches</i>	Khelifa, Mourad Fierro, Vanessa Celzard, Alain	2014
<i>Engineering Structures</i>	<i>Nonlinear finite element analysis of timber beams and joints using the layered approach and hypoelastic constitutive</i>	Khorsandnia, Nima Valipour, Hamid Crews, Keith	2013
<i>Engineering Structures</i>	<i>Modeling of timber beams strengthened with various CFRP composites</i>	Kim, Yail J. Harries, Kent A.	2010
<i>Magazine of Civil Engineering</i>	<i>Wooden beams with reinforcement along a curvilinear trajectory</i>	Koshcheev, A. A. Roshchina, S. I. Lukin, M. V. Lisyatnikov, M. S.	2018
<i>Construction and Building Materials</i>	<i>Experimental assessment of a full-scale lap scarf timber joint accompanied by a finite element analysis and digital image correlation</i>	Kunecký, Jiří Sebera, Václav Hasníková, Hana Arciszewska-Kędzior, Anna Tippner, Jan Kloiber, Michal	2015
<i>Journal of Wood Science</i>	<i>Study on the flexural behavior of poplar beams externally strengthened by BFRP strips</i>	Liu, Qing Ma, Shengqiang Han, Xia	2020
Matéria	Sistema misto de madeira e concreto: uma abordagem numérico e experimental para altas temperaturas	Molina, Julio Cesar Calil Junior, Carlito	2018
<i>Holzforschung</i>	<i>Determination of Young's modulus and shear modulus by means of deflection curves for wood beams obtained in static bending tests</i>	Murata, Koji Kanazawa, Tsubasa	2007
<i>Construction and Building Materials</i>	<i>Experimental tests and numerical analysis of historic bent timber elements reinforced with CFRP strips</i>	Nowak, Tomasz P. Jasieńko, Jerzy Czepizak, Dariusz	2013

Continuação...

Composite Structures	<i>Finite element modelling of the nonlinear load-slip behaviour of full-scale timber-to-concrete composite T-shaped beams</i>	Oudjene, M. Meghlat, E. M. Ait-Aider, H. Lardeur, P. Khelifa, M. Batoz, J. L.	2018
Journal of Adhesion Science and Technology	<i>Application of numerical modelling to dowel-welded wood joints</i>	Oudjene, M. Khelifa, M. Segovia, C. Pizzi, A.	2010
Engineering Structures	<i>Numerical analyses of timber beams with stop- splayed scarf carpentry joints</i>	Patalas, Filip Karolak, Anna Nowak, Tomasz P.	2022
Composites Part B: Engineering	<i>Dimensional optimization of carbon-epoxy bars for reinforcement of wood beams</i>	Reis, J. P. Moura, M. F.S.F. Silva, F. G.A. Dourado, N.	2018
Journal of King Saud University - Engineering Sciences	<i>Accurate finite element modelling of knots and related fibre deviations in structural timber</i>	Saad, Khaled Lengyel, András	2022
Periodica Polytechnica Civil Engineering	<i>Inverse calculation of timber-CFRP composite beams using finite element analysis</i>	Saad, Khaled Lengyel, András	2021
Composites Part A: Applied Science and Manufacturing	<i>Numerical analysis of the ENF test for mode II wood fracture</i>	Silva, M. A.L. Moura, M. F.S.F. Morais, J. J.L.	2006
Journal of Structural Engineering	<i>Load-Carrying Capacity of Lengthwise Cracked Wood Beams Retrofitted by Self-Tapping Screws</i>	Song, Xiaobin Jiang, Yingmin Gu, Xianglin Wu, Yajie	2017
Buildings	<i>Determining the Charred Layer of Wooden Beams with Finite Element Analysis Based on Enthalpy Approach</i>	Špilák, Dominik Majlingová, Andrea Kačíková, Danica Tischler, Patrik	2022
Engineering Structures	<i>Studying the mechanical behavior of notched wood beams using full-field measurements</i>	Toussaint, E. Fournely, E. Moutou Pitti, R. Grédiac, M.	2016

Continuação...

<i>EAI Endorsed Transactions on Scalable Information Systems</i>	<i>Optimization of larch timbering cross section based on finite element</i>	Wang, Wei	2022
<i>Engineering Structures</i>	<i>Numerical and experimental investigation of lateral torsional buckling of wood beams</i>	Xiao, Q. Doudak, G. Mohareb, M.	2017
<i>Advances in Structural Engineering</i>	<i>Seismic performance of semi-tenon joints reinforced by steel angle in traditional timber buildings</i>	Xue, Jianyang Ren, Guoqi Zhang, Jiaheng Xu, Dan	2020
<i>Engineering Fracture Mechanics</i>	<i>Initiation and propagation fracture toughness of solid wood under the mixed Mode I/II condition examined by mixed-mode bending test</i>	Yoshihara, Hiroshi	2013
<i>Structures</i>	<i>Lateral behavior of heritage timber frames with loose nonlinear mortise-tenon connections</i>	Yu, Pan Yang, Qingshan Law, Siu seong	2021
<i>Science China Technological Sciences</i>	<i>An experimental and numerical study on the charring rate of timber beams exposed to three-side fire</i>	Zhang, Jin Liu, Zeng Hui Xu, Yi Xiang Ma, Shu Wei Xu, Qing Feng	2012
<i>Journal of Zhejiang University: Science A</i>	<i>Research on residual bending capacities of used wood members based on the correlation between non-destructive testing results and the mechanical properties of wood</i>	Zhang, Jin Xu, Qing feng Xu, Yi xiang Zhang, Ming	2015

**APÊNDICE B – DESCRIÇÃO DOS CÓDIGOS  
ALFANUMÉRICOS DO GRUPO PRINCIPAL**

## APÊNDICE B – DESCRIÇÃO DOS CÓDIGOS ALFANUMÉRICOS DO GRUPO PRINCIPAL

<b>Código</b>	<b>Classe de resistência da madeira</b>	<b>Altura da perda de seção (mm)</b>	<b>Região do defeito</b>	<b>Diâmetro dos parafusos (mm)</b>	<b>Qtd. de parafusos</b>
D20	D20	-	-	-	-
D30	D30	-	-	-	-
D40	D40	-	-	-	-
D50	D50	-	-	-	-
D60	D60	-	-	-	-
D20-45T	D20	45	Tração	-	-
D30-45T	D30	45	Tração	-	-
D40-45T	D40	45	Tração	-	-
D50-45T	D50	45	Tração	-	-
D60-45T	D60	45	Tração	-	-
D20-90T	D20	90	Tração	-	-
D30-90T	D30	90	Tração	-	-
D40-90T	D40	90	Tração	-	-
D50-90T	D50	90	Tração	-	-
D60-90T	D60	90	Tração	-	-
D20-135T	D20	135	Tração	-	-
D30-135T	D30	135	Tração	-	-
D40-135T	D40	135	Tração	-	-
D50-135T	D50	135	Tração	-	-
D60-135T	D60	135	Tração	-	-
D20-45C	D20	45	Compressão	-	-
D30-45C	D30	45	Compressão	-	-
D40-45C	D40	45	Compressão	-	-
D50-45C	D50	45	Compressão	-	-
D60-45C	D60	45	Compressão	-	-
D20-90C	D20	90	Compressão	-	-
D30-90C	D30	90	Compressão	-	-
D40-90C	D40	90	Compressão	-	-
D50-90C	D50	90	Compressão	-	-

APÊNDICE B – DESCRIÇÃO DOS CÓDIGOS ALFANUMÉRICOS DO GRUPO PRINCIPAL 146

Continuação...

D60-90C	D60	90	Compressão	-	-
D20-135C	D20	135	Compressão	-	-
D30-135C	D30	135	Compressão	-	-
D40-135C	D40	135	Compressão	-	-
D50-135C	D50	135	Compressão	-	-
D60-135C	D60	135	Compressão	-	-
D20-45T-2A	D20	45	Tração	12,7	2
D30-45T-2A	D30	45	Tração	12,7	2
D40-45T-2A	D40	45	Tração	12,7	2
D50-45T-2A	D50	45	Tração	12,7	2
D60-45T-2A	D60	45	Tração	12,7	2
D20-90T-2A	D20	90	Tração	12,7	2
D30-90T-2A	D30	90	Tração	12,7	2
D40-90T-2A	D40	90	Tração	12,7	2
D50-90T-2A	D50	90	Tração	12,7	2
D60-90T-2A	D60	90	Tração	12,7	2
D20-135T-2A	D20	135	Tração	12,7	2
D30-135T-2A	D30	135	Tração	12,7	2
D40-135T-2A	D40	135	Tração	12,7	2
D50-135T-2A	D50	135	Tração	12,7	2
D60-135T-2A	D60	135	Tração	12,7	2
D20-45C-2A	D20	45	Compressão	12,7	2
D30-45C-2A	D30	45	Compressão	12,7	2
D40-45C-2A	D40	45	Compressão	12,7	2
D50-45C-2A	D50	45	Compressão	12,7	2
D60-45C-2A	D60	45	Compressão	12,7	2
D20-90C-2A	D20	90	Compressão	12,7	2
D30-90C-2A	D30	90	Compressão	12,7	2
D40-90C-2A	D40	90	Compressão	12,7	2
D50-90C-2A	D50	90	Compressão	12,7	2
D60-90C-2A	D60	90	Compressão	12,7	2
D20-135C-2A	D20	135	Compressão	12,7	2
D30-135C-2A	D30	135	Compressão	12,7	2

APÊNDICE B – DESCRIÇÃO DOS CÓDIGOS ALFANUMÉRICOS DO GRUPO PRINCIPAL 147

Continuação...

D40-135C-2A	D40	135	Compressão	12,7	2
D50-135C-2A	D50	135	Compressão	12,7	2
D60-135C-2A	D60	135	Compressão	12,7	2
D20-45T-2B	D20	45	Tração	15,9	2
D30-45T-2B	D30	45	Tração	15,9	2
D40-45T-2B	D40	45	Tração	15,9	2
D50-45T-2B	D50	45	Tração	15,9	2
D60-45T-2B	D60	45	Tração	15,9	2
D20-90T-2B	D20	90	Tração	15,9	2
D30-90T-2B	D30	90	Tração	15,9	2
D40-90T-2B	D40	90	Tração	15,9	2
D50-90T-2B	D50	90	Tração	15,9	2
D60-90T-2B	D60	90	Tração	15,9	2
D20-135T-2B	D20	135	Tração	15,9	2
D30-135T-2B	D30	135	Tração	15,9	2
D40-135T-2B	D40	135	Tração	15,9	2
D50-135T-2B	D50	135	Tração	15,9	2
D60-135T-2B	D60	135	Tração	15,9	2
D20-45C-2B	D20	45	Compressão	15,9	2
D30-45C-2B	D30	45	Compressão	15,9	2
D40-45C-2B	D40	45	Compressão	15,9	2
D50-45C-2B	D50	45	Compressão	15,9	2
D60-45C-2B	D60	45	Compressão	15,9	2
D20-90C-2B	D20	90	Compressão	15,9	2
D30-90C-2B	D30	90	Compressão	15,9	2
D40-90C-2B	D40	90	Compressão	15,9	2
D50-90C-2B	D50	90	Compressão	15,9	2
D60-90C-2B	D60	90	Compressão	15,9	2
D20-135C-2B	D20	135	Compressão	15,9	2
D30-135C-2B	D30	135	Compressão	15,9	2
D40-135C-2B	D40	135	Compressão	15,9	2
D50-135C-2B	D50	135	Compressão	15,9	2
D60-135C-2B	D60	135	Compressão	15,9	2

APÊNDICE B – DESCRIÇÃO DOS CÓDIGOS ALFANUMÉRICOS DO GRUPO PRINCIPAL 148

Continuação...

D20-45T-4A	D20	45	Tração	12,7	4
D30-45T-4A	D30	45	Tração	12,7	4
D40-45T-4A	D40	45	Tração	12,7	4
D50-45T-4A	D50	45	Tração	12,7	4
D60-45T-4A	D60	45	Tração	12,7	4
D20-90T-4A	D20	90	Tração	12,7	4
D30-90T-4A	D30	90	Tração	12,7	4
D40-90T-4A	D40	90	Tração	12,7	4
D50-90T-4A	D50	90	Tração	12,7	4
D60-90T-4A	D60	90	Tração	12,7	4
D20-135T-4A	D20	135	Tração	12,7	4
D30-135T-4A	D30	135	Tração	12,7	4
D40-135T-4A	D40	135	Tração	12,7	4
D50-135T-4A	D50	135	Tração	12,7	4
D60-135T-4A	D60	135	Tração	12,7	4
D20-45C-4A	D20	45	Compressão	12,7	4
D30-45C-4A	D30	45	Compressão	12,7	4
D40-45C-4A	D40	45	Compressão	12,7	4
D50-45C-4A	D50	45	Compressão	12,7	4
D60-45C-4A	D60	45	Compressão	12,7	4
D20-90C-4A	D20	90	Compressão	12,7	4
D30-90C-4A	D30	90	Compressão	12,7	4
D40-90C-4A	D40	90	Compressão	12,7	4
D50-90C-4A	D50	90	Compressão	12,7	4
D60-90C-4A	D60	90	Compressão	12,7	4
D20-135C-4A	D20	135	Compressão	12,7	4
D30-135C-4A	D30	135	Compressão	12,7	4
D40-135C-4A	D40	135	Compressão	12,7	4
D50-135C-4A	D50	135	Compressão	12,7	4
D60-135C-4A	D60	135	Compressão	12,7	4
D20-45T-4B	D20	45	Tração	15,9	4
D30-45T-4B	D30	45	Tração	15,9	4
D40-45T-4B	D40	45	Tração	15,9	4

APÊNDICE B – DESCRIÇÃO DOS CÓDIGOS ALFANUMÉRICOS DO GRUPO PRINCIPAL 149

Continuação...

D50-45T-4B	D50	45	Tração	15,9	4
D60-45T-4B	D60	45	Tração	15,9	4
D20-90T-4B	D20	90	Tração	15,9	4
D30-90T-4B	D30	90	Tração	15,9	4
D40-90T-4B	D40	90	Tração	15,9	4
D50-90T-4B	D50	90	Tração	15,9	4
D60-90T-4B	D60	90	Tração	15,9	4
D20-135T-4B	D20	135	Tração	15,9	4
D30-135T-4B	D30	135	Tração	15,9	4
D40-135T-4B	D40	135	Tração	15,9	4
D50-135T-4B	D50	135	Tração	15,9	4
D60-135T-4B	D60	135	Tração	15,9	4
D20-45C-4B	D20	45	Compressão	15,9	4
D30-45C-4B	D30	45	Compressão	15,9	4
D40-45C-4B	D40	45	Compressão	15,9	4
D50-45C-4B	D50	45	Compressão	15,9	4
D60-45C-4B	D60	45	Compressão	15,9	4
D20-90C-4B	D20	90	Compressão	15,9	4
D30-90C-4B	D30	90	Compressão	15,9	4
D40-90C-4B	D40	90	Compressão	15,9	4
D50-90C-4B	D50	90	Compressão	15,9	4
D60-90C-4B	D60	90	Compressão	15,9	4
D20-135C-4B	D20	135	Compressão	15,9	4
D30-135C-4B	D30	135	Compressão	15,9	4
D40-135C-4B	D40	135	Compressão	15,9	4
D50-135C-4B	D50	135	Compressão	15,9	4
D60-135C-4B	D60	135	Compressão	15,9	4
D20-45T-6A	D20	45	Tração	12,7	6
D30-45T-6A	D30	45	Tração	12,7	6
D40-45T-6A	D40	45	Tração	12,7	6
D50-45T-6A	D50	45	Tração	12,7	6
D60-45T-6A	D60	45	Tração	12,7	6
D20-90T-6A	D20	90	Tração	12,7	6

APÊNDICE B – DESCRIÇÃO DOS CÓDIGOS ALFANUMÉRICOS DO GRUPO PRINCIPAL 150

Continuação...

D30-90T-6A	D30	90	Tração	12,7	6
D40-90T-6A	D40	90	Tração	12,7	6
D50-90T-6A	D50	90	Tração	12,7	6
D60-90T-6A	D60	90	Tração	12,7	6
D20-135T-6A	D20	135	Tração	12,7	6
D30-135T-6A	D30	135	Tração	12,7	6
D40-135T-6A	D40	135	Tração	12,7	6
D50-135T-6A	D50	135	Tração	12,7	6
D60-135T-6A	D60	135	Tração	12,7	6
D20-45C-6A	D20	45	Compressão	12,7	6
D30-45C-6A	D30	45	Compressão	12,7	6
D40-45C-6A	D40	45	Compressão	12,7	6
D50-45C-6A	D50	45	Compressão	12,7	6
D60-45C-6A	D60	45	Compressão	12,7	6
D20-90C-6A	D20	90	Compressão	12,7	6
D30-90C-6A	D30	90	Compressão	12,7	6
D40-90C-6A	D40	90	Compressão	12,7	6
D50-90C-6A	D50	90	Compressão	12,7	6
D60-90C-6A	D60	90	Compressão	12,7	6
D20-135C-6A	D20	135	Compressão	12,7	6
D30-135C-6A	D30	135	Compressão	12,7	6
D40-135C-6A	D40	135	Compressão	12,7	6
D50-135C-6A	D50	135	Compressão	12,7	6
D60-135C-6A	D60	135	Compressão	12,7	6
D20-45T-6B	D20	45	Tração	15,9	6
D30-45T-6B	D30	45	Tração	15,9	6
D40-45T-6B	D40	45	Tração	15,9	6
D50-45T-6B	D50	45	Tração	15,9	6
D60-45T-6B	D60	45	Tração	15,9	6
D20-90T-6B	D20	90	Tração	15,9	6
D30-90T-6B	D30	90	Tração	15,9	6
D40-90T-6B	D40	90	Tração	15,9	6
D50-90T-6B	D50	90	Tração	15,9	6

APÊNDICE B – DESCRIÇÃO DOS CÓDIGOS ALFANUMÉRICOS DO GRUPO PRINCIPAL 151

Continuação...

D60-90T-6B	D60	90	Tração	15,9	6
D20-135T-6B	D20	135	Tração	15,9	6
D30-135T-6B	D30	135	Tração	15,9	6
D40-135T-6B	D40	135	Tração	15,9	6
D50-135T-6B	D50	135	Tração	15,9	6
D60-135T-6B	D60	135	Tração	15,9	6
D20-45C-6B	D20	45	Compressão	15,9	6
D30-45C-6B	D30	45	Compressão	15,9	6
D40-45C-6B	D40	45	Compressão	15,9	6
D50-45C-6B	D50	45	Compressão	15,9	6
D60-45C-6B	D60	45	Compressão	15,9	6
D20-90C-6B	D20	90	Compressão	15,9	6
D30-90C-6B	D30	90	Compressão	15,9	6
D40-90C-6B	D40	90	Compressão	15,9	6
D50-90C-6B	D50	90	Compressão	15,9	6
D60-90C-6B	D60	90	Compressão	15,9	6
D20-135C-6B	D20	135	Compressão	15,9	6
D30-135C-6B	D30	135	Compressão	15,9	6
D40-135C-6B	D40	135	Compressão	15,9	6
D50-135C-6B	D50	135	Compressão	15,9	6
D60-135C-6B	D60	135	Compressão	15,9	6

**APÊNDICE C – DESCRIÇÃO DOS CÓDIGOS  
ALFANUMÉRICOS DO GRUPO DE COMPARAÇÃO**

## APÊNDICE C – DESCRIÇÃO DOS CÓDIGOS ALFANUMÉRICOS DO GRUPO DE COMPARAÇÃO

<b>Código</b>	<b>Classe de resistência da madeira</b>	<b>Altura da perda de seção (mm)</b>	<b>Região do defeito</b>
D20-45T-CFRP	D20	45	Tração
D30-45T-CFRP	D30	45	Tração
D40-45T-CFRP	D40	45	Tração
D50-45T-CFRP	D50	45	Tração
D60-45T-CFRP	D60	45	Tração
D20-90T-CFRP	D20	90	Tração
D30-90T-CFRP	D30	90	Tração
D40-90T-CFRP	D40	90	Tração
D50-90T-CFRP	D50	90	Tração
D60-90T-CFRP	D60	90	Tração
D20-135T-CFRP	D20	135	Tração
D30-135T-CFRP	D30	135	Tração
D40-135T-CFRP	D40	135	Tração
D50-135T-CFRP	D50	135	Tração
D60-135T-CFRP	D60	135	Tração
D20-45C-CFRP	D20	45	Compressão
D30-45C-CFRP	D30	45	Compressão
D40-45C-CFRP	D40	45	Compressão
D50-45C-CFRP	D50	45	Compressão
D60-45C-CFRP	D60	45	Compressão
D20-90C-CFRP	D20	90	Compressão
D30-90C-CFRP	D30	90	Compressão
D40-90C-CFRP	D40	90	Compressão
D50-90C-CFRP	D50	90	Compressão
D60-90C-CFRP	D60	90	Compressão
D20-135C-CFRP	D20	135	Compressão
D30-135C-CFRP	D30	135	Compressão
D40-135C-CFRP	D40	135	Compressão
D50-135C-CFRP	D50	135	Compressão
D60-135C-CFRP	D60	135	Compressão