

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
***Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil***

**ANÁLISE NUMÉRICA DO DESEMPENHO MECÂNICO DE  
LIGAÇÕES FEITAS COM BARRAS DE FIBRA DE VIDRO EM  
ESTRUTURAS DE MADEIRA**

**Lucas Delloso Penteado**

São Carlos  
2024

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**ANÁLISE NUMÉRICA DO DESEMPENHO MECÂNICO DE  
LIGAÇÕES FEITAS COM BARRAS DE FIBRA DE VIDRO EM  
ESTRUTURAS DE MADEIRA**

Tese apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos para a obtenção do Título de Doutor em Engenharia Civil.

**Área de Concentração:** Estruturas

**Candidato:** Lucas Delloso Penteado

**Orientador:** Prof. Dr. André Luís Christoforo

São Carlos  
2024



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**

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

---

**Folha de Aprovação**

---

Defesa de Tese de Doutorado do candidato Lucas Delosso Penteadó, realizada em 12/08/2024.

**Comissão Julgadora:**

Prof. Dr. Andre Luis Christoforo (UFSCar)

Prof. Dr. Diego Henrique de Almeida (UNIR)

Prof. Dr. César Augusto Galvão de Moraes (UNESP)

Prof. Dr. Sérgio Augusto Mello da Silva (UNESP)

Prof. Dr. Rodrigo Teixeira Santos Freire (UFSJ)

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

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus e a Nossa Senhora de Fátima, que sempre me iluminaram durante toda a trajetória da minha vida.

Ao professor Dr. André Luís Christoforo pela paciência, confiança, compreensão e constante estímulo durante toda a trajetória, os meus mais sinceros agradecimentos.

Aos professores Dr. Eduardo Chahud e Dr. Jorge Daniel de Melo Moura pelas contribuições e sugestões dadas no processo de qualificação para o enriquecimento desta tese.

Aos amigos da “Patota” e aos “Bonitos de Bochum” que entenderam a minha ausência nos nossos encontros e comemorações, mas que sempre me encorajaram a continuar na busca pelo conhecimento.

Aos colegas de doutorado Marcos Vinício de Camargo, Felipe Nascimento Arroyo e Iuri Fazolin Fraga os quais compartilharam conhecimento e me ajudaram durante o doutorado.

Aos meus pais, Rosângela e Dirceu, pelo exemplo de seres humanos e por me apoiarem sempre na busca de meus objetivos. Ao meu irmão Eduardo que sempre solícito, ajudava nos momentos difíceis da pesquisa, mas sempre com sábias palavras me encorajavam, meu muito obrigado. A minha cunhada Carolina que me mostrou que as vezes a vida pode ser mais leve e tranquila. As minhas preciosas sobrinhas Eliza e Mariana que “estreadam” nesse mundo no durante o meu doutorado, e me incumbiram com a “responsabilidade” de tio coruja, a qual sou eternamente grato. *In memoriam* a Noélia, minha avó, que se despediu dessa vida no primeiro ano do meu doutorado, mas nunca me esquecerei das palavras motivacionais e de carinho por mim e por sempre me incentivar em buscar o conhecimento.

Aos colegas de trabalho do Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba (IPPUC), os quais conheci após minha qualificação e acompanharam de perto parte dessa caminhada.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) -Código de Financiamento 001.

À CAPES pelo apoio financeiro para o desenvolvimento desta pesquisa.

## RESUMO

PENTEADO, Lucas Delosso. **Análise numérica do desempenho mecânico de ligações feitas com barras de fibra de vidro em estruturas de madeira.** 2024. Tese Apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos.

Alinhado aos avanços tecnológicos, a indústria da construção civil em todo o mundo tem buscado sistemas construtivos mais eficientes em relação ao aumento de produtividade, redução de desperdício de materiais e atendimento à crescente demanda. A combinação da madeira com as tecnologias atuais permite a utilização desse material em estruturas de grandes dimensões, tanto na idealização do projeto arquitetônico como no desenvolvimento do projeto estrutural. Estruturas robustas, em altura ou em vão, requerem elementos estruturais com grandes seções transversais gerando conexões entre os elementos. Portanto, as conexões se tornaram um importante e usual elemento quando a madeira é utilizada como elemento estrutural. Esta pesquisa analisou o comportamento de uma ligação de estrutura de madeira, de modo numérico, ao substituir os tradicionais pinos metálicos por pinos confeccionados a partir de barras de Fibra de Vidro (GFRP). Realizou-se a etapa de simulação numérica, com a finalidade de calibrar um modelo numérico com base nos resultados obtidos nos ensaios das ligações, utilizando-se o software Abaqus. Após a calibração do modelo, procedeu-se um estudo paramétrico variando as seguintes características das ligações: (a) Diâmetro dos pinos de GFRP, (b) Quantidade de pinos, (c) Características geométricas da ligação e (d) Espécies de madeira. Com o estudo paramétrico realizado, foi proposto um modelo de regressão a múltiplas variáveis para a estimativa da força última nas ligações que apresenta Coeficiente de Correlação ( $R^2$ ) de 75,64%. O modelo proposto foi comparado quanto à precisão com o modelo de Johansen, verificando-se que esse modelo superestima os valores de força de ruptura em até 56% quando comparado com os valores encontrados pelo modelo proposto. Tal situação é justificada, pois o modelo proposto por Johansen super estima os valores da força última a favor da segurança.

**Palavras-chave:** Estruturas de Madeira, Conexões, Modelo, Força última, GFRP, MEF.

# ABSTRACT

PENTEADO, Lucas Delloso. **Numerical analysis of the mechanical performance of connections made with fiberglass bars in wooden structures.** 2024. PhD Thesis Submitted to the Postgraduate Program in Civil Engineering at the Federal University of São Carlos.

In line with technological advances, the construction industry around of the world has sought more efficient construction systems in relation to aspects such as increased productivity, reduced material waste and meeting growing demand. The combination of wood with current technologies allows the use of this material in large structures, both in the idealization of modern projects and in the development of structural projects. Large structures, in height or in span, require structural elements with large transversal extensions generating connections between the elements. Therefore, connections have become an important and common element when wood is used as a structural element. This research analyzed the behavior of a wooden structure connection numerically when replacing traditional metallic connectors by connectors made from fiberglass bars (GFRP). A numerical simulation stage was carried out, with the purpose of calibrating a numerical model based on the results obtained in connection tests, using the Abaqus software. After securing the model, carry out a parametric study varying the following characteristics of the connections: (a) Diameter of the GFRP pins, (b) Number of pins, (c) Geometric characteristics of the connection and (d) Wood species. With the parametric study carried out, a multiple variable regression model was proposed to estimate the ultimate strength in connections, which presents a Correlation Coefficient ( $R^2$ ) of 75.64%. The proposed model was compared with the accuracy of the Johansen model and it was obtained that the Johansen model overestimates the rupture force values by up to 56% when compared with the values found by the proposed model. This situation is justified because the proposed model by Johansen overestimates the values of ultimate force in favor of safety.

**Keywords:** Wooden Structures, Connections, Model, Ultimate Force, GFRP, FEM

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: (a) Pinos metálicos, (b) Cavilhas e (c) Chapas dentadas .....	17
Figura 1.2: (a) Elementos de Pinos Metálicos e Pregos e (b) Arruelas Metálicas e (c) Entalhes.....	17
Figura 1.3: Conexões com pinos metálicos.....	18
Figura 1.4: Reforços em formato de lâminas (a) CFRP, (b) GFRP (c) BFRP e (d) AFRP. Em formato de barras (e) CFRP, (f) GFRP (g) BFRP e (h) AFRP.....	20
Figura 1.5: Comportamento mecânico dos polímeros reforçados com fibras e do aço	21
Figura 2.1: Artigos publicados de 2011 a 2024, relacionados com o Tema 1: Estruturas, conexões e polímeros reforçados com fibras .....	29
Figura 2.2: Artigos publicados de 2011 a 2024, relacionados com o Tema 2: Estruturas de madeira, conexões e polímeros reforçados com fibras .....	29
Figura 2.3: Artigos publicados de 2011 a 2024, relacionados com o Tema 3: Estruturas de madeira e conexões utilizando-se polímeros reforçados com fibras de carbono ....	30
Figura 2.4: Artigos publicados de 2011 a 2024, relacionados com o Tema 4: Estruturas de madeira e conexões utilizando-se polímeros reforçados com fibras de vidro .....	31
Figura 2.5: Artigos publicados de 2011 a 2024, relacionados com o Tema 5: Estruturas de madeira e conexões e estimativa de força última .....	31
Figura 2.6: Artigos publicados de 2011 a 2024, relacionados com o Tema 6: Estruturas de madeira e conexões e modelos matemáticos para estimativa de força última .....	32
Figura 2.7: Artigos publicados de 2011 a 2024, relacionados com o Tema 7: Estruturas de madeira, conexões e método de elementos finitos.....	32
Figura 2.8: Análise dos artigos publicados quanto ao Material, tipo de Reforço e Formato utilizado .....	35
Figura 2.9: Modos de ruptura em cisalhamento duplo: (a) embutimento dos pinos nas peças externas, (b) embutimento do pino na peça interna, (c) flexão do pino na peça interna e (d) flexão do pino nas peças internas e externas .....	42
Figura 2.10: Modos de ruptura: dúctil (a), frágil (b-e). Diagrama Força vs Deslocamento: (f) ruptura dúctil e (g) ruptura frágil .....	46
Figura 2.11: (a) Critério de Falha adotados nas pesquisas que utilizaram simulação computacional. (b) Softwares de simulação computacional utilizado .....	49
Figura 3.1: Espaçamento mínimo para as ligações confeccionadas com pinos metálicos, do acordo com a NBR 7190:2022 .....	52
Figura 3.2: Modelos das ligações ensaiadas. Modelo A com 6 conectores, Modelo B com 8 conectores. Medidas em milímetros .....	53
Figura 3.3: (a) Esquema do equipamento no qual serão ensaiados os protótipos das ligações. (b) Foto do equipamento no laboratório de estruturas da UEL .....	54
Figura 3.4: Elementos modelados no Abaqus como software deformados: (a) pino de GFRP, (b) Parte externa da ligação e (c) Parte interna da Ligação.....	56

Figura 3.5: Montagem da ligação no software Abaqus: (a) seleção das peças e (b) peças inseridas da interface de montagem .....	59
Figura 3.6: (a) Todas as peças inseridas na área de montagem; (b) As peças montadas conforme modelo utilizado na etapa experimental .....	60
Figura 3.7: (a) Inserção do ponto de aplicação da força e (b) distribuição da força sobre a área de aplicação no protótipo da ligação .....	61
Figura 3.8: (a) Interação das barras de GFRP com a estrutura da ligação. (b) inserção do tipo de contato nas barras de GFRP .....	62
Figura 3.9: (a) Interação aplicada na ligação. (b) Interação aplicadas nas barras de GFRP. (c) Critérios informados ao Abaqus sobre as características de contato .....	63
Figura 3.10: (a) Condições de contorno aplicadas às peças externas do protótipo da ligação (b) Condição de contorno aplicadas apenas às peças externas da ligação ....	64
Figura 3.11: (a) Ligação montada antes do início da aplicação da malha, coloração amarela necessita de segmentação. (b) Aplicação dos <i>Datum</i> para servir de guia para a segmentação .....	65
Figura 3.12: (a) Início da segmentação. (b) Peça em condição de obter a malha .....	65
Figura 3.13: Malha Hexaédrica de 10 mm (a) e 1mm (b), e Malha Tetraédrica de 10 mm (c) e 1 mm (d) para o teste de malha .....	66
Figura 3.14: (a) Malhas aplicadas nas regiões de interesse. (b) Malhas aplicadas nos pinos de GFRP. ....	67
Figura 3.15: Ligação com a malha pré-definida .....	67
Figura 4.1: (a) Deslocamento máximo e tempo de processamento obtido nas simulações. (b) Tensão de tração máxima obtida em cada simulação.....	73
Figura 4.2: Gráfico da curva Força <i>versus</i> Deslocamento obtida nos resultados experimentais de Barcarolo (2019) e o Gráfico da curva Força <i>versus</i> Deslocamento do modelo numérico elaborado.....	75
Figura 4.3: Simulação das diferentes configurações de Modelos de Ligações: (a) modelo A, com diâmetro de 10 mm, com modo de falha embutimento do conector na madeira da ligação sendo (a) espécies <i>Pinus Elliottii</i> e (b) <i>Eucalipto Citriodora</i> .....	76
Figura 4.4: Histogramas da distribuição dos valores da Força de Ruptura ( $F_{rup}$ ) obtidos: (a) nas simulações numéricas e (b) utilizando-se a formulação de Johansen .....	78
Figura 4.5: Gráficos de correlação ( $r$ ) entre os valores das forças de ruptura obtidos das simulações e as demais variáveis independentes consideradas .....	79
Figura 4.6: (a) Gráfico de Pareto do modelo de regressão e (b) Gráfico de probabilidade normal dos resíduos da ANOVA .....	82
Figura 4.7: (a) Histogramas da distribuição dos erros gerados pelo uso do modelo de regressão múltipla e (b) pela formulação de Johansen na estimativa da força de ruptura ( $F_{rup}$ ).....	84

Figura 4.8: (a) Razão entre os valores da força de ruptura obtidos pela simulação numérica [ $F_{rup}(FEM)$ ] e pelo modelo de regressão [ $F_{rup}(FEM)/ F_{rup}(reg.)$ ] e (b) Razão entre a simulação numérica e o modelo de Johansen [ $F_{rup}(FEM)/ F_{rup}(Joh.)$ ] 85

Figura 4.9: (a) Histograma do erro e razão entre os valores da força de ruptura obtidos pela simulação numérica [ $F_{rup}^{(FEM)}$ ] e (b) Razão entre a simulação numérica e o modelo de Johansen ajustado pelo coeficiente  $\alpha = 1,56$  [ $F_{rup}^{(FEM)} / \alpha \cdot F_{rup}^{(Joh.)}$ ]..... 87

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1: Valores dos polímeros reforçados com fibras e do aço, em território nacional .....	22
Tabela 2.1: Abordagens Relacionadas à Pesquisa .....	28
Tabela 2.2: <i>Strings</i> utilizadas nas buscas por documentos nas bases de dados .....	28
Tabela 2.3: Pesquisas realizadas sobre o tema Ligações em Estrutura de Madeira e Compósitos.....	35
Tabela 3.1: Valores utilizados para as propriedades elásticas da madeira <i>Pinus Elliottii</i> na simulação não-linear .....	57
Tabela 3.2: Valores utilizados para as propriedades plásticas da madeira <i>Pinus Elliottii</i> na simulação não-linear .....	57
Tabela 3.3: Valores adotados para o Critério de Hill .....	58
Tabela 3.4: Valores utilizados nas propriedades elásticas da conector de GFRP moldado <i>in loco</i> na simulação não-linear .....	58
Tabela 3.5: Valores das propriedades plásticas da do conector de GFRP moldado <i>in loco</i> utilizadas na simulação não-linear.....	58
Tabela 4.1: Comparação entre os valores experimentais e numéricos para força última .....	75
Tabela 4.2: Valores máximos e mínimos utilizados para o desenvolvimento do modelo numérico proposto .....	77
Tabela 4.3: Valores do domínio do modelo de regressão proposto.....	82
Tabela A1.1: Protocolo criado no StArt para a RSL com o tema Pesquisas em Ligações em Estruturas de Madeira e Material Compósito .....	109
Tabela A1.2: Protocolo criado no StArt para a RSL com o tema Pesquisas sobre Modelos de Estimativa de Força Última e Fratura em Ligações de Estruturas de Madeira.....	110
Tabela A1.3: Protocolo criado no StArt para a RSL com o tema Pesquisas com Simulação Numérica em Estruturas de Madeira .....	111
Tabela A2.1: Valores utilizados para as propriedades elásticas da madeira <i>Pinus (Pinus elliotii var. elliotii)</i> na simulação não-linear .....	113
Tabela A2.2: Valores utilizados para as propriedades plásticas da madeira <i>Pinus (Pinus elliotii var. elliotii)</i> utilizadas na simulação não-linear.....	113
Tabela A2.3: Valores utilizados para as propriedades elásticas da madeira Capiúba ( <i>Goupia glabra Aublet</i> ) na simulação não-linear .....	114
Tabela A2.4: Valores utilizados para as propriedades plásticas da madeira linear Capiúba ( <i>Goupia glabra Aublet</i> ) utilizadas na simulação não-linear.....	114
Tabela A2.5: Valores utilizados para as propriedades elásticas da madeira Garapa ( <i>Apuleia leiocarpa</i> ) na simulação não-linear.....	115

Tabela A2.6: Valores utilizados para as propriedades plásticas da madeira linear Garapa ( <i>Apuleia leiocarpa</i> ) utilizadas na simulação não-linear .....	115
Tabela A2.7: Valores utilizados para as propriedades elásticas da madeira Eucalipto Citriodora ( <i>Eucalyptus citriodora</i> ) na simulação não-linear.....	116
Tabela A2.8: Valores utilizados para as propriedades plásticas da madeira linear Eucalipto Citriodora ( <i>Eucalyptus citriodora</i> ) utilizadas na simulação não-linear .....	116
Tabela A2.9: Valores utilizados para as propriedades elásticas da madeira Jatobá ( <i>Hymenaea spp</i> ) na simulação não-linear .....	117
Tabela A2.10: Valores utilizados para as propriedades plásticas da madeira linear Jatobá ( <i>Hymenaea spp</i> ) utilizadas na simulação não-linear.....	117
Tabela A3.1: Valores utilizados para as propriedades elásticas da conector de GFRP da empresa STRATUS na simulação não-linear .....	118
Tabela A3.2: Valores utilizados para as propriedades plásticas da do conector de GFRP da empresa STRATUS utilizadas na simulação não-linear .....	118

# SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	OBJETIVOS.....	23
1.2	JUSTIFICATIVA.....	24
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	25
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	27
2.1	PROCESSO DE REVISÃO SISTEMÁTICA.....	27
2.1.1	PESQUISAS EM LIGAÇÕES EM ESTRUTURAS DE MADEIRA E COMPÓSITOS.....	33
2.1.1.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE AS PESQUISAS EM LIGAÇÕES EM ESTRUTURAS DE MADEIRA E COMPÓSITOS.....	40
2.1.2	PESQUISAS SOBRE MODELOS PARA ESTIMATIVA DE FORÇA ÚLTIMA E FRATURA EM LIGAÇÕES DE ESTRUTURAS DE MADEIRA.....	41
2.1.2.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE PESQUISAS EM MODELOS PARA ESTIMATIVA DE FORÇA ÚLTIMA E FRATURA EM LIGAÇÕES DE ESTRUTURAS DE MADEIRA.....	47
2.1.3	PESQUISAS COM SIMULAÇÃO NUMÉRICA EM ESTRUTURAS DE MADEIRA.....	47
2.1.3.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE PESQUISAS COM SIMULAÇÃO NUMÉRICA EM ESTRUTURAS DE MADEIRA.....	50
3	MÉTODO.....	51
3.1	MODELO DAS LIGAÇÕES.....	52
3.1.1	ELABORAÇÃO MODELO DA LIGAÇÃO.....	52
3.1.2	VALIDAÇÃO DO ENSAIO EXPERIMENTAL.....	54
3.2	ETAPA NUMÉRICA.....	55
3.2.1	MODELAGEM DOS ELEMENTOS.....	55
3.2.2	PROPRIEDADES DOS MATERIAIS.....	56
3.2.3	MONTAGEM DA LIGAÇÃO.....	59
3.2.4	CONFIGURAÇÃO DA SIMULAÇÃO E INCREMENTOS.....	60
3.2.5	CONTATO ENTRE OS ELEMENTOS.....	61
3.2.6	CARREGAMENTO E CONDIÇÕES DE CONTORNO.....	63
3.2.7	ELABORAÇÃO DAS MALHAS E TESTE DE MALHA.....	64
3.3	ETAPA DO ESTUDO PARAMÉTRICO.....	68
3.4	MODELO DE REGRESSÃO PARA ESTIMATIVA DE FORÇA ÚLTIMA.....	69
3.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS A RESPEITO DA METODOLOGIA.....	70
4	RESULTADOS.....	72
4.1	TESTE DE MALHA.....	72
4.2	MODELO NUMÉRICO.....	74

4.3	ESTUDO PARAMÉTRICO COM MODELO NUMÉRICO.....	77
3.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS A RESPEITO DOS RESULTADOS .....	88
5	CONCLUSÕES.....	90
	REFERÊNCIAS .....	92
	ANEXO 1 .....	109
	ANEXO 2.....	113
	ANEXO 3.....	118

# 1 INTRODUÇÃO

Os produtos feitos com madeira serrada e seus derivados são usados mundialmente há milhares de anos. De acordo com Yurrita e Cabrero (2020a) a consciência ambiental, aliada a políticas que incentivam o uso de materiais sustentáveis e renováveis, influencia claramente o setor da construção na utilização desse material. Espera-se, portanto, que o aumento do uso de estruturas de madeira, verificado durante os últimos anos, continue no futuro.

O uso de estruturas de madeira é amplamente difundido em países localizados na América do Norte, Europa e Ásia. A grande utilização da madeira nessas regiões é justificada por apresentar características interessantes, como: alta relação resistência e peso, baixo consumo de energia e confiabilidade em aplicações estruturais (KREMER e SYMMONS, 2015; RAMAGE *et al.*, 2017; SMITH *et al.*, 2018).

O desenvolvimento de estratégias de utilização de madeira em edificações pode ser observado desde os primórdios da civilização. Também, nas últimas décadas é crescente a utilização de madeira engenheirada destinada à construção de edificações. Entende-se por madeira engenheirada a madeira como matéria prima processada industrialmente com o objetivo de melhorar seu desempenho para ser utilizado na construção civil (SILVA *et al.*, 2015; HARTE, 2017). Exemplos de técnicas de madeira engenheirada são: Madeira Laminada Cruzada (CLT), Madeira Laminada Colada (GLULAM), Madeira Folheada Laminada (LVL) e Painel de Fibras de Média Densidade (MDF) (SHIRMOHAMMADI *et al.*, 2021), entre outros.

Com o avanço da tecnologia associada a estruturas de madeira é cada vez mais comum, o uso desse material em edificações de grandes e pequenas proporções em diversas regiões do mundo, como: o prédio de 18 andares na Universidade de Columbia no Canadá e um edifício de mais de 85 metros de altura na Noruega (AYANLEYE *et al.*, 2022).

No Brasil, o uso de estruturas de madeira não é usual. Porém, desde 2012, o sistema construtivo Light Wood Frame (LWF) pode ser utilizado em

construções de edificações de interesse social com financiamento pela Caixa Econômica Federal (ESPINDOLA, 2017; SOTSEK e SANTOS, 2018). Desde então, várias empresas no país começaram a desenvolver tecnologia para poder atender à crescente demanda por sistemas construtivos que utilizem madeira como principal material.

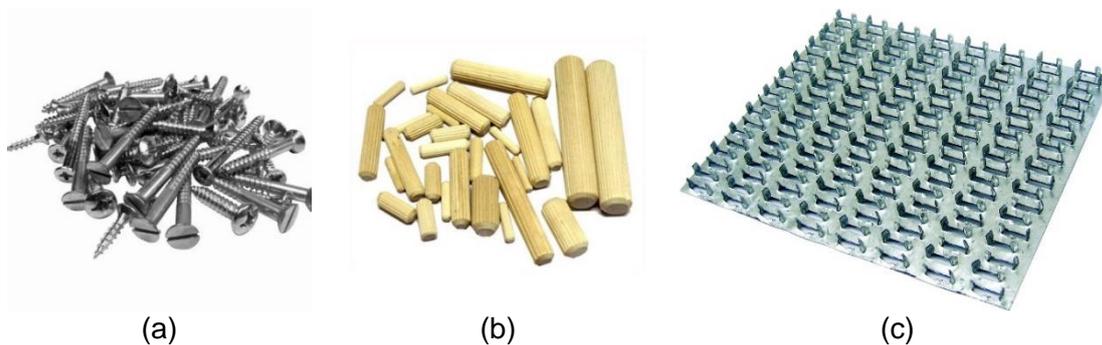
O uso do sistema LWF é crescente, o sistema é normatizado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) desde 07 de Julho de 2023 com a NBR 16936:2023.

Em território nacional o documento normativo que apresentava as premissas de projeto e dimensionamento para as estruturas de madeira era a NBR 7190:1997 (ABNT, 1997) e tratava apenas de elementos de madeira serrada com critérios de dimensionamento, classificação e caracterização. No entanto, em 29 de junho de 2022 a nova norma brasileira de madeira foi publicada. A NBR 7190:2022 apresenta sete partes e aborda considerações sobre: (a) Critérios de Dimensionamento (ABNT, 2022a), (b) Métodos de ensaio para classificação visual e mecânica de peças estruturais de madeira (ABNT, 2022b), (c) Métodos de ensaios para corpos de prova isentos de defeitos para madeiras de florestas nativas (ABNT, 2022c), (d) Métodos de ensaios para caracterização de peças estruturais (ABNT, 2022d), (e) Métodos de ensaios para a determinação de resistência e da rigidez de ligações com conectores mecânicos (ABNT, 2022e), (f) Métodos de ensaio para caracterização de madeira laminada colada estrutura (ABNT, 2022f) e (g) Métodos de ensaio para caracterização de madeira laminada colada cruzada estrutural (ABNT, 2022g).

Yurrita, Cabrero e Quenneville (2019) afirmam que a combinação da madeira com as tecnologias atuais permite a utilização de estruturas de grandes dimensões, tanto na idealização do projeto arquitetônico como no desenvolvimento do projeto estrutural. Estruturas com maiores dimensões em altura ou em vão requerem elementos estruturais com seções transversais compatíveis, portanto, as conexões se tornaram um importante e usual elemento.

A antiga norma de madeira (ABNT, 1997) previa apenas três tipos de conexão: (a) pinos metálicos, (b) cavilhas e (c) conectores. Pinos metálicos são os pregos e parafusos, cavilhas são elementos torneados de madeira e conectores são elementos metálicos que apresentam dentes estampados. Na Figura 1.1 são ilustrados os elementos utilizados em conexões previstos na antiga norma.

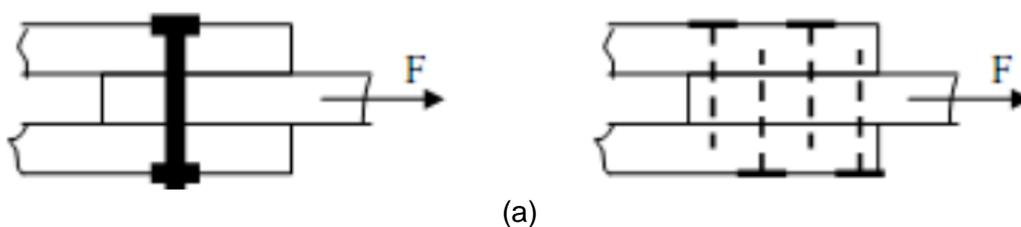
**Figura 1.1: (a) Pinos metálicos, (b) Cavilhas e (c) Chapas dentadas**

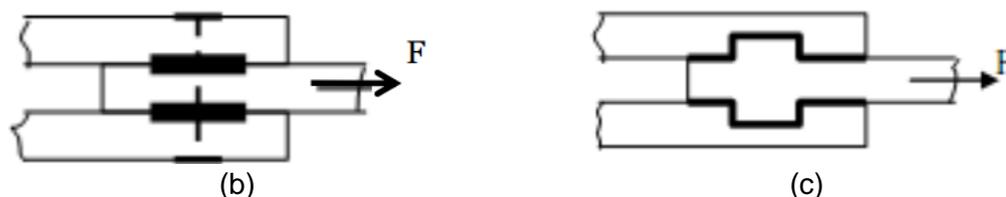


Fonte: (a) Site 1 (b) Site 2 (c) Site 3

A norma atualizada (ABNT, 2022c) eliminou o uso de cavilhas como elementos de conexão em estruturas de madeira, considerando os seguintes tipos de ligações: (a) ligações por pinos metálicos, (b) ligações por anéis e chapas metálicas (arruelas), (c) ligações por sambladuras ou entalhes e (d) ligações coladas. Esquemas desses tipos de ligações são apresentadas na Figura 1.2.

**Figura 1.2: (a) Elementos de Pinos Metálicos e Pregos e (b) Arruelas Metálicas e (c) Entalhes**

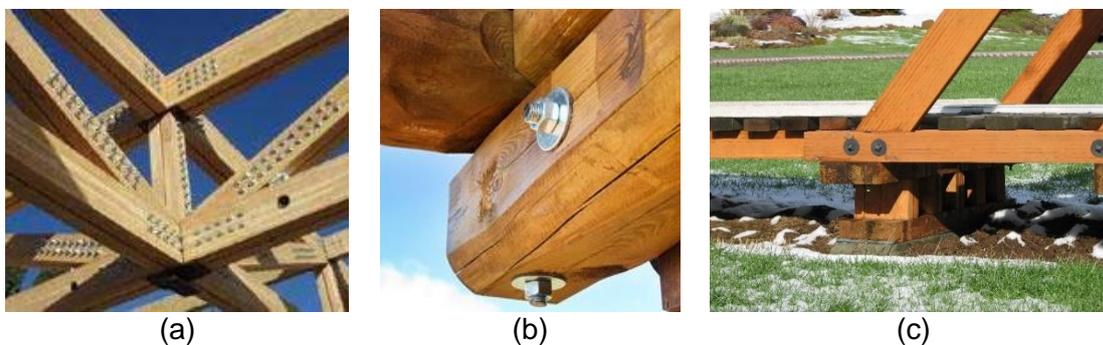




Fonte: Pfeil e Pfeil (2003).

A classe de conexão de pinos metálicos engloba pregos e parafusos. Pregos são peças metálicas cravadas na madeira por impacto. Os parafusos podem ser cilíndricos com ranhuras ou lisos, apresentando em uma das extremidades uma cabeça e, na outra, uma rosca ou porca com apoios de arruelas, como ilustrado na Figura 1.3. Essa classe de conexão é a mais utilizada atualmente. A sua popularização se justifica pelo fato de apresentar facilidade e simplicidade de manuseio dos conectores e grande quantidade de fornecedores desses elementos com custo mais competitivo e facilidade de mão de obra no mercado.

**Figura 1.3: Conexões com pinos metálicos**



Fonte: (a) Site 4. (b) Site 5. (c) Site 6.

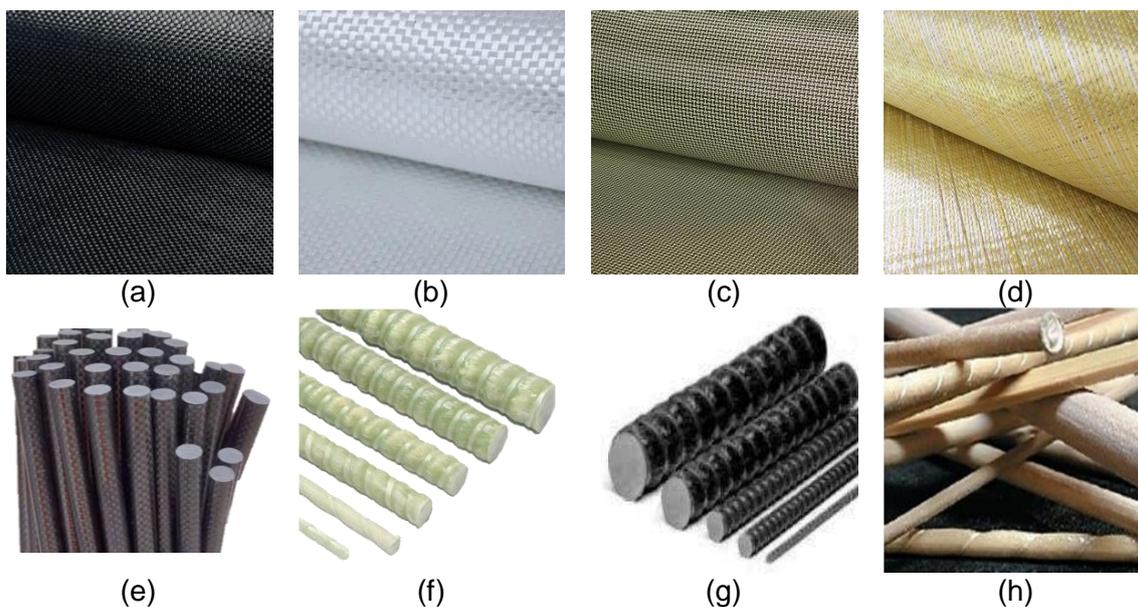
Pavković *et al.* (2020) afirmam que as conexões em estruturas de madeira são componentes que tem um efeito considerável nos custos, devem possuir ductibilidade, ser confiável e terem capacidade de suportar carga de uma estrutura. Sendo assim, a capacidade de carga das estruturas de madeira depende em grande parte do projeto e construção adequados das próprias ligações.

Hansson (2011) realizou um extensivo trabalho associando as conexões e colapsos estruturais em estrutura de madeira e concluiu que as conexões são as partes críticas da estrutura e que a degradação das conexões influencia na capacidade de carga e estabilidade da estrutura. Esses problemas estão relacionados a um projeto ineficiente ou mal elaborado da conexão, associado à falta de manutenção. O autor verificou ainda que os elementos de conexões em estruturas de madeira foram responsáveis por quase 25% dos colapsos recentes nessas estruturas, sendo metade dos casos as conexões compostas dos pinos metálicos. Sendo assim, destaca-se a necessidade de realização de manutenção em estrutura e conexões de madeira de forma rotineira.

Com o objetivo de melhorar o comportamento estrutural das peças de madeira, diversas pesquisas utilizam materiais compósitos reforçados com fibras para a realização de aumento de resistência dos componentes estruturais (LATHUILLIÈRE *et al.*, 2015; VODIANNIKOV e KASHEVAROVA, 2019; KHALID *et al.*, 2021; BAZLI *et al.*, 2022; TOUMPANAKI e RAMAGE, 2022).

Os materiais poliméricos reforçados com fibra (em inglês, *Fiber Reinforced Polymer* - FRP) são compósitos sintéticos fabricados a partir de fibras de alta resistência por síntese química. Os mais populares e utilizados são: (a) Fibra de Vidro (em inglês, *Glass Fiber Reinforced Polymer* – GFRP), (b) Fibra de Carbono (em inglês, *Carbon Fiber Reinforced Polymer* - CFRP) (c) Fibra de Aramida (em inglês, *Aramid Fiber Reinforced Polymer* - AFRP) e (d) Fibra de Basalto (em inglês, *Basalt Fiber Reinforced Polymer* – BFRP). Esses materiais utilizados para reforços são disponibilizados em formatos e tamanhos diversos, como: lâminas, tecidos, chapas e barras. Na Figura 1.4 são apresentados os materiais comercializados em formato de lâminas e barras.

**Figura 1.4: Reforços em formato de lâminas (a) CFRP, (b) GFRP (c) BFRP e (d) AFRP. Em formato de barras (e) CFRP, (f) GFRP (g) BFRP e (h) AFRP**



Fonte: (a-d) Site 7. (e) Site 8. (f) Site 9. (g) Site 10. (h) Site 11.

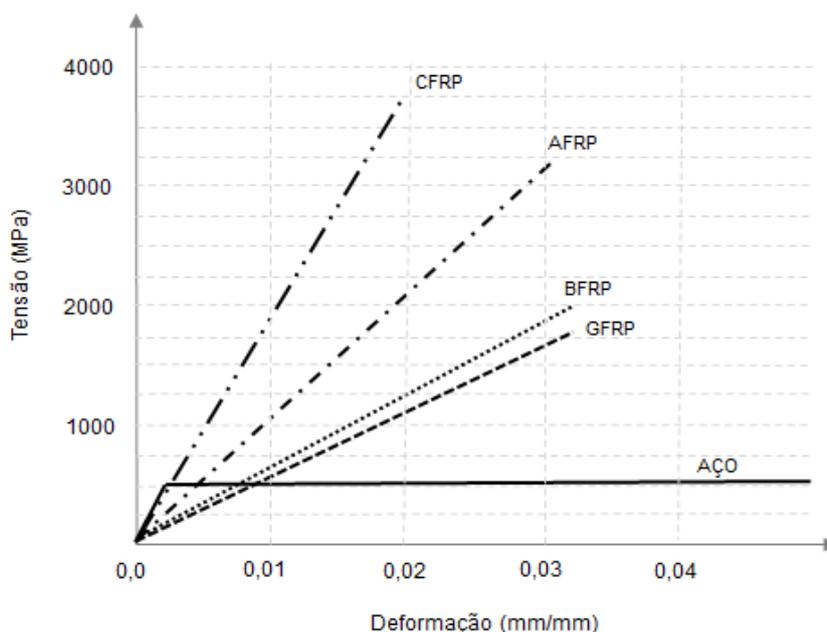
Resistência mecânica e rigidez muito altas são as vantagens mais importantes e comuns dos materiais compósitos reforçados com fibras sintéticas. Normalmente, essas propriedades mecânicas são expressas em termos relativos, dividindo-as pela densidade.

De acordo com Saad e Lengyel (2022) é mais econômico e menos demorado reparar ou reforçar peças de madeira danificadas em vez de substituí-las completamente. Os materiais compósitos FRP oferecem vários benefícios, incluindo alto módulo de elasticidade, resistência mecânica e resistência à corrosão. Os tipos de reforço de fibra mais utilizados em estruturas de madeira são: CFRP e GFRP.

As principais técnicas de aplicação do CFRP e GFRP em estruturas de madeira são: (a) Material inserido no interior da estrutura de madeira (KHELIFA e CELZARD, 2014), (b) Reforço em forma de laminado (ALHAYEK e SVECOVA, 2012; KLIGER *et al.*, 2016; NADIR *et al.*, 2016; MIAO *et al.*, 2022) e (c) Reforço em formato de barras (YANG *et al.*, 2016; RATSCH *et al.*, 2019). Nesses estudos são evidenciados a maior utilização das fibras em formato de lâmina e chapas.

A utilização de barras GFRP iniciou-se em recuperação de estruturas de concreto na década de 1940. As armaduras tradicionais fabricadas em aço, em ambientes agressivos, se deterioravam com o passar dos anos. Como solução para evitar a deterioração desses elementos nas estruturas de concreto armado, iniciou-se a substituição das barras de aço convencionais por barras de GFRP. Ao analisar o comportamento mecânico dos materiais reforçados com fibras (FRP) e aço, é verificado que as barras fabricadas com FRP atingem a resistência última sem apresentar patamar de escoamento, no entanto resistem a tensões superiores à do aço, como mostrado no gráfico da Figura 1.5.

**Figura 1.5: Comportamento mecânico dos polímeros reforçados com fibras e do aço**



Fonte: Adaptado de Mazzú (2020).

Com a popularização do uso de fibra de vidro em estruturas de concreto armado e em recuperação de estruturas, as barras de GFRP se consolidaram e se tornaram mais competitivas frente ao valor cobrado pelas barras de aço e ao CFRP, como apresentado na Tabela 1.1.

**Tabela 1.1: Valores dos polímeros reforçados com fibras e do aço, em território nacional**

<b>Material</b>	<b>Valor (R\$/m)</b>	<b>Empresa</b>
Aço CA-50	15,25	Acelor-Mital
GFRP	18,04	Stratus
BFRP	Não Disponível	Não Disponível
AFRP	223,12	Redelease
CFRP	235,44	Maxx Products

\*Valores obtidos em Junho/2024.

Fonte: Do Autor.

Algumas pesquisas apresentam o uso de FRP associados a ligações de estruturas de madeira (SANTOS *et al.*, 2013). No entanto, é mais comum encontrar pesquisas em que o uso de FRP é utilizado em elementos de estruturas de madeira danificados, como pilares e vigas. Outras pesquisas analisam o comportamento das conexões que usaram tecidos aplicados em cavilhas de madeira utilizadas em estruturas de madeira. Ou ainda, o uso de cavilhas de fibra de vidro fabricadas *in-loco* como fizeram De Almeida e De Melo Moura (2022) e Camargo *et al.* (2023).

O uso de pinos metálicos no dimensionamento de conexões está previsto em regimentos normativos, como: Eurocode-5, NBR 7190, Norma Canadense e Norma Neozelandesa. O embasamento teórico desses documentos foi estudado por Johansen (1949) para ligações com cisalhamento duplo e, posteriormente, Möller (1951 *apud* Meyer, 1957) ampliou o entendimento para ligações de madeira feitas com diferentes densidades.

As equações matemáticas utilizadas nos documentos normativos apresentam grande quantidade de simplificações (DORN *et al.*, 2013). Wilkinson e Augarde (2022) afirmam que mesmo para as ligações com pinos metálicos que são comuns em estruturas de madeira, os códigos normativos atuais utilizados no seu dimensionamento são amplamente baseados no empirismo e são simplificados, inibindo o uso otimizado de conexões.

Estudos experimentais de conexões permitem verificar as diferenças nos resultados encontrados devido a essas simplificações, como consta nas

pesquisas (LATHUILLIÈRE *et al.*, 2015; MILCH *et al.*, 2017; YURRITA; CABRERO; QUENNEVILLE, 2019). Os modelos analíticos propostos em documentos normativos foram simplificados, pois a madeira além de ser um material ortotrópico, e apresenta propriedades mecânicas diferentes entre as espécies.

Com o avanço da tecnologia, softwares de elementos finitos, como, Abaqus ( BRAUN *et al.*, 2022) e Ansys (VODIANNIKOV *et al.*, 2020; SZÁSZ *et al.*, 2021) permitem analisar o comportamento de elementos de estruturas de madeira de forma mais rápida e dinâmica, requerendo apenas um ensaio experimental da estrutura para validar o modelo numérico (TRAN *et al.*, 2015; KHELIFA *et al.*, 2016; BRAUN *et al.*, 2022). A associação de uso de simulação computacional e experimento permite a criação de modelos matemáticos mais precisos do que os existentes em normas atuais, para o dimensionamento de ligações considerando diferentes tipos de falha (YURRITA; CABRERO; QUENNEVILLE, 2019; YURRITA; CABRERO, 2020a; EL HOUJEYRI *et al.*, 2021).

Atualmente, há carência de estudos sobre o comportamento mecânico de ligações de estruturas de madeira que utilizem materiais compósitos em sua composição. Desta forma, se faz necessário pesquisas que analisem o comportamento dessas novas ligações utilizando um material até então destinado para recuperação estrutural de vigas e pilares das estruturas de madeira. Esta pesquisa tem o intuito de apresentar um modelo numérico que no futuro possa auxiliar no dimensionamento e no detalhamento de ligações que utilizem barras de GFRP como componentes de ligações de estrutura de madeira.

## 1.1 OBJETIVOS

Os objetivos desta pesquisa de doutorado são:

(a) Realizar um estudo de simulação numérica utilizando um software de Método de Elementos Finitos, MEF, (em inglês, *Finite Element Method* – FEM),

para calibrar um modelo numérico com base nas informações obtidas em ensaios experimentais realizados por Barcarolo (2019);

(b) Realizar teste de malha com o objetivo de verificar a influência do tamanho e tipo de malha nos resultados apresentados, além de verificar a melhor malha a ser adotada nas simulações numéricas realizadas para esta pesquisa.

(c) Realizar um estudo paramétrico de simulação numérica para várias composições de ligações, permitindo, assim, elaborar um modelo matemático a ser utilizado para dimensionamento de ligações em estruturas de madeira com pinos fabricados a partir de barras de fibra de vidro;

(d) Realizar a comparação do modelo obtido por meio do estudo paramétrico com os modelos existentes na literatura que estimam a força de ruptura para situações de cisalhamento duplo em ligações de madeira que apresentam as mesmas densidades.

## **1.2 JUSTIFICATIVA**

Pinos metálicos são mais utilizados como conectores nas ligações das estruturas de madeira. Essa ampla utilização está associada à facilidade de obtenção e ao baixo custo de produção desses pinos (pregos e parafusos). No entanto, esses conectores ficam expostos a intempéries climáticas e ambientes agressivos, e, com o passar do tempo, ocorre a corrosão do elemento comprometendo o comportamento mecânico da ligação e em casos mais extremos podendo levar até ao colapso estrutural.

Na área de estrutura de madeira o uso de materiais compósitos se desenvolveu com o objetivo de analisar o ganho de resistência das peças de madeira quando associado aos materiais compósitos como: fibras de vidro (GFRP) e fibras de carbono (CFRP). Muitos desses materiais são utilizados em recuperação da estrutura degradada.

Como as falhas estruturais, em estruturas de madeira, estão posicionadas nas ligações, inúmeros trabalhos estudam, de modo experimental e numérico, o comportamento das mesmas, para desenvolver modelos de ligações mais resistentes com o uso de novos materiais e o uso de reforços com materiais compósitos. Desta forma, esta pesquisa se propõe a analisar o comportamento das ligações quando são substituídos os pinos metálicos por pinos obtidos a partir de barras fabricadas com GFRP, usualmente utilizados em estruturas de concreto.

A substituição de um material metálico pode ser um método promissor, quando tem as seguintes características: não é sujeito a corrosão, apresenta baixo peso específico e desempenho mecânico próximo ao aço.

Deste modo, esta pesquisa propõe utilizar resultados do método experimental desenvolvido por Barcarolo (2019) com a finalidade de desenvolver um modelo numérico elaborado a partir de resultados experimentais, para posterior utilização do método de simulação numérica pelo MEF permitindo a realização de um estudo paramétrico. O método numérico permite extrapolar os resultados obtidos experimentalmente proporcionando agilidade na realização de um estudo paramétrico. Os resultados obtidos podem trazer subsídios para o desenvolvimento de um modelo matemático para a estimativa da força última para ligações em estruturas de madeira, utilizando-se barras de GFRP como substitutos de pregos e parafusos.

### **1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO**

A apresentação desta tese além do presente capítulo, que contextualiza o tema e apresenta os objetivos e as justificativas, encontra-se disposta em quatro Capítulos, além das Referências Bibliográficas e Anexos.

No Capítulo 2 é apresentado o referencial teórico, obtido por meio de uma Revisão Sistemática de Literatura (RSL), com foco nos trabalhos com as temáticas: (a) Pesquisas em Ligações em Estruturas de Madeira e Material Compósito, (b) Pesquisas sobre Modelos para Estimativa de Força Última e

Fratura em Ligações de Estruturas de Madeira e (c) Pesquisas com Simulação Numérica em Estruturas de Madeira.

No Capítulo 3 é descrita a metodologia utilizada na pesquisa com a apresentação da verificação da correlação entre os resultados experimentais obtidos por Barcarolo (2019) e o modelo numérico desenvolvido com o uso de um software de simulação computacional pelo FEM, os modelos de ligação utilizados no estudo paramétrico, as informações referentes ao processo de simulação numérica para o estudo paramétrico, e validação estatística do modelo gerado.

No Capítulo 4 são apresentados e discutidos, de maneira detalhada, os resultados encontrados na pesquisa. No Capítulo 5 são elencadas as considerações finais com sugestões de novas pesquisas. Posteriormente, são apresentadas as Referências Bibliográficas seguida dos Anexos.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste Capítulo estão contidos os temas relacionados e relevantes a esta tese de doutorado. Na Seção 2.1 é apresentado o processo de revisão sistemática utilizado neste trabalho. Nas Seções de 2.1.1 a 2.1.3 são apresentados os trabalhos com as temáticas: 2.1.1 Pesquisas em Ligações em Estruturas de Madeira e Material Compósito, 2.1.2 Pesquisas sobre Modelos para Estimativa de Força Última e Fratura em Ligações de Estruturas de Madeira e 2.1.3 Pesquisas com Simulação Numérica em Estruturas de Madeira. Ao fim de cada temática de pesquisa analisada são apresentadas as Considerações Finais.

### 2.1 PROCESSO DE REVISÃO SISTEMÁTICA

A revisão de literatura foi realizada com o objetivo de verificar os trabalhos com a temática referente a: estruturas de madeira, materiais compósitos, modelos para estimativa de força última em estruturas de madeira e simulação numérica em estruturas de madeira.

Inicialmente foram combinadas as palavras chaves no escopo da pesquisa com a finalidade de verificar a existência de artigos publicados na mesma temática. Foram realizadas buscas nas bases de dados: (a) *Scopus*, (b) *Engineering Village* e (c) *Springer*, com o objetivo de analisar a quantidade de documentos, e posteriormente a quantidade de artigos publicados em periódicos em língua inglesa.

A Revisão Sistemática de Literatura (RSL) foi realizada para obter a quantidade de artigos disponibilizados no período de 2011 a maio de 2024, contemplando sete temas exibidos na Tabela 2.1, cujos os assuntos se correlacionam com os interesses desta pesquisa.

**Tabela 2.1: Abordagens Relacionadas à Pesquisa**

<b>Tema</b>	<b>Assuntos</b>
Tema 1	Estruturas, conexões e polímeros reforçados com fibras
Tema 2	Estruturas de madeira, conexões e polímeros reforçados com fibras
Tema 3	Estruturas de madeira e conexões utilizando-se polímeros reforçados com fibras de carbono
Tema 4	Estruturas de madeira e conexões utilizando-se polímeros reforçados com fibras de vidro
Tema 5	Estruturas de madeira e conexões e estimativa de força última
Tema 6	Estruturas de madeira e conexões e modelos matemáticos para estimativa de força última
Tema 7	Estruturas de madeira, conexões e método de elementos finitos

Fonte: Do Autor.

Na Tabela 2.2 são apresentadas as *Strings* de busca utilizadas nas pesquisas nas bases de dados para cada eixo temático da pesquisa de RSL.

**Tabela 2.2: Strings utilizadas nas buscas por documentos nas bases de dados**

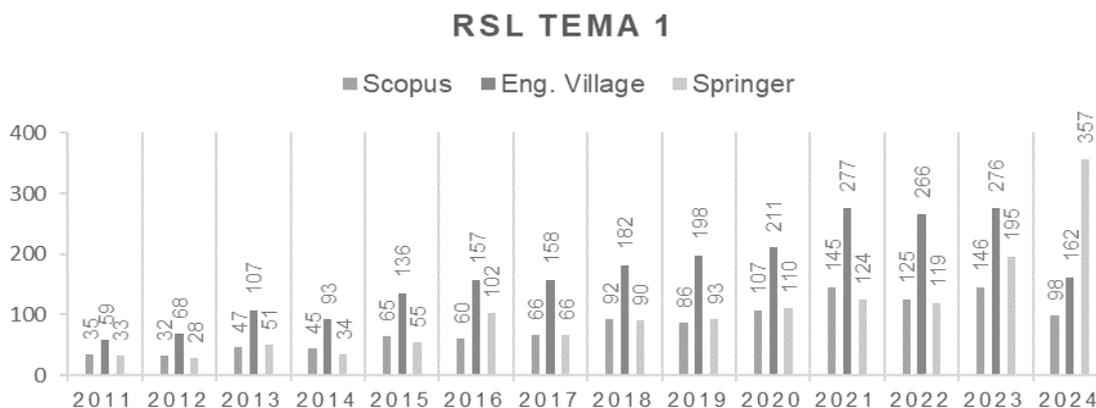
<b>RSL</b>	<b>String</b>
Tema 1	<i>((structure) AND (connection OR joint) AND (fiber AND reinforced AND polymer OR frp))</i>
Tema 2	<i>((timber structure) AND (connection OR joint) AND (fiber AND reinforced AND polymer OR frp))</i>
Tema 3	<i>((timber structure) AND (connection OR joint) AND (carbon AND reinforced AND polymer OR cfrp))</i>
Tema 4	<i>((timber structure) AND (connection OR joint) AND (glass AND fiber AND reinforced AND polymer OR gfrp))</i>
Tema 5	<i>((timber structure) AND (connection OR joint) AND (ultimate AND strength))</i>
Tema 6	<i>((timber structure) AND (connection OR joint) AND (ultimate AND strength AND model))</i>
Tema 7	<i>((timber structure) AND (connection OR joint) AND (finite AND element AND method OR fem))</i>

Fonte: Do Autor.

A quantidade de artigos para o Tema 1 da RSL, separados por ano, no período analisado, é apresentada na Figura 2.1. Os resultados obtidos nas bases de dados em número de documentos foram: 1331 (Scopus), 2759 (Eng. Village) e 3992 (Springer). Ao analisar os resultados de artigos em língua

inglesa, no período compreendido na pesquisa, foram obtidos: 1149 (Scopus), 2350 (Eng. Village) e 1457 (Springer).

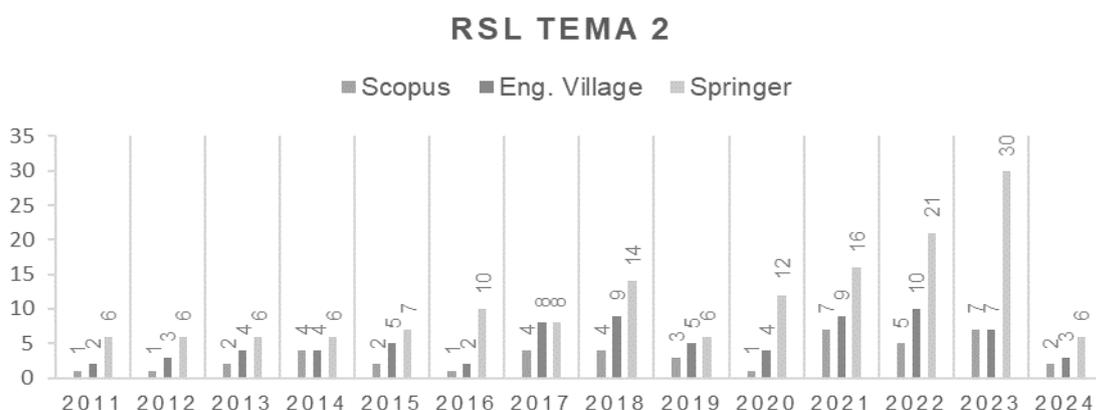
**Figura 2.1: Artigos publicados de 2011 a 2024, relacionados com o Tema 1: Estruturas, conexões e polímeros reforçados com fibras**



Fonte: Do Autor.

Os resultados obtidos nas bases de dados para o Tema 2 da RSL em número de documentos foram: 69 (Scopus), 93 (Eng. Village) e 215 (Springer). Ao analisar os resultados de artigos em língua inglesa, no período compreendido na pesquisa, foram obtidos: 44 (Scopus), 75 (Eng. Village) e 154 (Springer). A quantidade de artigos dessa temática, separados por ano, no período analisado, é apresentada na Figura 2.2.

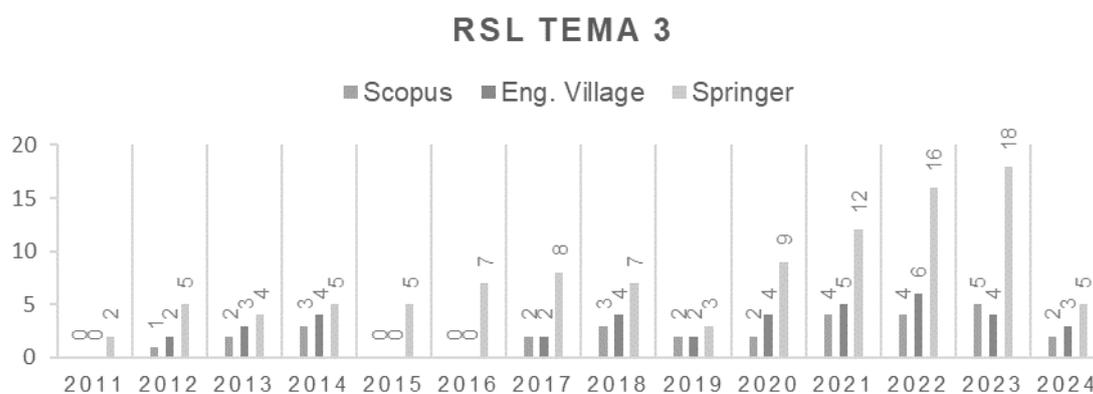
**Figura 2.2: Artigos publicados de 2011 a 2024, relacionados com o Tema 2: Estruturas de madeira, conexões e polímeros reforçados com fibras**



Fonte: Do Autor.

A quantidade de artigos para o Tema 3 da RSL, separados por ano, no período analisado, é apresentada na Figura 2.3. Os resultados obtidos nas bases de dados em número de documentos foram: 55 (Scopus), 65 (Eng. Village) e 138 (Springer). Ao analisar os resultados de artigos em língua inglesa, no período estudado foram obtidos: 30 (Scopus), 39 (Eng. Village) e 106 (Springer).

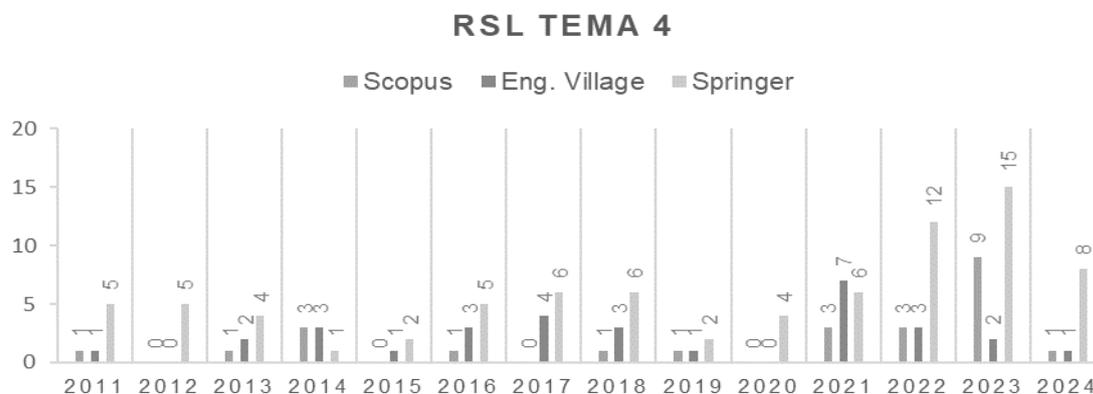
**Figura 2.3: Artigos publicados de 2011 a 2024, relacionados com o Tema 3: Estruturas de madeira e conexões utilizando-se polímeros reforçados com fibras de carbono**



Fonte: Do Autor.

Os resultados obtidos nas bases de dados para o Tema 4 da RSL em número de documentos foram: 31 (Scopus), 47 (Eng. Village) e 99 (Springer). Ao analisar os resultados de artigos em língua inglesa, no período compreendido na pesquisa, foram obtidos: 24 (Scopus), 31 (Eng. Village) e 81 (Springer). A quantidade de artigos dessa temática, separados por ano, no período analisado, é apresentada na Figura 2.4.

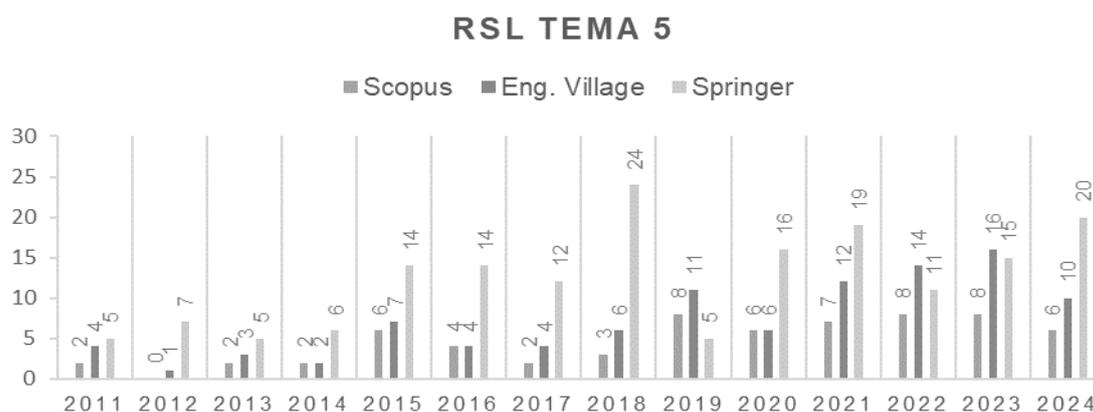
**Figura 2.4: Artigos publicados de 2011 a 2024, relacionados com o Tema 4: Estruturas de madeira e conexões utilizando-se polímeros reforçados com fibras de vidro**



Fonte: Do Autor.

A quantidade de artigos para o Tema 5 da RSL, separados por ano, no período analisado, é apresentada na Figura 2.5. Os resultados obtidos nas bases de dados para o Tema 5 da RSL em número de documentos foram: 92 (Scopus), 163 (Eng. Village) e 216 (Springer). Ao analisar os resultados de artigos em língua inglesa, no período compreendido na pesquisa, foram obtidos: 64 (Scopus), 100 (Eng. Village) e 173 (Springer).

**Figura 2.5: Artigos publicados de 2011 a 2024, relacionados com o Tema 5: Estruturas de madeira e conexões e estimativa de força última**

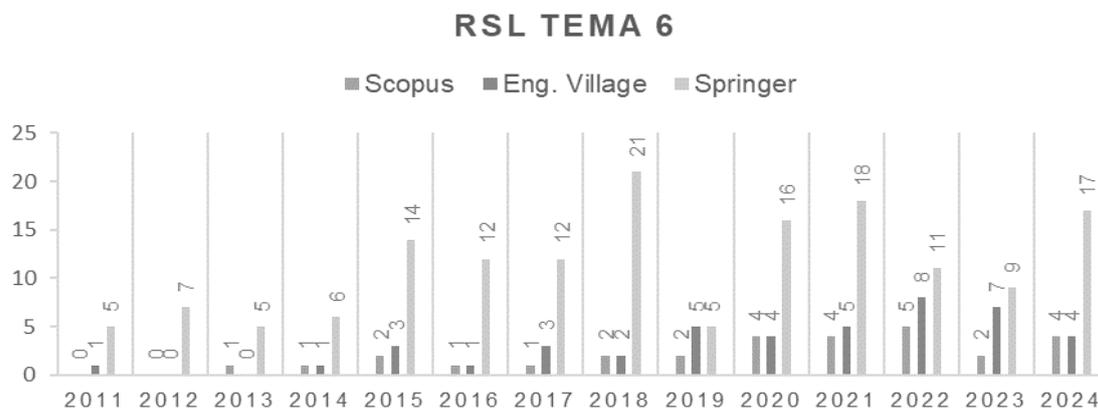


Fonte: Do Autor.

Os resultados obtidos nas bases de dados para o Tema 6 da RSL em número de documentos foram: 39 (Scopus), 60 (Eng. Village) e 187 (Springer). Ao analisar os resultados de artigos em língua inglesa, no período compreendido na pesquisa, foram obtidos: 29 (Scopus), 44 (Eng. Village) e 158

(Springer). A quantidade de artigos dessa temática, separados por ano, no período analisado, é apresentada na Figura 2.6.

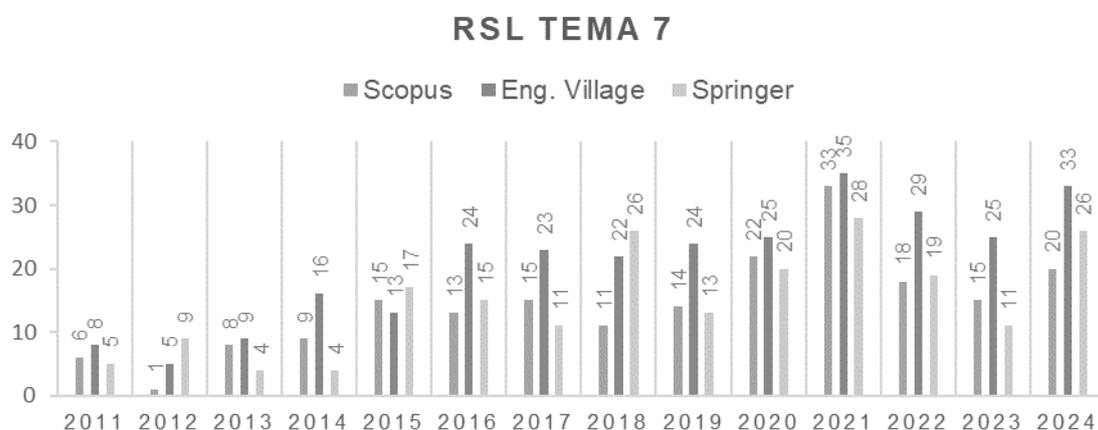
**Figura 2.6: Artigos publicados de 2011 a 2024, relacionados com o Tema 6: Estruturas de madeira e conexões e modelos matemáticos para estimativa de força última**



Fonte: Do Autor.

A quantidade de artigos para o Tema 7 da RSL, separados por ano, no período analisado, é apresentada na Figura 2.7. Os resultados obtidos nas bases de dados para o Tema 7 da RSL em número de documentos foram: 260 (Scopus), 331 (Eng. Village) e 367 (Springer). Ao analisar os resultados de artigos em língua inglesa, no período compreendido na pesquisa, foram obtidos: 200 (Scopus), 291 (Eng. Village) e 208 (Springer).

**Figura 2.7: Artigos publicados de 2011 a 2024, relacionados com o Tema 7: Estruturas de madeira, conexões e método de elementos finitos**



Fonte: Do Autor.

Para a realização da Revisão Sistemática de Literatura utilizou-se o software StArt (*State of the Art through Systematic Review*) (Fabbri *et al.*, 2016), versão 3.4 Beta. Esse software foi idealizado por pesquisadores do Laboratório de Pesquisa em Engenharia de Software, do Departamento de Computação, da Universidade Federal de São Carlos (LaPES-UFSCar), com o objetivo de dar suporte ao processo de RSL e permitir a análise dos artigos de forma mais dinâmica e padronizada.

A realização de uma RSL necessita de protocolos definidos o que permite a replicação a qualquer momento por outros pesquisadores. As etapas desta RSL foram divididas em: i) Protocolo, ii) Busca, iii) Seleção, iv) Análise e vi) Resultados. Os protocolos criados nesta pesquisa estão apresentados no Anexo 1.

### **2.1.1 PESQUISAS EM LIGAÇÕES EM ESTRUTURAS DE MADEIRA E COMPÓSITOS**

Xin *et al.* (2022) afirmam que é mais econômico e menos demorado reparar ou reforçar peças de madeira danificadas em vez de substituí-las completamente. Atualmente os materiais compósitos FRP oferecem vários benefícios como: alto módulo de elasticidade, resistência e resistência à corrosão (YEBOAH e GKANTOU, 2021).

Saad e Lengyel (2022), relatam que a utilização de reforço estrutural em estruturas de madeira iniciou-se na década de 1960, utilizando-se aço ou alumínio em formato de hastes ou chapas. Esse método apresentava baixa resistência a corrosão e poderia provocar o aumento de carga morta da madeira.

Theakston (1965 *apud* SAAD e LENGYEL, 2022) relata duas tentativas de reforçar vigas de madeira com compósitos GFRP: na primeira, utilizou cola a base de água e, na segunda resina epóxi. O resultado da primeira tentativa apresentou fraco desempenho e o método foi descartado; enquanto que a segunda, foi satisfatória. Desta forma, na década de 70 o uso de GFRP e

adesivo epóxi se difundiu em várias pesquisas, entre elas a utilização dos adesivos GFRP em postes de madeira para aumentar a resistência mecânica e a rigidez da estrutura.

Na década de 1980, a aplicação de GFRP se consolidou, tendo o seu uso mais comum como substitutos das barras de aço degradadas em estruturas de concreto armado. Bulleit (1984 *apud* SAAD e LENGYEL, 2022) afirmou que a maior parte das técnicas de reforços tradicionais existentes na época se tornariam antieconômicas no futuro. No mesmo artigo, considerou que materiais reforçados com fibras, como: Fibras de Vidro, Fibras de Aço, Fibras de Carbono seriam materiais com potencial a serem aplicados em reforços de estruturas de madeira.

As primeiras pesquisas com relatos da aplicação de CFRP em estruturas de madeira foram publicadas em 1992 (TRANTAFILLOU e DESCOVIK, 1992 *apud* SAAD e LENGYEL, 2022). Em tais pesquisas, foi analisado o uso de GFRP e CFRP, em formato de chapas, em estruturas de madeira e verificaram que a mesma quantidade de reforço de CFRP pode proporcionar um ganho de ductibilidade maior do que o proporcionado pelo GFRP. Esse ganho foi demonstrado experimentalmente, sendo que proporções de reforço de 1% da área da seção transversal aumentam a resistência em até 60%. Nas pesquisas realizadas na década de 1990, a maioria dos modelos de resistência de aderência utilizada para verificar o comportamento de FRP em estrutura de madeira era oriunda de definições adotadas para estrutura de concreto, uma vez que esse material foi o pioneiro no uso de FRP.

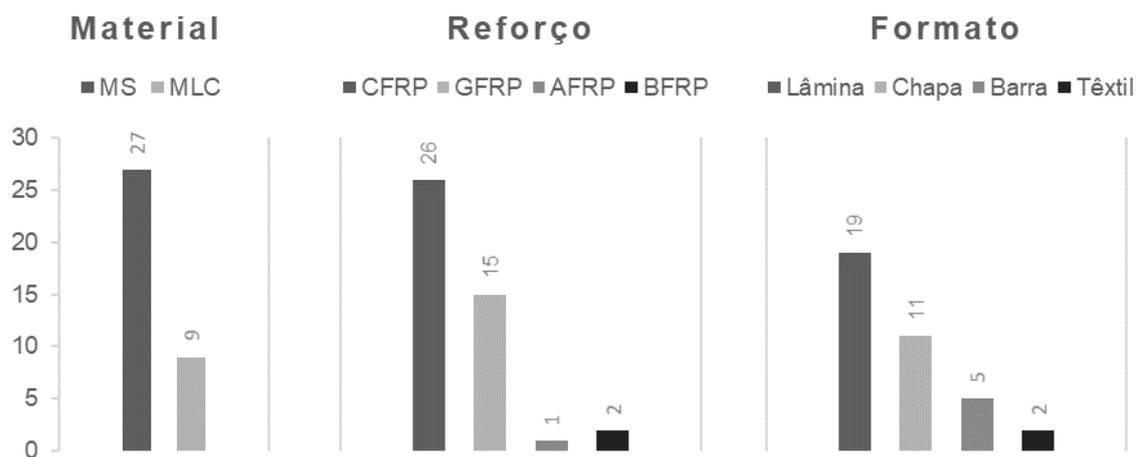
Nos últimos anos, inúmeros trabalhos investigaram vários aspectos de reforço de madeira, de forma experimental, analítica e numérica. Os principais materiais utilizados em reforço em estruturas de madeira foram GFRP e CFRP, e em quantidade consideravelmente menor o uso de AFRP e BFRP.

Os FRP em estruturas de madeira são utilizados em reforços estruturais principalmente de Madeira Serrada (MS) e Madeira Laminada Colada (MLC). A principal forma de reforço de FRP utilizado são em lâminas, chapas, barras e têxtil. Porém, alguns estudos que enfocam o comportamento estrutural de componentes de madeira submetidos a esforços axiais utilizam os compósitos

em formato de barras. Os principais elementos, em estruturas de madeira, que recebem os FRP são em vigas.

Na Figura 2.8 são apresentadas as informações compiladas a respeito da RSL de ligações de estruturas de madeira e materiais compósitos.

**Figura 2.8: Análise dos artigos publicados quanto ao Material, tipo de Reforço e Formato utilizado**



Fonte: Do Autor.

Na Tabela 2.3 são apresentadas as pesquisas encontradas nesta temática contendo o método adotado, o compósito utilizado, a forma do compósito, o tipo de estrutura e o elemento da estrutura, além de um resumo das principais características da pesquisa realizada.

**Tabela 2.3: Pesquisas realizadas sobre o tema Ligações em Estrutura de Madeira e Compósitos**

Referência	Resumo
Fiorelli e Dias (2011)	Estudaram o comportamento de vigas de MLC reforçadas com lâminas de GFRP, utilizando o método experimental. Constataram que o uso do reforço posicionado na região de tração gerou melhorias na resistência à flexão e rigidez. Observaram a tendência de ruptura ora por tração e ora por cisalhamento. Desenvolveram um modelo matemático para o dimensionamento de vigas reforçadas com GFRP, que apresentou boa correlação entre os resultados experimentais e os estimados.
Rafferty e Harte (2011)	Verificaram o comportamento a flexão de vigas de MLC reforçadas com chapas de GFRP. Foram utilizados 2 tipos de viga, com e sem reforço, durante o experimento. Concluíram que a utilização do reforço laminado, localizado na região de tração das vigas, resultou em melhorias

---

		moderadas na rigidez e resistência das vigas.
Juvandes e Barbosa (2012)	e	Analisaram o comportamento de vigas de MS reforçadas com chapas e tecidos de CFRP, considerando duas técnicas de reforço: colado externamente e inserido na superfície. Ensaios de flexão foram realizados para avaliar o comportamento de adesão das juntas madeira-CFRP ao longo da direção das fibras. Os resultados experimentais foram comparados com valores equivalentes das juntas realizadas com concreto-CFRP encontrados na literatura, e propuseram recomendações para o dimensionamento de estruturas de madeira reforçadas com CFRP.
Neubauerová (2012)		Analisou o comportamento de vigas de MS reforçadas com lâminas CFRP. As vigas foram testadas e a força limite máxima e a deformação vertical máxima no meio das vigas foram medidas para verificar a influência do compósito em relação à resistência e rigidez do elemento estrutural. As vigas foram carregadas até a ruptura. Vários modos de falha foram observados, associando-os às características da viga: espécie de madeira, presença de nós na seção transversal, umidade entre outros.
Alhayek e Secova (2012)	e	Estudaram as vigas de MS reforçadas com lâminas de GFRP com o objetivo de verificar o efeito do reforço no aumento da rigidez da estrutura. Os resultados apresentam evidências de que a relação: vão-espessura da viga é um fator importante a ser considerado no reforço de vigas de madeira. Vigas com menores relações vão-espessura apresentaram pequeno aumento na rigidez com o aumento da região de aplicação do reforço.
De Jesus <i>et al.</i> (2012)		Realizaram um estudo experimental, analítico e numérico para avaliar o efeito nas tensões de cisalhamento e de descamação interfaciais, em vigas de MS, reforçadas com laminados de CFRP. Modelos analíticos para as tensões interfaciais foram aplicados e seu desempenho avaliado e comparado com os resultados numéricos. O sucesso dos modelos analíticos depende da consideração da deformação de cisalhamento principalmente da madeira, que apresenta módulo de cisalhamento relativamente baixo.
De La Rosa García <i>et al.</i> (2013)		Estudaram experimentalmente o comportamento de vigas de MS de <i>Pinus sp.</i> , reforçadas com tecidos de CFRP e BRFP. Ensaios de flexão foram realizados. Diversas configurações dos materiais de CFRP e BRFP foram testadas. Os resultados obtidos para vigas, com e sem reforço, foram comparados. Os resultados comprovaram o bom comportamento do tecido reforçado BRFP quando aplicado em vigas de madeira, e dos tecidos de CFRP bidirecionais em oposição aos tecidos de CFRP unidirecionais.
Yang <i>et al.</i> (2013)		Para comparar a eficiência do reforço laminado, os autores utilizaram reforços de CFRP, GFRP e fibra de vidro de alta resistência (GFHRP). Vigas de MS, com e sem reforços, foram produzidas. Ensaios de flexão foram realizados e os modos e os mecanismos de ruptura das vigas reforçadas foram investigados. Os resultados mostram que, o reforço GFHRP pode aumentar significativamente a ductibilidade das vigas de madeira reforçadas sob a premissa de aumentar a capacidade de carga a um custo menor. Um modelo de cálculo para prever a capacidade de carga último de vigas de madeira reforçadas com GFHRP foi apresentado, em concordância básica com os valores testados.

---

- 
- Kim *et al.* (2013) Examinaram o comportamento de vigas de MS, intencionalmente danificadas pela criação de um entalhe no meio do vão. Na região do entalhe, reforços de chapas de CFRP foram posicionados. Pelo método experimental, foi analisado o mecanismo do conjunto durante o carregamento das vigas. As vigas foram simplesmente apoiadas e carregadas até ocorrer a falha. As vigas reforçadas com chapa de CFRP apresentaram uma significativa melhoria na capacidade de carga de até 184% e na ductibilidade de 165% na deflexão. Concluíram que as concentrações de tensão no entalhe são um fator importante que influencia as características de falha e a capacidade última das vigas. O reforço de CFRP resulta em melhor distribuição de carga entre as vigas constituintes da montagem, apesar dos danos localizados.
- 
- Wan *et al.* (2014) O estudo tem enfoque na análise do comportamento de conexões coladas reforçadas com CFRP em estruturas de MS. Uma série de testes de cisalhamento simples nas ligações foram realizados. Os parâmetros analisados foram: (a) tipo de adesivo, (b) tamanho da lâmina e (c) espécies de madeira. Os resultados incluem descrições dos comportamentos das conexões ensaiadas, além da categorização dos modos de falha, das resistências, distribuição de tensões e tensão-deslizamento para a aderência do material compósito. Apresentaram um modelo matemático com base nos resultados, o qual pode prever os comportamentos de tensão-deslizamento de ligações de juntas coladas com CFRP.
- 
- Raftery e Whelan (2014) Estudaram o comportamento de vigas fabricadas com MS e MLC utilizando reforços de GFRP em forma de barra de diversos diâmetros. Ensaio de flexão nas vigas com e sem reforço foram realizados. Os resultados dos testes indicaram que a utilização de um número de barras de menor diâmetro, em um único bloco para aumentar a área de superfície de aderência, não é vantajosa no reforço das vigas. As vigas de MLC não reforçadas apresentaram comportamento elástico linear com rupturas frágeis por tração em comparação ao comportamento não linear das vigas de MLC reforçadas com barras em sua face de tração
- 
- Osmabbezhad *et al.* (2014) Investigaram a resistência à flexão de vigas de MLC reforçadas com lâminas de GFRP. As espécies utilizadas na fabricação das vigas foram: *Populus deltoids* e *Fagus orientalis*. O reforço com GFRP foi feito com 4 métodos: usando 1 e 2 camadas de GFRP sob as camadas inferiores da MLC; e 2 e 4 camadas de GFRP entre as camadas superiores da viga de MLC. Ensaio de flexão foram realizados e os resultados mostraram que a maior resistência a tração foi obtida quando usadas 4 camadas de GFRP. No entanto, amostras feitas de madeira *Fagus orientalis* têm maior resistência do que as da madeira *Populus deltoids*. Durante os ensaios de flexão de 3 pontos foi mostrado que o local da fratura foi alterado do lado de tração para o lado de compressão pelo aumento das camadas de GFRP.
- 
- Li *et al.* (2014) Vigas ocas confeccionadas com MS foram reforçadas com barras GFRP e lâminas de CFRP. Ao todo 5 vigas de cada configuração, com e sem reforço, foram ensaiadas à flexão. O ensaio de flexão em 4 pontos foi realizado para obter as relações força-deslocamento das vigas de madeira. Os resultados experimentais de cada grupo foram comparados. Um método de análise seccional foi proposto para obter as relações força-deslocamento dessas vigas de madeira reforçadas por barras de GFRP e lâminas de CFRP. Os resultados analíticos podem prever, razoavelmente, as relações força-deslocamento dessas vigas de madeira
-

---

		reforçadas com barras GFRP e lâminas de CFRP.
Morales-Conde <i>et al.</i> (2015)		Apresentaram os resultados de um procedimento desenvolvido para o reforço de vigas de MLC com chapas de GFRP. A técnica experimental proposta foi testada em duas situações: reparação de extremidades de vigas apodrecidas, e reparação e/ou reforço do centro da viga danificado por falha ou necessidade de aumentar a capacidade de resistência da madeira. Em ambos os sistemas, os reforços foram testados em várias situações, e proporcionaram eficácia semelhante à de uma viga sã, e um aumento da capacidade de carga em até 50%.
Lu <i>et al.</i> (2015)		Investigaram o comportamento à flexão de vigas de MS e de MLC reforçadas com laminados de CFRP. Vinte e quatro vigas de MLC e dezoito vigas de MS reforçadas e seis vigas de madeira não reforçadas foram testadas até a falha, com o objetivo de verificar a influência do reforço na resistência à flexão e rigidez das vigas. Os resultados experimentais indicaram que a resistência e a rigidez foram significativamente melhoradas em 34,2% a 52,3% e 8% a 28,5%, respectivamente. Também verificaram que a distribuição do perfil de deformação indica que o comportamento compressivo da madeira pode ser melhorado com o uso de reforços de CFRP na zona de tração das vigas.
Nadir (2016)	<i>et al.</i>	Apresentaram um programa experimental de reforço de vigas de MLC usando chapas CFRP e GFRP, com ensaios de flexão. Os resultados observados para vigas com 2,5% e 5% de adição de chapa composta de GFRP, na região de tração, teve aumento da resistência à flexão de 36,91% e 40%, respectivamente, em relação à viga não reforçada. Para a adição de 1,67% e 3,33% de chapa composta de CFRP, na região de tração, teve aumento na rigidez à flexão de 36,19% e 64,12%, respectivamente, em relação a viga não reforçada. O aumento na resistência à flexão para a adição percentual correspondente de CFRP foi de 45,86% e 50,62%, quando comparado com a viga não reforçada.
Kliger (2016)	<i>et al.</i>	Lâminas de CFRP e GFRP foram utilizadas para reforço em vigas de MS, cobrindo tanto a região de compressão quanto a de tração. Foram testados também o pré-esforço dos materiais de FRP antes da colagem. Verificaram que a utilização de lâmina pré-tensionada provoca aumento da capacidade de suporte de carga, superior em relação aos valores obtidos à aplicação do método com lâmina de FRP. Algumas das principais vantagens citadas refere-se ao uso de lâmina pré-tensionada, que permite maior facilidade de manutenção das estruturas e reduz a quantidade de reforço de FRP.
Yang (2016)	<i>et al.</i>	Estudaram a utilização de barras de CFRP em vigas de MLC. Testes de flexão em quatro pontos foram realizados até a ruptura das vigas. O enfoque dessa pesquisa foi avaliar a eficiência dos reforços em barras armadas passivamente e protendidas. Os resultados dos testes mostraram que a capacidade de flexão das vigas reforçadas, protendidas teve aumento em 64,8%; as protendidas e reforçadas na região inferior e superior tiveram aumento em 93,3% e 131%, respectivamente. A melhoria máxima da rigidez à flexão atingiu 42,0%. Com base nos resultados experimentais, foi proposto um modelo teórico para prever a capacidade de flexão de vigas de madeira não armadas, armadas e protendidas, o qual foi validado pelos dados do ensaio.
Corradi	<i>et al.</i>	Estudaram a utilização de chapas de CFRP e GFRP como reforços em vigas de MS. Ensaios de flexão em vigas confeccionadas com diferentes

---

---

(2017)	espécies de madeira foram realizados. Ao todo 221 ensaios de flexão em vigas reforçadas e não reforçadas foram realizados. Os resultados dos testes mostraram que o reforço de FRP é eficaz tanto para aumentar a capacidade de carga da viga quanto para reduzir as incertezas de resistência.
Vahedian <i>et al.</i> (2018)	Investigaram o comportamento de reforço de CFRP a vigas de MS. Um novo modelo teórico foi desenvolvido através da análise de regressão obtido por meio de ensaios de cisalhamento de 136 corpos de prova, resultando assim, no estabelecimento de um novo modelo preditivo para determinação da resistência de união para elementos de CFRP-madeira. Os resultados desta análise de regressão foram comparados com resultados de testes experimentais, e os resultados foram satisfatórios entre as cargas finais aplicadas e as cargas previstas. Por fim, uma melhoria significativa na previsão do comportamento das ligações foi alcançada quando os resultados do modelo analítico proposto foram comparados com os modelos existentes da literatura.
Rescalvo <i>et al.</i> (2018)	Analysaram um comparativo da carga máxima de flexão em vigas de MS com defeitos naturais reforçados com lâminas de CFRP. Dois laminados CFRP comerciais foram aplicados como reforço e foram devidamente colados com resina epóxi no lado tensionado das vigas. A lei constitutiva elastoplástica da madeira foi utilizada e assumiu os mesmos módulos elásticos de tração e compressão para o método de equilíbrio da seção transversal. Os valores analíticos para a capacidade de carga de flexão não corresponderam aos valores experimentais. Ao adotar um modelo mais geral para a madeira, no qual os dois módulos são considerados diferentes nas tensões de compressão e tração fornece uma correspondência muito melhor entre os valores analíticos e experimentais da capacidade de carga a flexão. A melhoria é especialmente evidente para vigas com defeitos naturais e muitos anos em serviço, reforçadas com CFRP para fins de restauro. A utilização de reforço induziu uma melhoria de até 88% na capacidade de carga de flexão.
Brol e Wdowiak-Postulak (2019)	Estudaram a utilização de reforço de AFRP, BFRP, CFRP e GFRP em formas de lâmina e barras em vigas de MS. Os resultados dos testes mostraram que em peças de madeira maciça a maior capacidade de flexão média ocorreu em amostras reforçadas com barras CFRP, resultando em um aumento na capacidade de flexão de 60,66% em relação às não reforçadas, enquanto a menor capacidade de flexão dos componentes testados ocorreu com o reforço com barras GFRP com 10 mm de diâmetro.
Vahedian <i>et al.</i> (2019)	Resultados de testes experimentais em vigas de MS reforçadas com lâmina de CFRP foram usadas para investigar potenciais parâmetros que afetam a resistência à flexão e a capacidade de carga final de vigas. Os resultados dos testes apontaram que a redução das concentrações de tensões pode melhorar o desempenho mecânico das vigas reforçadas. A capacidade de carga máxima e a resistência à flexão de vigas reforçadas melhoraram significativamente quando o comprimento e a largura da ligação aumentaram. Os resultados dos experimentos mostraram melhoria predominantemente à rigidez e à ductibilidade das vigas de MS.
Corradi <i>et al.</i> (2018)	Abordaram a avaliação da resistência à flexão de pequenas vigas de MS submetidas a cargas estáticas, antes e depois de serem reforçadas com chapas de CFRP. Um trabalho experimental foi desenvolvido no qual os reforços foram aplicados localmente na área onde os defeitos foram observados. Os resultados dos ensaios de flexão demonstraram que é

---

---

	possível restaurar parcialmente a capacidade de flexão de vigas de madeira defeituosas com a aplicação do método de armadura proposto nesse trabalho.
--	---

---

De Almeida e De Melo Moura (2022)	Analisaram as conexões com pinos de polímero reforçado com fibra de vidro (GFRP) em painéis de CLT. Um estudo experimental foi realizado utilizando-se corpos de prova submetidos a carregamentos de cisalhamento monotônico, de acordo com a norma EN 26891-1991. Duas configurações de painéis adjacentes de cinco camadas foram testadas: conexões de topo plano em 45° (eixos x, y e z) e conexões de meia volta em 90°. Os resultados mostraram maior rigidez para conexões topo a topo. Em termos de resistência, as conexões de meia volta foram mais fortes do que as conexões de extremidade.
-----------------------------------	--

---

Wu <i>et al</i> (2023)	Propuseram a substituição da placa de aço por placa de polímero reforçado com fibra de vidro (GFRP) para ligação de elementos de madeira, por meio de um estudo experimental sobre os desempenhos estático e à fadiga das ligações aparafusadas GFRP-madeira propostas. Variáveis incluindo diâmetro do parafuso, número de linhas de parafusos e número de colunas de parafusos foram selecionadas para compreender seus efeitos nos comportamentos estático e de fadiga das conexões. Foram relatados modos de falha, curvas carga-deslocamento, capacidades de carga estática, vida útil em fadiga, e degradações de rigidez das conexões aparafusadas de madeira GFRP. As conexões de placas de GFRP apresentaram capacidades de suporte estática semelhantes ou até maiores em comparação com as conexões de placas de aço convencionais.
------------------------	--

---

Camargo <i>et al</i> (2023)	Investigaram o comportamento mecânico e o desempenho estrutural de madeira laminada da espécie <i>pinus</i> com cavilhas compostas de resina polimérica reforçada com fibra (resina epóxi, endurecedor e fibra de vidro) com diâmetro de 12,5 mm submetida a força de tração na direção da conexão. O programa experimental incluiu caracterização do pino em GFRP, caracterização das espécies de madeiras utilizadas e ensaio de tração das ligações com os pinos reforçados com fibra de vidro. Posteriormente, os resultados foram comparados com os observados na literatura. Nas comparações foi possível concluir que as juntas com pinos de GFRP apresentaram melhor desempenho em termos de resistência ao cisalhamento por seção do que aquelas como pregos comuns, pregos helicoidais (Ardox) e pinos estruturais compósitos (meia volta, 90°), com diâmetros de 3,8 mm, 3,4 mm e 6 mm, respectivamente. O estudo conclui que o uso do material polimérico tem potencial para aplicação nestes tipos de ligações.
-----------------------------	--

---

Fonte: Do Autor.

### 2.1.1.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE AS PESQUISAS EM LIGAÇÕES EM ESTRUTURAS DE MADEIRA E COMPÓSITOS

Durante a revisão de literatura com a temática de ligações em estruturas de madeira e materiais compósitos, nos últimos treze anos, verificou-se a predominância da utilização de reforços de estrutura de madeira com materiais laminados de CFRP e GFRP.

Percebe-se que o uso do polímero de CFRP apresenta resistências mecânicas superiores quando comparado com os reforços realizados com GFRP. Todavia, ao analisar o custo do CFRP verifica-se que o material não apresenta boa competitividade financeira, sendo assim, o uso de GFRP para reforço estrutural apresenta um equilíbrio entre resistência e custo.

Verifica-se também, nas pesquisas citadas na literatura, a predominância de materiais em forma de lâminas aplicados em vigas. Os trabalhos que abordaram a utilização de barras estão relacionados ao restauro de vigas de madeira muito danificadas. O uso de RFP em ligações só foi observado em trabalhos, nos quais foram tratadas ligações com cavilhas de madeira reforçadas e/ou fabricadas com GFRP, mas não com a utilização de barras industrializadas nas ligações.

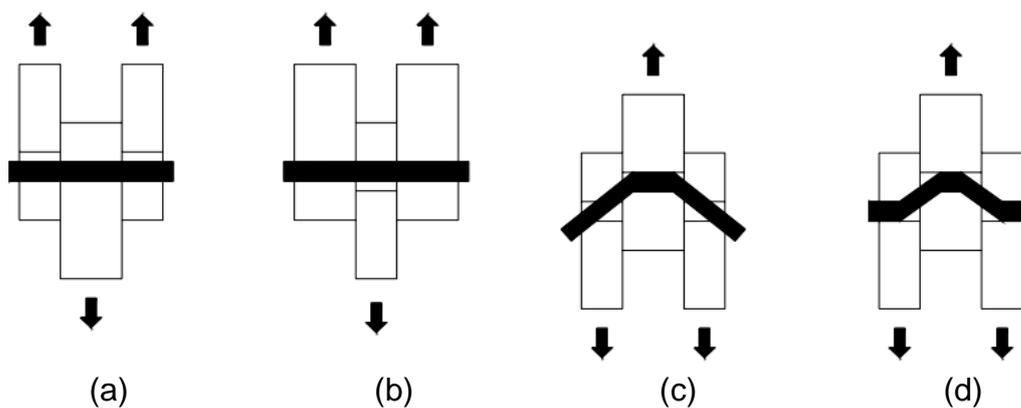
### **2.1.2 PESQUISAS SOBRE MODELOS PARA ESTIMATIVA DE FORÇA ÚLTIMA E FRATURA EM LIGAÇÕES DE ESTRUTURAS DE MADEIRA**

As ligações de madeira são objetos de estudos por pesquisadores de vários países (NIE *et al.*, 2021; XIE *et al.*, 2021; DE ALMEIDA; DE MELO MOURA, 2022; WU *et al.*, 2023; CAMARGO *et al.*, 2023). Essas pesquisas são desenvolvidas de modo analítico e experimental com o objetivo de aprimorar o comportamento mecânico das ligações, pois esses elementos são considerados partes essenciais da estrutura de madeira devido a sua capacidade de conectar elementos estruturais, transmitir altas cargas e, portanto, requerem maior atenção durante a elaboração e dimensionamento do projeto.

O comportamento mecânico de ligações utilizando pinos metálicos, como os parafusos, foi idealizado por Johansen (1949). O autor considerava duas possibilidades de ruptura tanto para situações de cisalhamento simples quanto de corte duplo: (a) embutimento do pino metálico na madeira e, (b) flexão do pino metálico. Na Figura 2.9 são apresentados os possíveis tipos de

ruptura da ligação no modelo idealizado por Johansen: embutimento do pino metálico na madeira que compõe a ligação ou a flexão do pino metálico.

**Figura 2.9: Modos de ruptura em cisalhamento duplo: (a) embutimento dos pinos nas peças externas, (b) embutimento do pino na peça interna, (c) flexão do pino na peça interna e (d) flexão do pino nas peças internas e externas**



Fonte: Do Autor.

No entanto, a teoria de Johansen (1949) não contemplava a elaboração de ligações com peças de madeira que apresentavam diferentes resistências ao embutimento. Tendo em vista essas limitações Möller (1951 *apud* Meyer, 1957) ampliou a abrangência do método, tornando possível a utilização de peças de madeira com diferentes resistências ao embutimento para compor a ligação. Para isso, adotou o parâmetro adimensional  $\beta$  que representa a relação entre a resistência ao embutimento da peça interna ( $f_{h,2}$ ) dividido pela resistência ao embutimento da peça externa ( $f_{h,1}$ ), apresentado na Equação 2.1.

$$\beta = \frac{f_{h,2}}{f_{h,1}} \quad (2.1)$$

O dimensionamento de pinos metálicos atualmente é baseado na teoria de Johansen (1949) e está presente em vários códigos normativos, como: Eurocode-5, Norma canadense, Norma neozelandesa e Norma brasileira. Para uma ligação do tipo madeira-madeira com pino metálico submetido à

cisalhamento duplo, a capacidade de carga característica é obtida pelos documentos normativos utilizando as Equações de 2.2 a 2.5.

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d & (2.2) \\ 0,5 \cdot f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d & (2.3) \\ 1,05 \cdot \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \cdot \left[ \sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta)M_{y,Rk}}{f_{h,Rk} \cdot d \cdot (t_1)^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (2.4) \\ 1,15 \cdot \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \cdot \sqrt{2M_{y,Rk} \cdot f_{h,1,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (2.5) \end{cases}$$

Onde:

$f_{h,i,k}$  ( $f_{h,1,k}$  ou  $f_{h,2,k}$ ) é o valor característico da resistência ao embutimento do elemento de madeira que compõe a ligação;

$M_{y,Rk}$  é o valor característico do momento resistente do pino metálico;

$\beta$  é a razão entre a resistência de embutimento das peças de madeira da ligação;

$F_{ax,Rk}$  é o valor característico da resistência ao arrancamento do pino metálico.

Os quatro modos de ruptura das ligações do tipo madeira-madeira são ilustrados na Figura 2.9, que correspondem, respectivamente, às quatro capacidades de carga características dadas pelas Equações de 2.2 a 2.5. O modo de falha (a) representa a falha do rolamento das peças externas, (b) representa a falha do rolamento da peça central, (c) representa a formação simultânea da flexão plástica no conector dentro do membro central e falha de rolamento de todas as peças e (d) representa a formação simultânea de flexão plástica no conector dentro de todos os membros e falha de rolamento de todas as peças.

O valor da resistência característica de embutimento no elemento de madeira, na direção paralela às fibras com pré-furos é obtido correlacionando o valor do diâmetro do pino, entre 6 mm e 30 mm, e a densidade característica da madeira  $\rho_k$ , conforme definido na Equação 2.6. O valor de  $M_{y,Rk}$  é calculado de acordo com o diâmetro do pino (d) e sua resistência à tração característica do material ( $f_{u,k}$ ), como apresentado na Equação 2.7.

$$f_{h,1,k} = f_{h,2,k} = 0,082(1 - 0,01d)\rho_k \quad (2.6)$$

$$M_{y,Rk} = 0,3f_{u,k}d^{2,6} \quad (2.7)$$

Após o cálculo do valor de  $F_{v,Rk}$ , é necessário determinar o valor de projeto da capacidade de carga característica, que é obtida a partir da Equação 2.8, na qual são considerados dois fatores de segurança, definidos de acordo com os documentos normativos. Por fim, com o cálculo de  $F_{v,Rd}$ , é possível obter o número de pinos necessários a ligação, obtido pela Equação 2.9.

$$F_{v,Rd} = \frac{F_{v,Rk} K_{mod}}{\gamma_m} \quad (2.8)$$

$$N \geq \frac{F_d}{F_{v,Rd}} \quad (2.9)$$

Blass *et al.* (1999) realizaram pesquisas em ligações com pinos metálicos como conectores de estruturas de madeira e desenvolveram para o cálculo do momento fletor do pino a Equação 2.10 e para determinar a capacidade de carga ao cisalhamento da conexão a Equação 2.11.

$$M_{u,k} = \frac{f_{m,k} \pi d^3}{32} \quad (2.10)$$

$$R_k = \sqrt{\frac{2\beta}{1+\beta}} \sqrt{2M_{u,k} \delta f_{h,k} d} \quad (2.11)$$

Onde:

$f_{h,i,k}$  ( $f_{h,1,k}$  ou  $f_{h,2,k}$ ) é o valor característico da resistência ao embutimento do elemento de madeira que compõe a ligação

$\beta$  é a razão entre a resistência de embutimento das peças de madeira da ligação

$\delta$  é um coeficiente de redução (recomenda-se um valor de 0,75);

$f_{h,k}$  é o valor característico do momento resistente do pino metálico

$F_{m,k}$  é o valor característico da resistência à flexão do pino metálico.

Milch *et al.* (2017) validaram algumas expressões empíricas para prever a capacidade de carga de juntas do tipo pinos metálicos ao cisalhamento duplo, conforme proposto por Fukuyama *et al.* (2008) com base no método proposto por Johansen. As Equações resultantes desse trabalho são as apresentadas com os números de 2.12 a 2.15.

$$P_{y,cal} = \sqrt{\frac{4dF_{ecp}M_p\beta}{1+\beta}} \quad (2.12)$$

$$F_{ecp} = \min(F_{e,exp}, \alpha_F F_{cvf}) \quad (2.13)$$

$$F_{e,exp} = \frac{P_{max,exp}}{dL_1} \quad (2.14)$$

$$M_p = \frac{\pi d^3}{32} F_b \quad (2.15)$$

Onde:

$F_{ecp}$  é a força de embutimento;

$F_{e,exp}$  é a resistência de embutimento em componentes de junta (N/mm<sup>2</sup>)

$\alpha_F$  é um coeficiente de amplificação na tensão de escoamento de embutimento (sugerido como 1,9);

$F_{cvf}$  é a tensão de escoamento de embutimento do pino metálico

$\beta$  é a razão entre a resistência da madeira de embutimento dos componentes da ligação;

$M_p$  é a capacidade plástica do pino metálico;

$P_{max,exp}$  é a força máxima experimental (N);

$F_b$  é a resistência à flexão do pino metálico.

Existem outros estudos que estabelecem relação entre o momento de escoamento na flexão do pino metálico e o deslocamento do pino, relacionando-os com a tensão de escoamento ( $f_{y,k}$ ), conforme mostrado na Equação 2.16. Na Equação 2.17,  $\xi$  é o coeficiente do índice de plasticidade do pino que foi estabelecido experimentalmente por Blass e Laskewitz (2003) e é obtido em função do ângulo do pino deformado e o seu deslocamento.

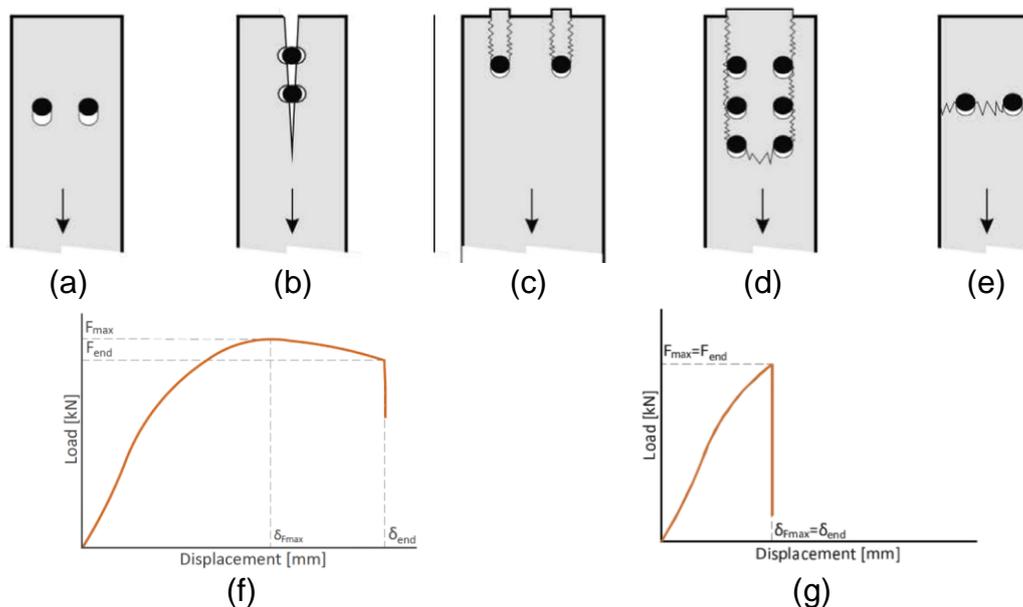
$$M_{y,Rk} = \frac{\xi \times f_{y,k} \times d^3}{6} \quad (2.16)$$

$$\xi = \min \left\{ \begin{array}{l} (0,866 + 0,0025 \times \theta) \times \left( 1 - e^{\left( \frac{-0,248 \times \theta}{0,866} \right)} \right) \\ 1 \end{array} \right. \quad (2.17)$$

Nos estudos realizados por Yurrita *et al* (2019), Yurrita e Cabrero, (2020a, 2020b, 2020c), Yurrita, Cabrero e Moreno-Zapata (2021) foram analisados outros tipos de falhas provocadas em ligações de madeira, principalmente focando em situações de falhas com comportamento frágil e

dúctil. De acordo com os autores as conexões de madeira podem falhar dessas duas formas, dúctil ou frágil, como mostrado na Figura 2.10.

**Figura 2.10: Modos de ruptura: dúctil (a), frágil (b-e). Diagrama Força vs Deslocamento: (f) ruptura dúctil e (g) ruptura frágil**



Fonte: Adaptado de Yurrita e Cabrero (2021).

Como a madeira falha de maneira frágil sob flexão e tração, a ductibilidade das estruturas de madeira geralmente é fornecida por conexões. Portanto, valores elevados de ductibilidade nas ligações são desejáveis. Por um lado, a deformação sequencial de uma falha dúctil, Figura 2.10 (a), permite identificar uma possível falha a tempo de prevenir e contribuir para uma adequada robustez da estrutura. Já uma falha frágil, Figura 2.10 (b-e), implica em um colapso súbito da estrutura que pode levar a danos humanos ou materiais. Vários autores estudam a formulação de modelos matemáticos para prever o comportamento de ligações de madeira de forma mais precisa que as equações propostas por Johansen (1949) e Möller (1951, *apud* Meyer, 1957).

### **2.1.2.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE PESQUISAS EM MODELOS PARA ESTIMATIVA DE FORÇA ÚLTIMA E FRATURA EM LIGAÇÕES DE ESTRUTURAS DE MADEIRA**

Durante a revisão de literatura com a temática estimativa de força última e fratura em estruturas de madeira, verificou-se a existência de vários modos de fratura. Para cada tipo de falha é apresentado na literatura especializada, um modelo desenvolvido utilizando pesquisas experimentais e numéricas. Tais pesquisas adotam critérios de falha ora o máximo valor entre cisalhamento e tração e ora consideram ambos os esforços.

Durante a revisão de literatura, verificou-se a existência de modelos matemáticos elaborados para ligações com pinos metálicos associados a elementos de madeira. Tal situação corrobora para a elaboração de um modelo matemático para adoção em ligações de estruturas de madeira com pinos fabricados com GFRP.

### **2.1.3 PESQUISAS COM SIMULAÇÃO NUMÉRICA EM ESTRUTURAS DE MADEIRA**

A utilização de simulação numérica em estruturas consiste em uma alternativa para reduzir etapas experimentais, pois permite avaliar diversos parâmetros de interesse com maior dinamismo. Softwares de simulação numérica são utilizados para estudos em estruturas de madeira, como: o Abaqus (KHELIFA *et al.*, 2014; NIE e VALIPOUR, 2021; BRAUN *et al.*, 2022) e Ansys (CALIL NETO *et al.*, 2017; VODIANNIKOV *et al.*, 2020; SZÁSZ *et al.*, 2021).

Aejaz *et al.* (2021) utilizaram o método experimental para estudar o efeito de modificações geométricas no comportamento da ligação utilizando cavilhas em estruturas de madeira. De posse dos valores de força de ruptura e do modo de falha verificaram o comportamento e resistência mecânica dessas ligações. Os dados experimentais foram usados para o desenvolvimento do

modelo numérico, de tal forma que a simulação realizada no software Abaqus representasse os resultados obtidos de modo experimental. Os modelos de elementos finitos foram validados e, posteriormente, utilizados na realização de estudos paramétricos para obtenção de dados em um domínio mais amplo, para avaliar o efeito de modificações geométricas no comportamento da ligação.

Estudos paramétricos são usualmente utilizados em conjunto com softwares de elementos finitos, como observados em Kuai *et al.* (2022), O'Ceallaigh *et al.* (2021), De Santis e Fragiaco (2021) e Bouhala *et al.* (2020). O uso de simulações numéricas juntamente com estudos paramétricos e uso de software facilitam a alteração de parâmetros após a validação do modelo numérico com base nos resultados experimentais, possibilitando maior dinamismo nas pesquisas.

Rodacki e Furtak (2019) afirmam que é de extrema importância a inserção de dados que expressem o comportamento real do elemento estudado no software de simulação numérica. Durante o processo de simulação é necessário a inclusão de informações das características dos materiais que compõem a estrutura simulada, como: (a) Coeficiente de Poisson, (b) Módulo de Elasticidade e (c) Resistência à Tração entre outros.

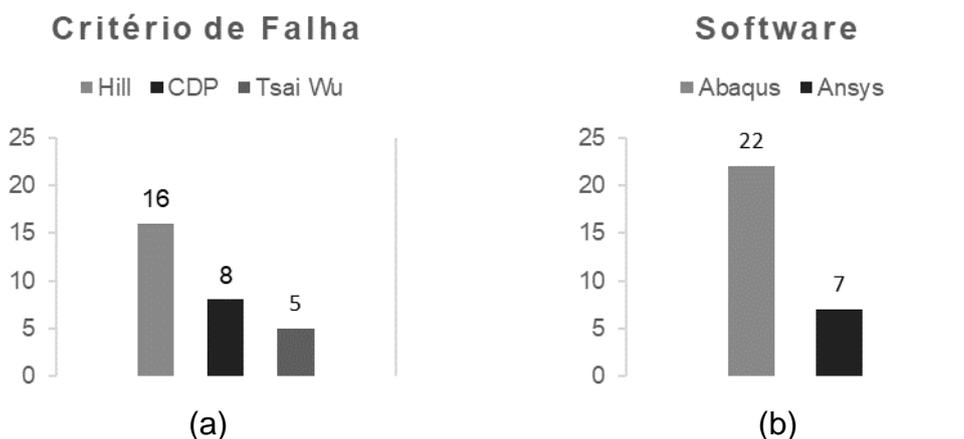
A madeira, por ser considerada um material ortotrópico, apresenta comportamento diferenciado nas direções longitudinal, radial e tangencial. Portanto, a caracterização do material deve considerar os três eixos como observado por O'Ceallaigh *et al.* (2021) e Sotayo *et al.* (2020), assim como o modelo constitutivo do material deve ser informado.

Uma estratégia de modelagem numérica tridimensional para simular o comportamento de vigas mistas de madeira foi estudada por Polus e Szumigala (2019) utilizando o software Abaqus. O modelo constitutivo Concrete Damaged Plasticity (CDP) foi adotado, por estar disponível na biblioteca de materiais do programa. Esse modelo assume dois modos de ruptura: fratura na tração e esmagamento na compressão.

Na Figura 2.11 estão representados, numericamente, os principais modelos constitutivos encontrados na revisão de literatura realizada para os

critérios de Hill (BEDON e FRAGIACOMO, 2019; O'CEALLAIGH *et al.*, 2021), de Tsai-wu (MASCIA; NICOLAS; TODESCHINI, 2011; ZERBST *et al.*, 2020) e o CDP (LI *et al.*, 2019; MENIS; FRAGIACOMO; CLEMENTE, 2019).

**Figura 2.11: (a) Critério de Falha adotados nas pesquisas que utilizaram simulação computacional. (b) Softwares de simulação computacional utilizado**



Fonte: Do Autor.

Por simplificação, durante o processo de simulações numéricas, as propriedades da madeira nas direções radial e tangencial podem ser consideradas iguais; bem como o comportamento do material à tração pode ser equivalente ao comportamento à compressão (O'CEALLAIGH, 2021; AVEZ *et al.*, 2016; KHELIFA *et al.* 2015). Nessas pesquisas foi utilizado um modelo de material elastoplástico ortotrópico associado ao critério de resistência de Hill (HILL, 1948), o qual consiste em uma extensão do critério de von Mises para aplicação em materiais anisotrópicos.

Outro aspecto a ser analisado para os elementos finitos é a utilização de malhas nos modelos numéricos, pois tais malhas podem apresentar diversas configurações e tamanhos. As malhas podem ser do formato hexaédrico ou tetraédrico de 8 ou 6 nós com integração reduzida ou não. De acordo com Wilkinson e Augarde (2022) o tamanho e o tipo de malha devem ser escolhidos tendo em vista a estabilidade da solução, pois malha muito refinada pode aumentar consideravelmente o tempo de análise e também levar à instabilidade numérica.

No mesmo estudo os autores consideraram outros formatos para compor as malhas como elementos hexaédricos de 8 nós (C3D8R) e tetraédricos de 10 nós (C3D10R), ambas as situações com integração reduzida. Na análise dos resultados, verificou-se que os respectivos tamanhos de malha e tipos dos elementos influenciaram nos resultados, na geração de erros e no tempo necessário para a realização da simulação.

### **2.1.3.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE PESQUISAS COM SIMULAÇÃO NUMÉRICA EM ESTRUTURAS DE MADEIRA**

A utilização do método de simulação numérica em estruturas de madeira pôde ser observada durante a revisão de literatura.

As análises numéricas consistem em uma alternativa menos custosa, quando comparada às análises experimentais, e que permite avaliar diversos parâmetros de interesse nas estruturas. As análises numéricas também possibilitam a consideração de particularidades dos materiais, como as não linearidades físicas e a variação de propriedades físicas e mecânicas. A necessidade de validação do modelo numérico faz com que os estudos numéricos, geralmente, considerem os estudos experimentais para a validação do modelo numérico.

A utilização do critério de falha de Hill para estruturas de madeira é mais usual pois, representa mais fidedignamente o modo de ruptura de estruturas de madeira, apesar de alguns estudos utilizarem outros critérios como o CDP justificando que o modelo já se encontra inserido na biblioteca do software.

### 3 MÉTODO

O método utilizado para a realização desta pesquisa contemplou duas etapas distintas: (a) Etapa Numérica e (b) Etapa do Estudo Paramétrico.

Na Etapa Numérica foram apresentados os aspectos computacionais da simulação numérica, teste de malha e a calibração do modelo numérico com base nos resultados experimentais dos modelos das ligações ensaiadas por Barcarolo (2019).

Com o embasamento obtido na revisão de literatura, com as informações referentes à caracterização das espécies de madeira utilizadas no protótipo da ligação, e informações quanto à caracterização da barra de GFRP moldada *in loco*, foi validado um modelo numérico desenvolvido com base nos resultados de Barcarolo (2019).

A partir do modelo numérico validado foi realizado um estudo paramétrico utilizando barras de GFRP, fabricadas pela empresa Stratus Compostos Estruturais LTDA., como conectores da ligação com o propósito de extrapolar as variáveis. Os resultados do Estudo Paramétrico obtidos da simulação numérica (força de ruptura e modo de falha) foram utilizados para propor um modelo para estimativa de força de ruptura. No modelo proposto, foi verificado a validade do modelo estatisticamente, e posteriormente comparado com o modelo proposto por Johansen (1949) existente na literatura correlata e nos documentos normativos.

Este Capítulo está organizado da seguinte forma: na Seção 3.1 são apresentados os Modelos das Ligações; na Seção 3.2 são apresentadas informações sobre a Etapa Numérica. Na Seção 3.3 é apresentada a Etapa do Estudo Paramétrico proposto, e na Seção 3.4 é apresentada a metodologia para o desenvolvimento do Modelo de Regressão para Estimativa de Força Última. Ao fim deste capítulo, na Seção 3.5, são apresentadas as Considerações Finais.

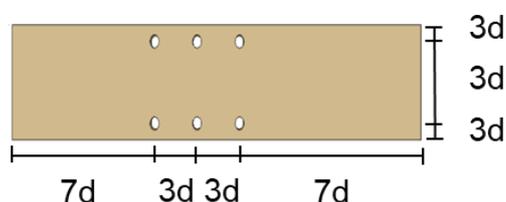
## 3.1 MODELO DAS LIGAÇÕES

Nesta seção são apresentados os Modelos das Ligações a serem simulados no software de elementos finitos. A idealização desses modelos foi baseada em estudos de Barcarolo (2019) o qual analisou a Elaboração do Protótipo da Ligação e o Ensaio do Protótipo de Ligação em equipamento desenvolvido no Laboratório de Estruturas da Universidade Estadual de Londrina (UEL).

### 3.1.1 ELABORAÇÃO MODELO DA LIGAÇÃO

A elaboração do protótipo da ligação simulada substituindo pinos metálicos por pinos fabricados a partir de barras GFRP respeitaram os espaçamentos e distâncias mínimas recomendados em ligações com pinos metálicos de acordo com a NBR 7190-1 (ABNT, 2022a). As distâncias mínimas, em relação ao diâmetro ( $d$ ) do conector, prevista pela norma são apresentadas na Figura 3.1.

**Figura 3.1: Espaçamento mínimo para as ligações confeccionadas com pinos metálicos, do acordo com a NBR 7190:2022**



Fonte: Do autor.

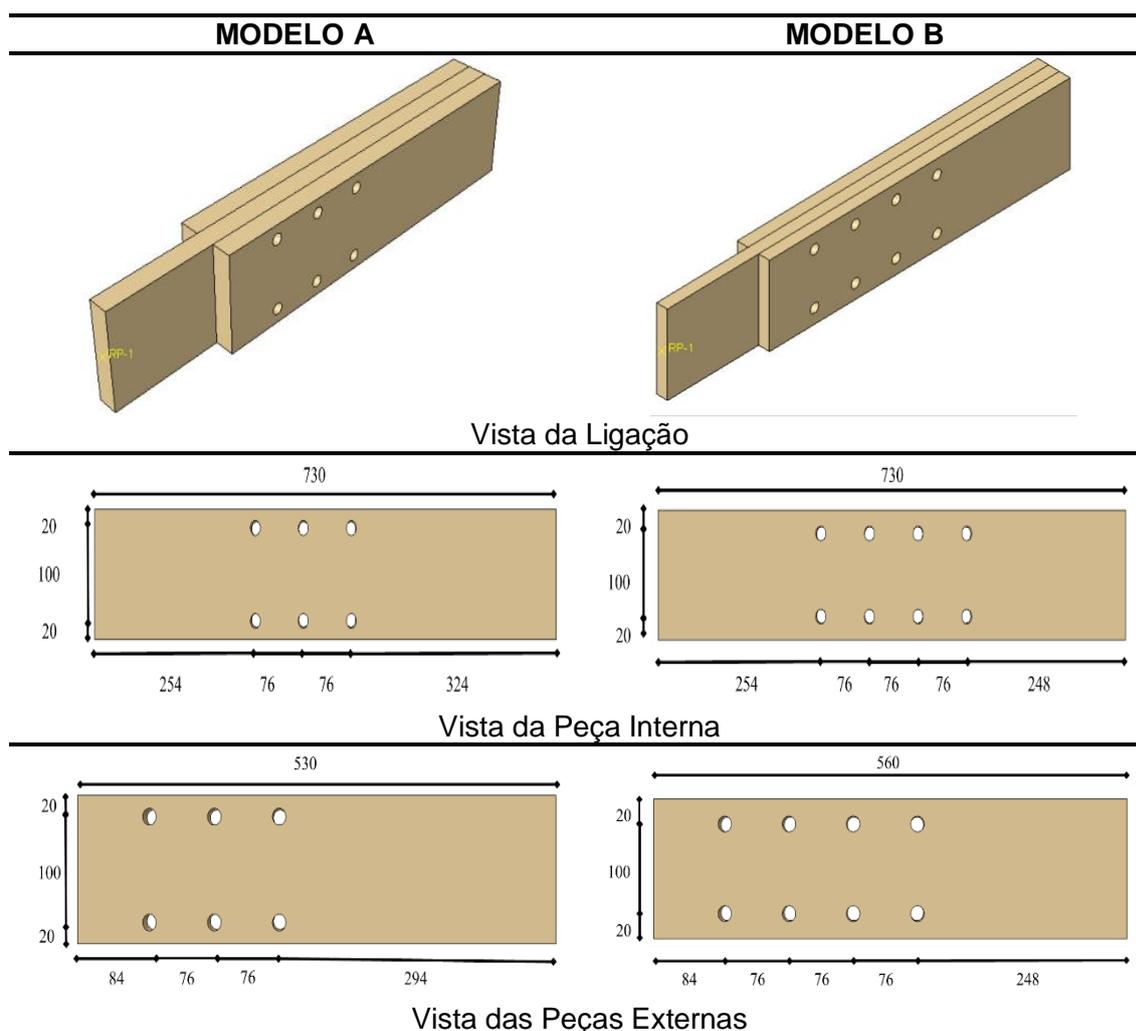
De acordo com Barcarolo (2019) foram idealizados dois protótipos de ligações, com diferença na quantidade de conectores, sendo uma ligação elaborada com 6 conectores e a outra com 8 conectores. As peças que

constituíram as ligações possuíam 20 mm de espessura. Os conectores foram fabricados *in-loco* com resina epoxi e fibra de vidro e apresentavam diâmetro de 10 mm.

Os ensaios foram realizados para ligações submetidas a cisalhamento duplo, e as ligações estudadas eram compostas de 3 peças. Desta forma, os modelos ensaiados e confeccionados com peças de madeira tanto na parte interna quanto nas duas peças externas apresentavam espessura de 20 mm, sendo a ligação possuía espessura total de 60 mm.

As características geométricas e as peças internas e externas que compõem as ligações são apresentadas na Figura 3.2.

**Figura 3.2: Modelos das ligações ensaiadas. Modelo A com 6 conectores, Modelo B com 8 conectores. Medidas em milímetros**



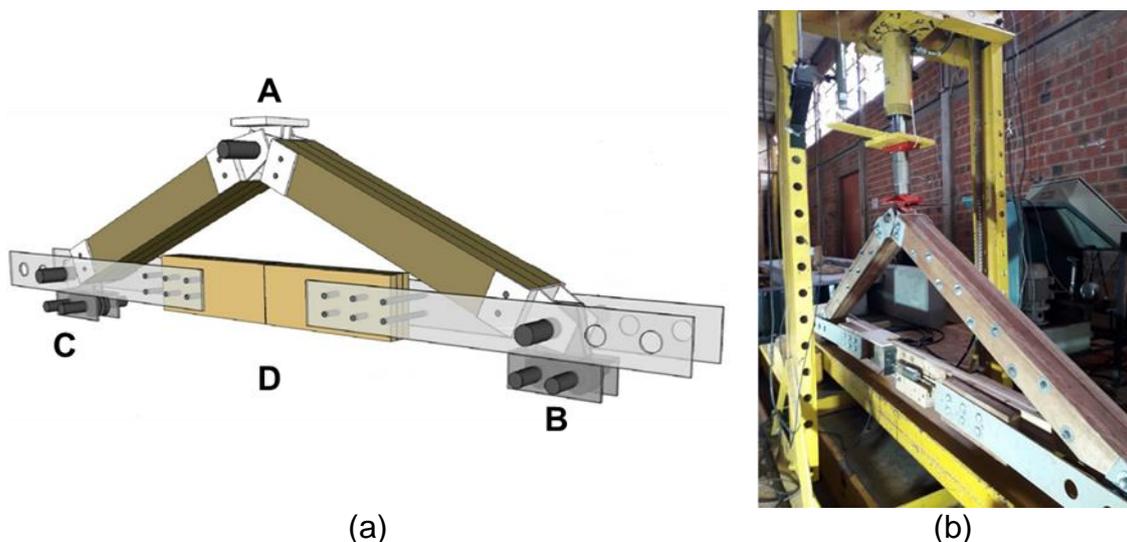
Fonte: Do autor.

### 3.1.2 VALIDAÇÃO DO ENSAIO EXPERIMENTAL

Para a realização do Ensaio à Tração dos protótipos das ligações na pesquisa de Barcarolo (2019) foi utilizado o equipamento idealizado por Recco (2015). O equipamento desenvolvido no Laboratório de Materiais da Universidade Estadual de Londrina é apresentado na Figura 3.3.

Esse equipamento funciona da seguinte forma: no ponto A foi aplicada a força para ensaiar a ligação à tração. Os pontos B e C constituem o apoio da estrutura. No ponto D foram inseridos os protótipos das ligações a serem ensaiadas. As leituras das informações sobre carregamento e deslocamento das estruturas foram realizadas respectivamente nos pontos A e D.

**Figura 3.3: (a) Esquema do equipamento no qual serão ensaiados os protótipos das ligações. (b) Foto do equipamento no laboratório de estruturas da UEL**



(a) (b)  
Fonte: (a) Adaptado de Recco (2015). (b) Barcarolo (2019).

## **3.2 ETAPA NUMÉRICA**

A Etapa Numérica foi realizada com o objetivo de extrapolar as condições experimentais observadas na pesquisa de Barcarolo (2019) na qual realizou os ensaios experimentais com os protótipos da ligação. Essa etapa do processo permite maior rapidez e menor custo nos estudos de comportamento mecânico da estrutura, visto a menor quantidade de material e tempo na fabricação das ligações a serem ensaiadas.

Com base nas informações obtidas durante o Ensaio Experimental dos protótipos das ligações, realizado por Barcarolo (2019), foi desenvolvido um modelo numérico no software Abaqus que representasse esse Ensaio. Após a validação desse modelo gerado, realizou-se um estudo paramétrico com o mesmo software. A partir desses resultados foi proposto um modelo matemático que estimasse a força de ruptura de ligações utilizando-se conectores de GFRP.

Desta forma, serão abordados nesta Seção informações das etapas para a realização da simulação da estrutura no software Abaqus, como: (a) Modelagem dos Elementos (Seção 3.2.1), (b) Propriedades dos Materiais (Seção 3.2.2), (c) Montagem da Ligação (Seção 3.2.3), (d) Configuração das Simulações e Incrementos (Seção 3.2.4), (e) Contato entre os Elementos (Seção 3.2.5), (f) Carregamento e Condições de Contorno (Seção 3.2.6), (g) Elaboração das Malhas e teste de malha (Seção 3.2.7).

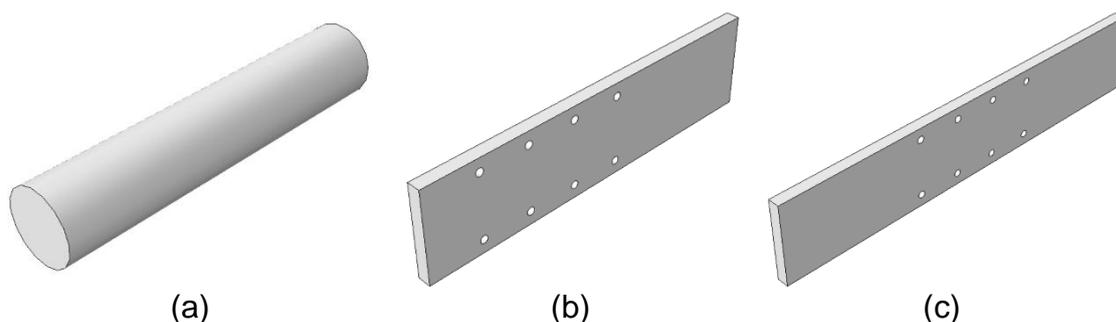
### **3.2.1 MODELAGEM DOS ELEMENTOS**

Os elementos necessários para a simulação do protótipo da ligação foram: peça externa, peça interna e o pino de GFRP. As dimensões das peças internas e externas são apresentadas na Figura 3.2. O diâmetro do pino fabricado por Barcarolo (2019) foi de 10 mm e o comprimento de 60 mm.

Cada peça foi modelada separadamente no software Abaqus. Foram modeladas duas peças de madeira que constituem a ligação estudada e um pino de GFRP. As peças criadas foram do modelos 3-D do tipo deformável, considerado como um sólido obtido por extrusão, conforme utilizado pelos autores Lokuge *et al.* (2021), Ngo *et al.* (2022) e Higgoda *et al.* (2022) nas simulações de ligações de estruturas de madeira utilizando-se o Método de Elementos Finitos.

As medidas utilizadas foram em milímetros, as unidades de carga em Newton, assim os valores obtidos de tensões resultaram em Mpa. Na Figura 3.4 estão apresentadas as peças elaboradas pelo software.

**Figura 3.4: Elementos modelados no Abaqus como software deformados: (a) pino de GFRP, (b) Parte externa da ligação e (c) Parte interna da Ligação**



Fonte: Do autor.

### 3.2.2 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

Cada tipo de material utilizado foi criado e suas propriedades informadas ao software, e associado aos elementos modelados anteriormente. As peças internas e externas foram consideradas das espécies de madeira ensaiadas, os pinos foram considerados com as características referente ao pino fabricado por Barcarolo (2019) e também utilizado por Camargo *et al.* (2023).

As características dos materiais foram idealizadas para uma análise não linear, portanto foram informadas as propriedades elásticas e plásticas de cada material. As informações elásticas para a madeira utilizada na elaboração do modelo numérico, foram as da espécie *Pinus Elliottii* caracterizada por

Barcarolo (2019). Na Tabela 3.1 estão apresentadas as Propriedades Elásticas, e na Tabela 3.2 estão apresentadas as Propriedades Plásticas. Para a madeira as propriedades elásticas foram consideradas como material anisotrópico, considerando os três eixos principais, como: o Módulo de Elasticidade, Coeficiente de Poisson e Módulo de Rigidez Transversal. Informou-se também as características iniciais e finais no Estado Plástico, como, Tensão de Escoamento e Deformação.

**Tabela 3.1: Valores utilizados para as propriedades elásticas da madeira *Pinus Elliottii* na simulação não-linear**

Parâmetro	Valor	Unidade
Módulo de Elasticidade Longitudinal (E1)	6093,67	MPa
Módulo de Elasticidade Longitudinal (E2)	2181,58	MPa
Módulo de Elasticidade Longitudinal (E3)	1123,31	MPa
Coeficiente de Poisson (Nv12)	0,013	Adimensional
Coeficiente de Poisson (Nv13)	0,013	Adimensional
Coeficiente de Poisson (Nv23)	0,013	Adimensional
Módulo de Elasticidade Transversal (G12)	406,24	MPa
Módulo de Elasticidade Transversal (G13)	406,24	MPa
Módulo de Elasticidade Transversal (G23)	406,24	MPa

Fonte: Barcarolo (2019), Camargo *et al.* (2023)

**Tabela 3.2: Valores utilizados para as propriedades plásticas da madeira *Pinus Elliottii* na simulação não-linear**

Parâmetro	Valor	Unidade	Deformação
Resistência sem deformação permanente	70	MPa	0
Resistência última	70,7	MPa	0,0001

Fonte: Barcarolo (2019), Camargo *et al.* (2023)

Por padrão o software Abaqus adota o critério de Von Mises, no entanto ao trabalhar com madeira o critério de ruptura considerado foi o de Hill. Na Tabela 3.3 são apresentados os valores adotados na simulação numérica.

**Tabela 3.3: Valores adotados para o Critério de Hill**

Parâmetro	Valor
R11	1
R22	0,25
R33	0,25
R12	0,25
R13	0,25
R23	0,025

Fonte: Fernandes (2018).

Para os conectores de GFRP as propriedades elásticas foram consideradas como material isotrópico, informando ao software o módulo de Young e o coeficiente de Poisson, conforme apresentado na Tabela 3.4.

**Tabela 3.4: Valores utilizados nas propriedades elásticas da conector de GFRP moldado *in loco* na simulação não-linear**

Parâmetro	Valor	Unidade
Módulo de Elasticidade Longitudinal (E)	61403,5	MPa
Coeficiente de Poisson (Nv)	0,195	Adimensional
Módulo de Elasticidade Transversal (G)	25691,84	MPa

Fonte: Barcarolo (2019), Camargo *et al.* (2023).

Informou-se também as características iniciais e finais no estado plástico da barra de fibra de vidro, como: tensão de escoamento e deformação, como apresentado na Tabela 3.5.

**Tabela 3.5: Valores das propriedades plásticas da do conector de GFRP moldado *in loco* utilizadas na simulação não-linear**

Parâmetro	Valor	Unidade	Deformação
Resistência sem deformação permanente	140	MPa	0
Resistência última	320	MPa	0,0045

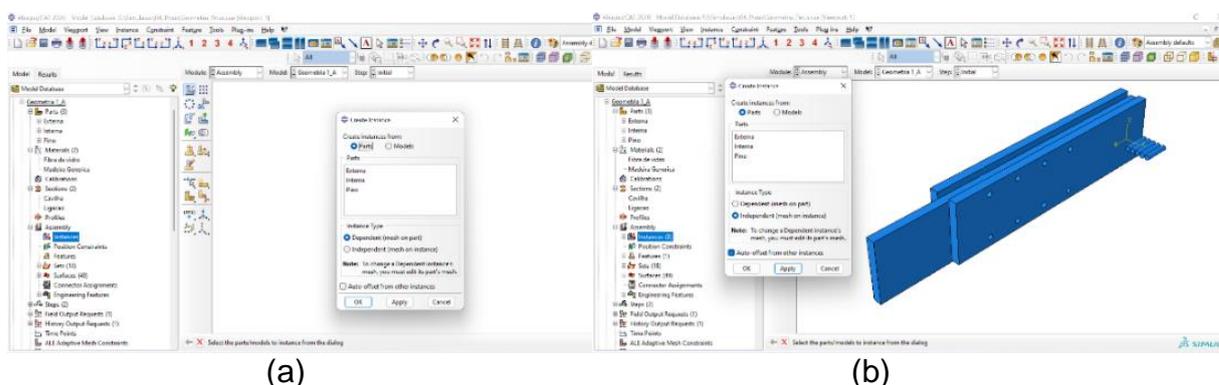
Fonte: Barcarolo (2019), Camargo *et al.* (2023).

Após a inserção das propriedades dos materiais no banco de dados do software foi necessário atribuir essas informações para os elementos modelados. Esse processo foi realizado definindo-se seções aos elementos modelados. Para a peça interna e para as peças externas, que constituem o protótipo da ligação, foram atribuídas as propriedades de material sólido e homogêneo referente a madeira, para o pino foi atribuído as propriedades referentes ao material ao conector de GFRP fabricado *in-loco* considerando também material sólido e homogêneo.

### 3.2.3 MONTAGEM DA LIGAÇÃO

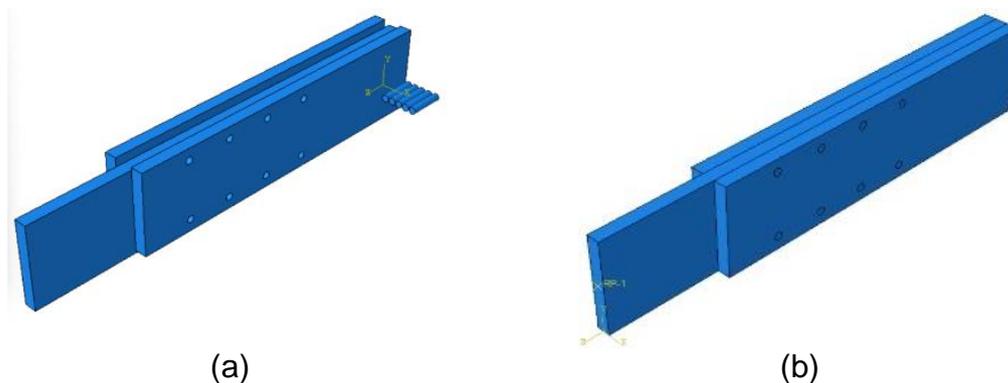
Após a atribuição das propriedades dos materiais nos elementos modelados foi necessário realizar a montagem da ligação. Foi nesse momento que mesmo tendo realizado a modelagem de apenas um elemento da peça interna e externa, e do pino consegue-se criar o protótipo da ligação inserindo a quantidade necessária de cada peça. Na Figura 3.5 é apresentado o modo de inserção das peças para a montagem da ligação. Na Figura 3.6 é apresentada a ligação montada utilizada na etapa experimental

**Figura 3.5: Montagem da ligação no software Abaqus: (a) seleção das peças e (b) peças inseridas da interface de montagem**



Fonte: Do autor.

**Figura 3.6: (a) Todas as peças inseridas na área de montagem; (b) As peças montadas conforme modelo utilizado na etapa experimental**



Fonte: Do autor.

Nessa etapa as peças foram agrupadas como elementos independentes, ou seja, cada componente trabalha individualmente. Esse agrupamento permite que, em etapa futura, a atribuição de malha seja diferenciada conforme cada elemento da estrutura.

### **3.2.4 CONFIGURAÇÃO DA SIMULAÇÃO E INCREMENTOS**

O software Abaqus fornece uma configuração inicial para a simulação numérica. No entanto deve-se criar a configuração para aplicação do carregamento.

Na simulação do Protótipo das Ligações foi criada uma etapa de carregamento, sendo considerada não linear e do tipo estático geral. Após a criação dessa etapa foi elaborada a edição dos incrementos da simulação conforme Ahmad *et al.* (2022). O incremento permite ao software ser informado quantas vezes ele tentará rodar a simulação antes de finalizar o processo. Quanto menores o número de incremento maior é o gasto computacional e de tempo dedicado a simulação.

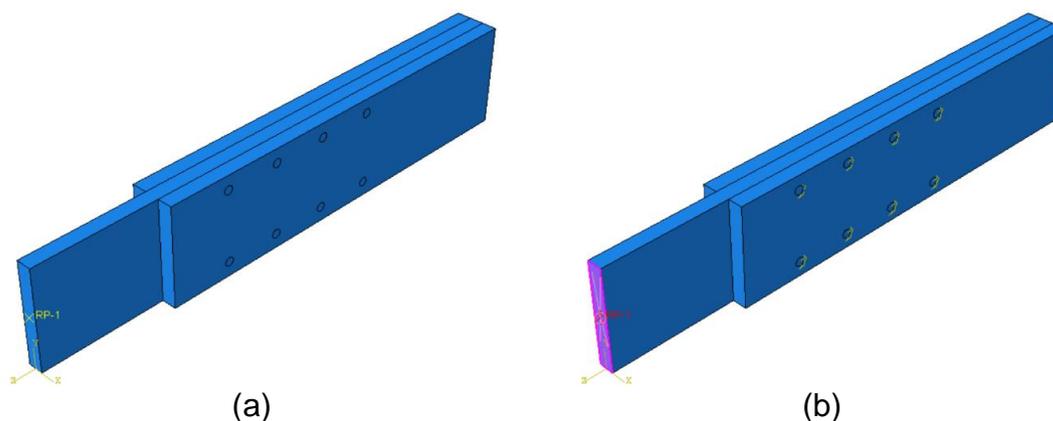
A cada incremento foi aplicado uma parcela de carga ou deslocamento no modelo gerado. O incremento adotado foi do tamanho de 0,001, o incremento mínimo foi de  $10^{-35}$  e o elemento máximo de 0,01. Deste modo, o

software tentará aplicar o carregamento total com no máximo 10000 incrementos, sendo o primeiro incremento de tamanho de 0,01. Caso o incremento seja realizado, a análise é continuada pelo software. Caso contrário, o incremento deve ser reduzido no mínimo de  $10^{-35}$ , se não for possível realizar o incremento, o software acusa um erro, finalizando o processamento.

### 3.2.5 CONTATO ENTRE OS ELEMENTOS

O carregamento aplicado na estrutura foi informado ao software por meio da seleção de um ponto. O ponto para a aplicação foi criado no ponto central da seção transversal da peça interna. Após a criação desse ponto foi necessário informar ao software o tipo de interação. A interação do ponto de aplicação da força e a estrutura foram do tipo “*Coupling*”, como analisadas nos estudos de Fernandes *et al.* (2022) e Vilguts *et al.* (2024) de tal forma que o ponto se apresenta engastado na superfície da seção transversal da peça interna, como apresentado na Figura 3.7.

**Figura 3.7: (a) Inserção do ponto de aplicação da força e (b) distribuição da força sobre a área de aplicação no protótipo da ligação**

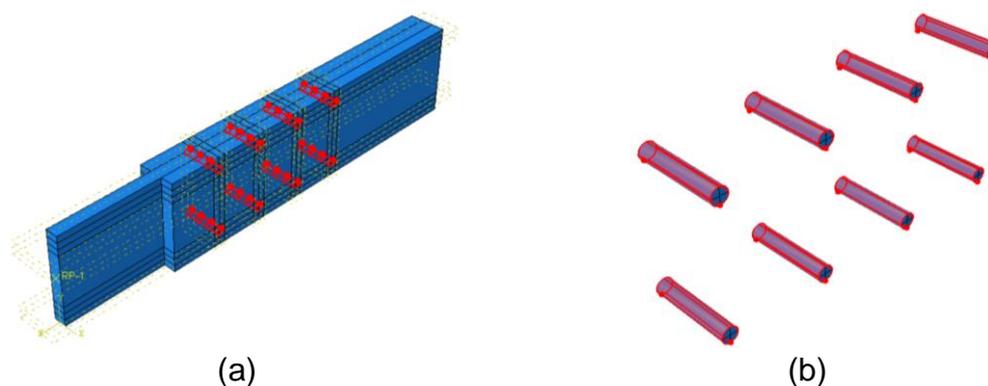


Fonte: Do autor.

Na ligação ensaiada há outros tipos de contato, como as faces da peça interna em contato com as faces das peças externas e as faces dos pinos de

GFRP em contato com as faces dos furos. Para a consideração do contato entre o corpo dos pinos e as faces internas dos furos foram criadas superfícies como apresentado na Figura 3.8.

**Figura 3.8: (a) Interação das barras de GFRP com a estrutura da ligação. (b) inserção do tipo de contato nas barras de GFRP**

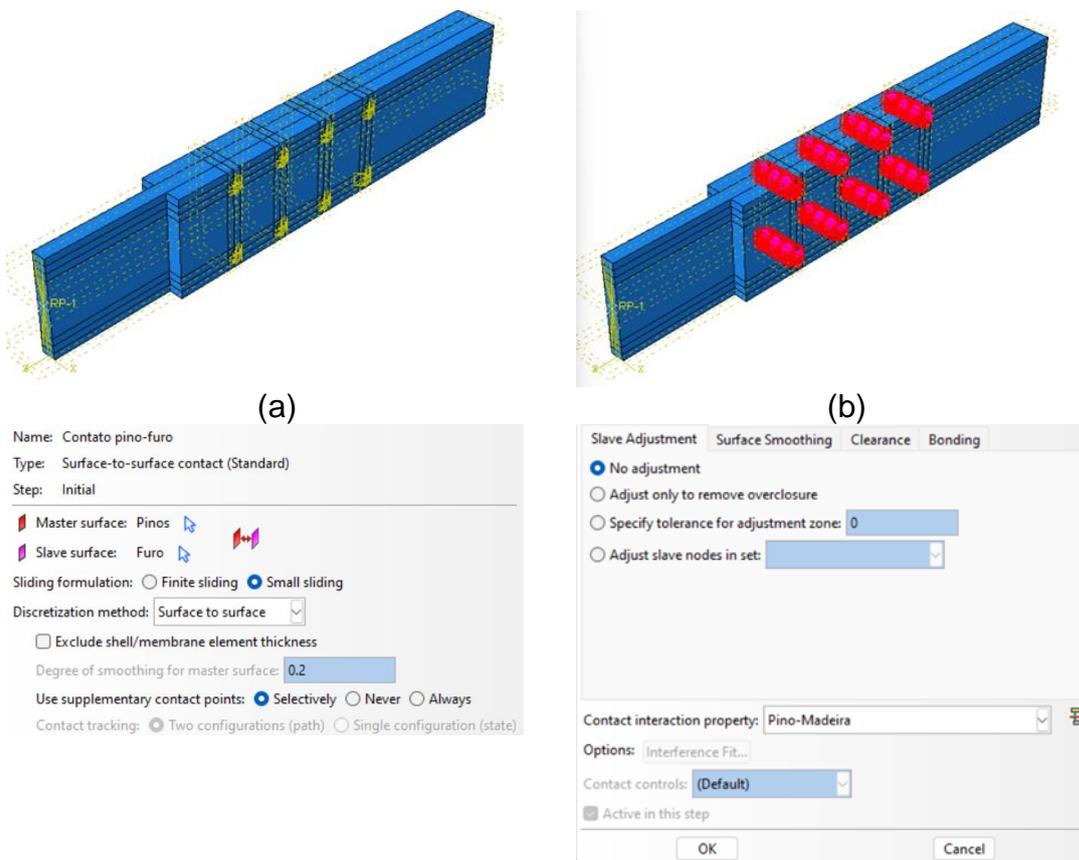


Fonte: Do autor.

Após o processo de criação de superfície, realizou-se a criação dos contatos entre os pinos de fibra de GFRP e o interior dos furos das peças de madeira que contém a ligação. Foi definido a existência de um contato tangencial por atrito e um contato por pressão (“*Hard Contact*”), sendo adotado o atrito de 0,33 conforme apresentado em pesquisas de Basterrecha-Arévalo *et al.* (2021), na qual ensaiaram no software de elementos finitos vigas de madeira reforçadas com barras de GFRP.

Após essa etapa, criou-se a interação entre o pino e o furo por meio do tipo de interação Contato de Superfície (“*Surface-to-Surface*”). De acordo com Basterrecha-Arévalo *et al.* (2022) define-se o pino de fibra de GFRP como superfície principal (*Master*), a mais resistente. A madeira foi considerada o material com menor resistência como superfície secundária (*Slave*), o interior dos furos das peças de madeira. Na Figura 3.9 são apresentadas as interações de contato no software Abaqus e as características adotadas nessa interação.

**Figura 3.9: (a) Interação aplicada na ligação. (b) Interação aplicadas nas barras de GFRP. (c) Critérios informados ao Abaqus sobre as características de contato**



(c)

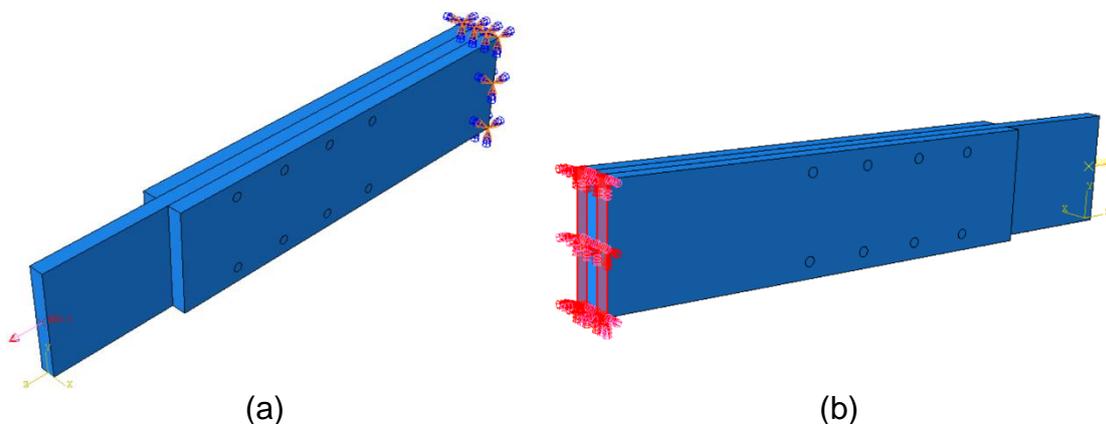
Fonte: Do Autor.

### 3.2.6 CARREGAMENTO E CONDIÇÕES DE CONTORNO

No software a etapa de aplicação do carregamento, pode ser considerada de diversos tipos, tais como: força concentrada, momento, pressão, gravidade entre outras. No protótipo de ligação foi utilizada a aplicação de um deslocamento no ponto RP-1 gerado na etapa anterior. Esse deslocamento aplicado na ligação foi de 5 mm.

As condições de contorno consideradas aplicadas às peças externas devem impedir o deslocamento e a rotação. Os apoios foram inseridos na região da face oposta à face que há a aplicação de força, conforme padrão utilizado por Tapia e Aicher (2023) e Kildashti *et al.* (2021) o qual estudaram ligações em peças compostas de madeira. A configuração de carregamento e condições de contorno são apresentadas na Figura 3.10.

**Figura 3.10: (a) Condições de contorno aplicadas às peças externas do protótipo da ligação (b) Condição de contorno aplicadas apenas às peças externas da ligação**



Fonte: Do autor.

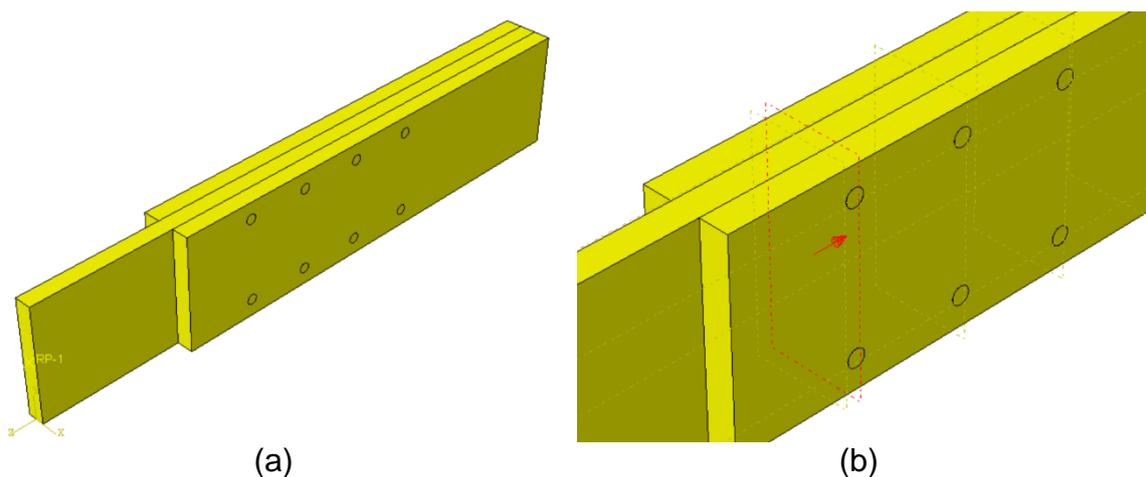
### 3.2.7 ELABORAÇÃO DAS MALHAS E TESTE DE MALHA

A escolha do tipo da malha e o tamanho dos elementos são importantes para a simulação, pois a escolha da malha tem influência no tempo de simulação e na qualidade dos resultados apresentados. Como o protótipo de ligação não é totalmente contínuo foi necessário segmentar a estrutura para melhor análise dos resultados, além disso realizou-se um estudo da influência do tamanho da malha nos resultados das simulações.

Ao finalizar a montagem dos elementos, a inclusão das interações, carregamento e condições de contorno, o software apresenta a estrutura para inserção das malhas. Se o software apresentar a estrutura na cor verde, a mesma já pode ter a malha aplicada, pois é a condição ideal para criá-la. No entanto, se a estrutura é apresentada na cor amarela, laranja, vermelho ou marrom não é possível atribuir a malha de modo imediato devido à complexidade da estrutura, sendo necessário criar planos na estrutura para que os elementos de malha sejam melhor distribuídos. Esses planos são feitos com o auxílio da ferramenta *Datum*, e posteriormente à criação desses realiza-se o particionamento da estrutura para a aplicação das malhas.

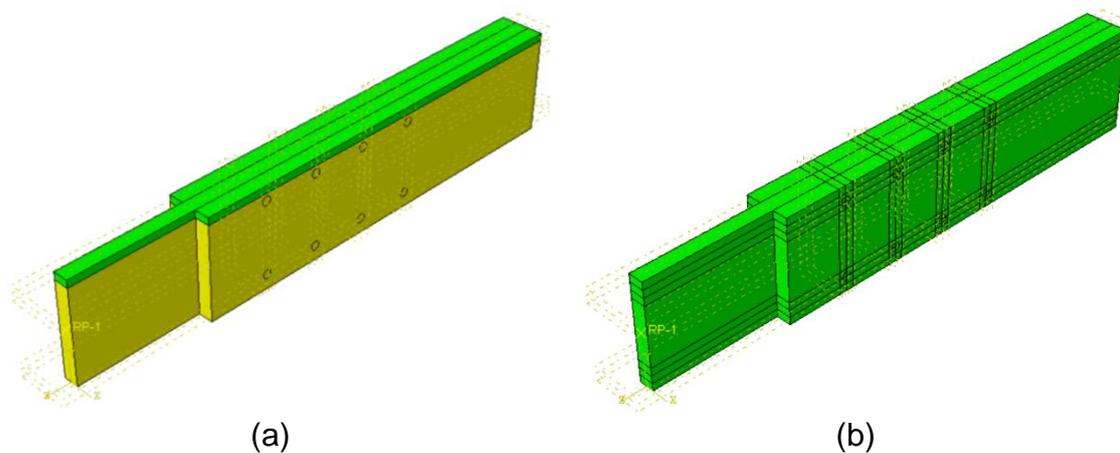
A segmentação do protótipo foi realizada, de tal forma que a estrutura fosse transformada em menos complexa e com o objetivo de refinar a malha próximo às áreas de interesses. Essa segmentação ocorreu nas regiões dos pinos de fibra de GFRP, pois são nesses locais os pontos de interesse para esta pesquisa. A segmentação foi realizada por meio de *Datum*, como apresentado na Figura 3.11 (a) e (b). Na Figura 3.12 (a) iniciou-se o processo de segmentação obtendo-se a coloração verde, para que a aplicação da malha possa ser realizada pelo software. Esse processo de segmentação continua com a inclusão de mais Datum, até que toda a peça esteja verde permitindo a aplicação da malha, Figura 3.12 (b).

**Figura 3.11: (a) Ligaç o montada antes do in cio da aplica o da malha, colora o amarela necessita de segmenta o. (b) Aplica o dos Datum para servir de guia para a segmenta o**



Fonte: Do autor.

**Figura 3.12: (a) In cio da segmenta o. (b) Pe a em condi o de obter a malha**

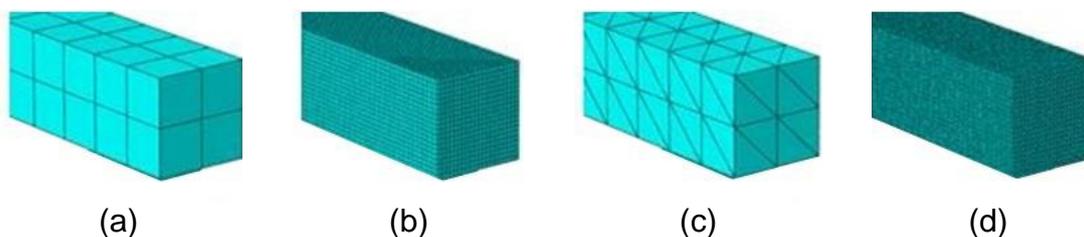


Fonte: Do autor.

O uso de segmentações não interferiu na análise da estrutura como um todo. No entanto, essas segmentações permitem que as regiões de interesse sejam melhores discretizadas, com a adoção de tipos e tamanhos de malhas diferenciados em relação a outros pontos da estrutura utilizada.

Para o teste de malha foram analisados diferentes geometrias e tamanhos de malha para as peças de madeira, com o intuito de verificar a melhor representação da simulação durante o comportamento das ligações. Os tipos de malhas estudadas são apresentados na Figura 3.13, com o maior e o menor tamanho de malhas. Esses valores foram adotados com base na simulação numérica realizado por Wang *et al.* (2019), em que uma malha de 1 mm foi utilizada para os elementos conectores e 10 mm para elementos em madeira.

**Figura 3.13: Malha Hexaédrica de 10 mm (a) e 1mm (b), e Malha Tetraédrica de 10 mm (c) e 1 mm (d) para o teste de malha**



Fonte: Do autor.

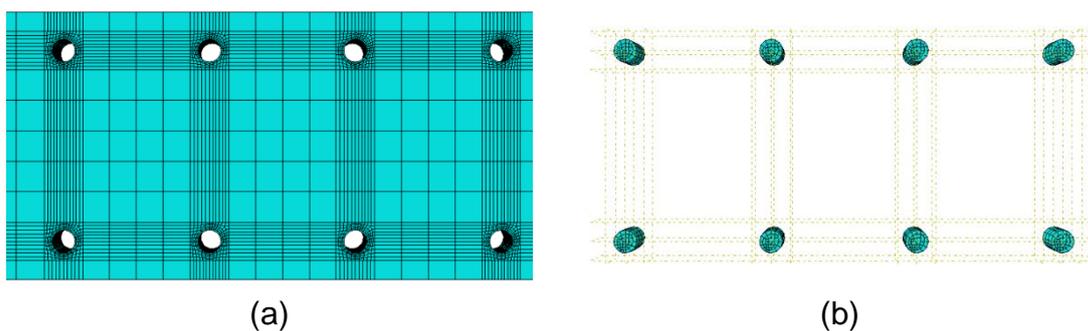
Como forma de obter a melhor malha, a curva força x deslocamento, o tempo de processamento do ensaio experimental com a simulação numérica foram comparados.

A malha deve ser adotada quando esta não afetar os resultados finais conforme apresentados em estudos de Behnam, Kuang e Samali (2018) e Elchalakani *et al.* (2018). Sendo assim, quando os tamanhos de malha obtiverem valores próximos, fica evidente que os resultados não estão sendo afetados e esses tamanhos podem ser adotados como comprovado nos estudos de Korgesaar e Romanoff (2014) e LIU *et al.* (2020).

Para configuração da malha foi necessário determinar o tamanho dos elementos, considerando que há influência na qualidade dos resultados e no

tempo de simulação. O tamanho de malha adotado para as peças de madeira foi de 10 mm. Na região de madeira, próximo aos pinos de fibra de GFRP, o detalhamento foi mais preciso com tamanho de malha de 1 mm. Nos pinos de fibra de GFRP foi utilizado malha de 1 mm de tamanho. As malhas aplicadas nas peças são apresentadas na Figura 3.14.

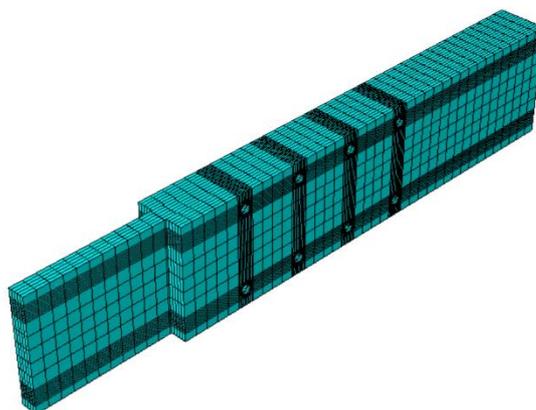
**Figura 3.14: (a) Malhas aplicadas nas regiões de interesse. (b) Malhas aplicadas nos pinos de GFRP.**



Fonte: Do autor.

O padrão de malha utilizado foi a Tetraédrica do tipo C3D8R. Na Figura 3.15 é apresentado toda a ligação com a malha implantada.

**Figura 3.15: Ligação com a malha pré-definida**



Fonte: Do autor.

### 3.3 ETAPA DO ESTUDO PARAMÉTRICO

Nesta seção estão apresentados os parâmetros que serviram de base para o Estudo Paramétrico.

Após a realização da validação do modelo numérico de elementos finitos, iniciou-se a etapa de desenvolvimento do estudo paramétrico com os seguintes critérios:

- Diâmetro dos pinos, elaborado a partir das barras fornecidas pela empresa Stratus: 10 mm, 12,5 mm e 16 mm;
- Quantidade de pinos: 6 e 8;
- Espessuras das ligações: 60 mm e 90 mm;
- Espécies de madeira: Pinus Elliottii (*Pinus elliotii var. elliotii*), Capiúba (*Goupia glabra Aublet*), Garapa (*Apuleia leiocarpa*), Eucalipto Citriodora (*Eucalyptus citriodora*) e Jatobá (*Hymenaea spp*).

Ao todo foram realizadas 60 simulações numéricas para subsidiar a coleta de informações para a realização do estudo paramétrico. Diversas características geométricas da ligação, os diâmetros dos pinos fabricados com barra de fibra de vidro e as espécies de madeira foram analisados com o objetivo de verificar o comportamento da ligação.

As propriedades Elásticas e Plásticas das espécies de madeira utilizadas nas simulações do estudo paramétrico, são apresentadas no Anexo 2. As propriedades Elásticas e Plásticas adotadas para Barra de GFRP foram adotadas conforme informações apresentadas pelo Relatório Técnico fornecido pela empresa Stratus Compostos Estruturais LTDA. (2015) e são apresentadas detalhadamente no Anexo 3.

### 3.4 MODELO DE REGRESSÃO PARA ESTIMATIVA DE FORÇA ÚLTIMA

As informações necessárias para a criação do Modelo de Regressão para a Estimativa de Força Última estão apresentadas nesta seção.

Os parâmetros considerados na construção do modelo de regressão (Equação 3.1) a múltiplas variáveis para a estimativa da força última ( $F_u$ ), obtidos com o auxílio do software Minitab®, versão 18, foram:

- $\sigma \cdot N_c \cdot A_r$ , é o produto da tensão de escoamento Madeira ( $\sigma$ ), pelo número de conectores ( $N_c$ ) pela área da seção transversal do pino ( $A_r$ ), resultando em valores em kN;

- $N_c$ , é o número de conectores (6 e 8), resultando em valores em unidades;

- $H/Esp$ , é a razão entre a Altura da Seção transversal ( $cte=120$ ) pela Espessura da seção transversal (60 ou 90), resultando em valores adimensionais;

- $Esp/\emptyset$ , é a razão entre a Espessura da seção transversal (60 ou 90) pelo Diâmetro conector, resultando em valores adimensionais;

- $E_{fv}/E_{mad}$ , é a razão entre o Módulo de Elasticidade da Fibra de vidro pelo Módulo de Elasticidade da Madeira, resultando em valores adimensionais;

- $(E_{fv}/E_{mad})^2$ , é a razão entre o Módulo de Elasticidade da Fibra de vidro / Módulo de Elasticidade da Madeira elevado ao quadrado, resultando em valores adimensionais.

Na Equação 3.1,  $\beta_i$  consiste nas constantes ajustadas pelo Método dos Mínimos Quadrados e  $\varepsilon$  é o erro aleatório, cabendo destacar que a qualidade do modelo foi avaliada por meio do Coeficiente de Determinação  $R^2$ .

$$F_{rup} = \sigma \cdot N_c \cdot A_r \cdot [\beta_0 + \beta_1 \cdot N_c + \beta_2 H/Esp + \beta_3 \cdot Esp/\emptyset + \beta_4 \cdot E_{fv}/E_{mad} - \beta_5 \cdot (E_{fv}/E_{mad})^2] + \varepsilon \quad (3.1)$$

Foram consideradas (ao nível de 5% de significância) a análise de variância (ANOVA) do modelo de regressão obtido, que, com base no valor-p (probabilidade p), possibilita avaliar a significância (valor-p < 0,05) ou não (valor-p  $\geq$ 0,05) do modelo de regressão. Bem como avaliar a significância e a ordem de significância dos seus termos, o que permite avaliar qual das variáveis mais afeta no valor da estimativa da força última.

Tais resultados (ordem de significância dos termos) foram apresentados por meio do diagrama de Pareto, o qual ordena as frequências das ocorrências dos componentes do modelo, da maior para a menor, permitindo a visualização dos termos que mais representativos para o modelo idealizado. Adicionalmente, o teste de Anderson-Darling foi considerado para avaliar a normalidade na distribuição dos resíduos da ANOVA do modelo de regressão, possibilitando julgar se esses apresentam normalidade (valor-p  $\geq$  0,05). A normalidade dos resíduos foi fundamental para a validação do modelo da análise de variância.

### **3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS A RESPEITO DA METODOLOGIA**

A metodologia adotada nesta pesquisa permite que o trabalho seja desenvolvido de tal forma que os objetivos propostos no Capítulo 1 sejam alcançados.

Foram apresentadas as informações a respeito do uso do software que utiliza da metodologia dos Métodos Elementos Finitos, assim como todas as etapas para a elaboração e posterior simulação numérica. Coletou informações de todas as propriedades necessárias de tal forma que os ensaios realizados por Barcarolo (2019) pudessem ser simulados. Informações a respeito do Critério de Hill foram obtidos em estudos pertinentes a área de simulação numérica em estruturas de madeira.

O Estudo Paramétrico foi detalhado e o método para a elaboração de um Modelo de Regressão a Múltiplas Variáveis foi proposto, assim como os ensaios estatísticos apresentados para verificar a validade da equação.

Com toda a metodologia apresentada e discutida pretende-se chegar aos objetivos desta pesquisa, assim como a realização das análises dos resultados de tal forma que sejam comparados com a literatura existente.

## **4 RESULTADOS**

O Teste de malha foi realizado com o intuito de verificar a melhor malha a ser utilizada no processo de simulação numérica de tal forma que fosse obtida a melhor otimização dos recursos computacionais e tempo de simulação. O modelo numérico construído a partir dos resultados experimentais de Barcarolo (2019) foi validado de tal forma que permitisse a realização de simulações numéricas com espécies de madeira diferentes da inicialmente utilizada e variando as características geométricas da ligação. Dessa forma, foi possível a realização de um estudo paramétrico e a criação do modelo numérico.

Os resultados do Estudo Paramétrico permitiram obter informações para propor um modelo matemático para a estimativa de força de ruptura que considera as características da espécie a partir do módulo de elasticidade, quantidade de conectores da ligação e características geométricas da ligação. O modelo proposto foi analisado e validado estatisticamente, e posteriormente foi comparado com o modelo proposto por Johansen (1949).

Neste Capítulo são apresentados os resultados obtidos durante a realização desta pesquisa. Na Seção 4.1 são apresentados os resultados do Teste de Malha. Na Seção 4.2 são apresentados os resultados obtidos com o Modelo Numérico desenvolvido com base no estudo de Barcarolo (2019). Na Seção 4.3 são apresentados os resultados do Estudo Paramétrico e o Modelo estimativa de força de ruptura proposto. Ao fim de deste capítulo são apresentadas as Considerações Finais a respeito dos resultados

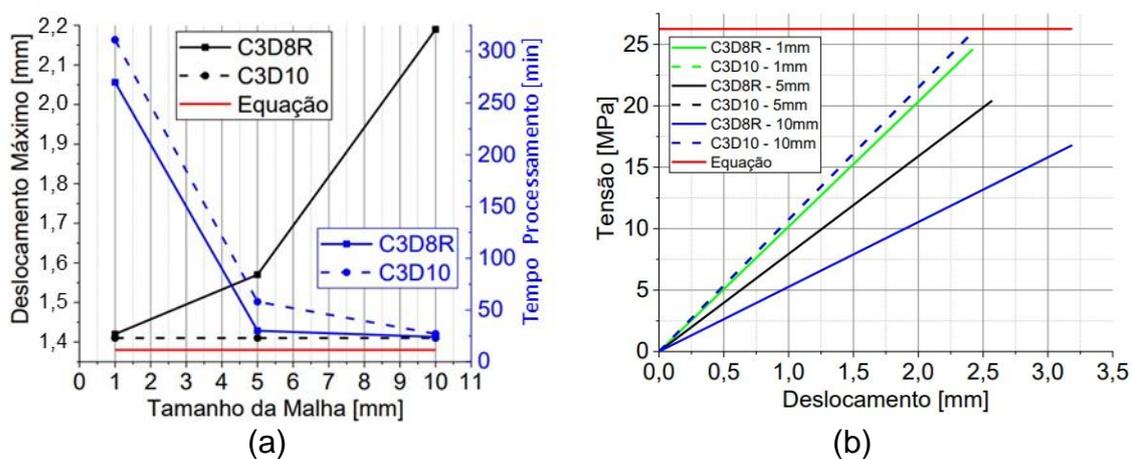
### **4.1 TESTE DE MALHA**

Por meio das equações desenvolvidas por Johansen (1949), verificou-se a força de ruptura estimada para cada tipo de falha. Adotando que a falha

ocorrida se caracteriza pelo embutimento do conector na madeira, estimou-se a força de ruptura a qual a ligação resistia.

Nas simulações para análise do comportamento das malhas nos resultados foi aplicado uma força de 25 kN, e a ligação apresentou uma deformação máxima de 3,35mm, além de uma tensão de tração máxima de 27,25 MPa. Os gráficos (a) e (b), apresentados na Figura 4.1 mostram os resultados das simulações realizadas.

**Figura 4.1: (a) Deslocamento máximo e tempo de processamento obtido nas simulações. (b) Tensão de tração máxima obtida em cada simulação**



Fonte: Do autor.

Os resultados obtidos com a malha hexaédrica não foram positivos para um tamanho de 5 mm e 10 mm, quando comparado com os outros resultados, com um erro aproximado de 10% e 30%, respectivamente. Isso evidencia que a distância entre os elementos finitos altera o resultado, se assemelhando aos resultados apresentados por Ribeiro (2009). Nesse trabalho foi constatado que a densidade da malha aplicada nas simulações em FEM impacta diretamente na qualidade do resultado, sendo que quanto maior o número de pontos na malha, mais próximo das condições reais estão os resultados.

Neste experimento é possível concluir que com o uso de qualquer malha tetraédrica, o erro é de 1,13%, assim como a malha de 1 mm hexaédrica, evidenciando a influência da malha nos resultados obtidos. Dessa forma, pode-

se concluir que a malha tetraédrica foi mais efetiva nos resultados, visto que, com qualquer tamanho de malha, foi obtido resultado satisfatório.

O tempo de processamento para a malha de 1 mm é mais de dez vezes superior quando comparado com a malha de 10 mm, visto que a matriz gerada para resolver a solução é maior quando a malha (distância entre os elementos finitos) é menor (Azevedo, 2003). Além da malha tetraédrica possuir um tempo maior (em torno de 15%) de processamento quando comparada com a hexaédrica, visto que possui maior quantidade de nós (Grisales-noreña *et al.*, 2020).

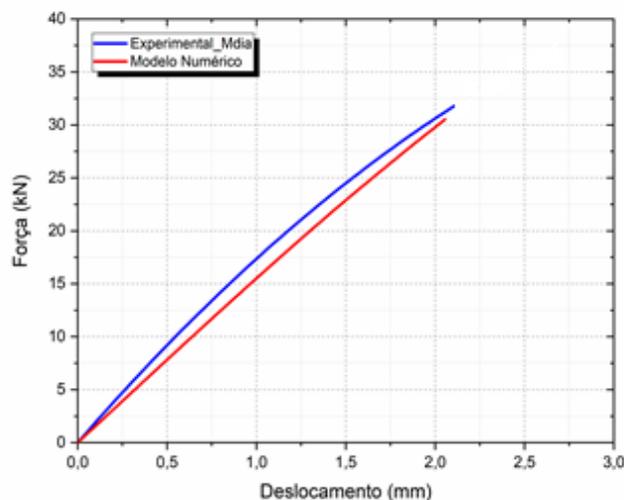
Na análise da tensão máxima de tração da ligação, novamente é possível concluir que a malha tetraédrica apresenta melhores resultados, tendo um erro de apenas 1,30%. Já analisando a malha hexaédrica, o erro foi de 6,67% a 36%, ou seja, mesmo com um tamanho de malha pequeno, o erro foi muito superior quando comparada com qualquer malha tetraédrica. Sendo assim, fica evidente que qualquer malha tetraédrica pode ser adotada neste estudo, visto que o erro foi o mesmo para todos os tamanhos utilizados.

Sendo assim, é possível utilizar uma malha de maior dimensão, com um tempo de processamento relativamente pequeno, e obter o mesmo resultado que uma malha pequena, com um tempo de processamento muito superior.

## **4.2 MODELO NUMÉRICO**

Os resultados obtidos na realização do modelo numérico com base dos valores experimentais encontrados por Barcarolo (2019) são apresentados na Figuras 4.2 por meio do Gráfico de Força versus Deslocamento obtido com o software Abaqus.

**Figura 4.2: Gráfico da curva Força versus Deslocamento obtida nos resultados experimentais de Barcarolo (2019) e o Gráfico da curva Força versus Deslocamento do modelo numérico elaborado**



Fonte: Do autor.

**Tabela 4.1: Comparação entre os valores experimentais e numéricos para força última**

Modelo	Força Máxima (kN)	Deslocamento Máximo (mm)
Experimental	33,20	2,38
Numérico	31,00	2,10

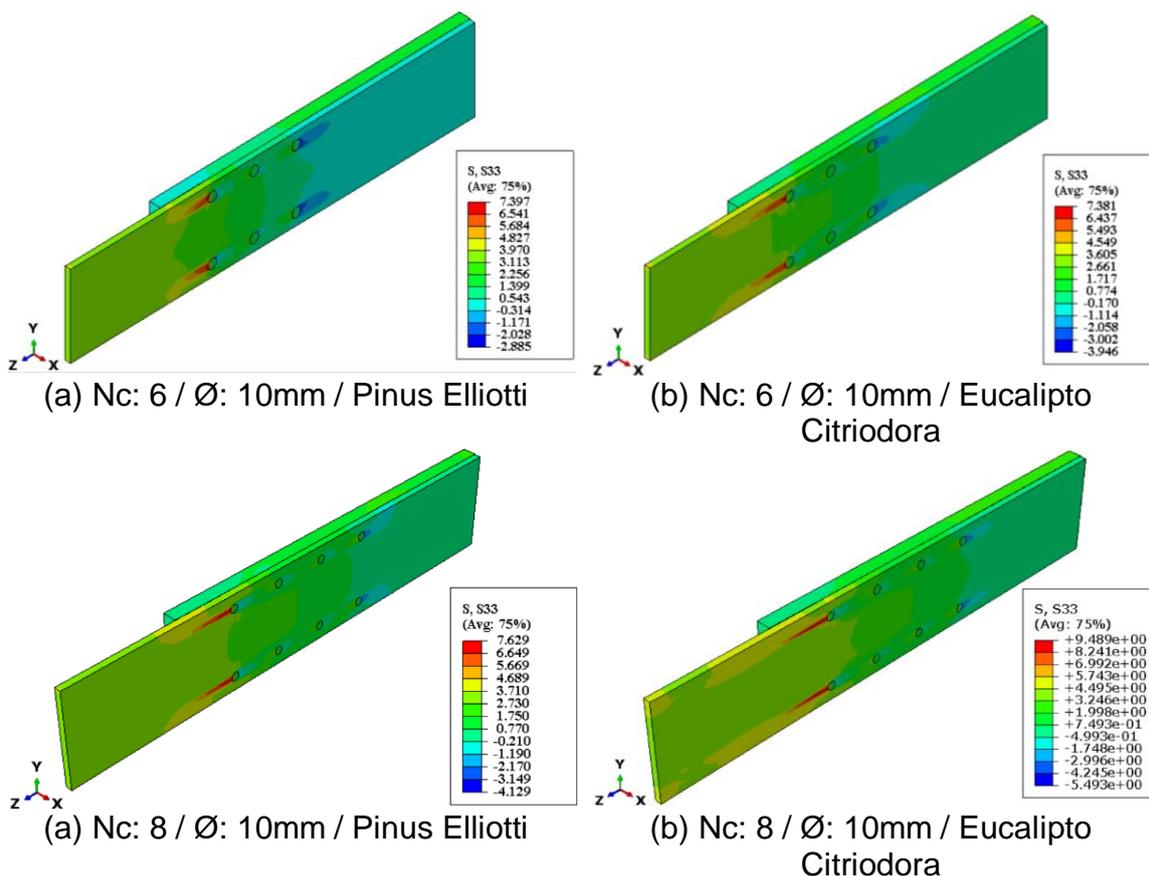
Fonte: Do autor.

Na análise da Figura 4.2, observa-se uma concordância entre os resultados numéricos e experimentais obtidos durante a realização do ensaio não linear. Pode-se observar na Tabela 4.1 que a força máxima experimental é 7% maior que a força máxima numérica. O deslocamento numérico foi de aproximadamente 13% menor que o deslocamento experimental.

Os modelos experimentais apresentaram modo de ruptura na região da primeira fileira de cavilhas, sendo verificado, quando analisado o interior da ligação, o mesmo padrão de ruptura da ligação em todos os ensaios, conforme apresentado na Figura 4.3. Sendo assim, foi possível identificar que as amostras apresentaram um comportamento de ruptura similar, visto que o ponto de embutimento do conector de GFRP ocorreu próximo à borda mais tracionada, comportamento similar aos ensaios de Barcarolo (2019) e aos

resultados analisados por Jelušič e Kravanja (2018) utilizando-se pinos metálicos.

**Figura 4.3: Simulação das diferentes configurações de Modelos de Ligações: (a) modelo A, com diâmetro de 10 mm, com modo de falha embutimento do conector na madeira da ligação sendo (a) espécies *Pinus Elliottii* e (b) *Eucalipto Citriodora***



Os modelos numéricos ensaiados no software Abaqus, quando analisados os modos de falha da ligação, foram constatados que para qualquer ligação seja de 6 ou 8 conectores, independente da espécie de madeira e característica geométrica das ligações, o modo de falha em todos os casos foi o embutimento dos conectores nas peças madeiras. Sendo a primeira fileira de conectores a mais solicitada, conforme apresentado na Figura 4.3. Tal situação também foi observada em pesquisa realizada por Dias *et al.* (2021), que realizaram um estudo experimental com um protótipo de ligação em madeira utilizando as espécies Roxinho (*Peltogyne spp.*) e Marupá (*Simarouba amara*), com 4 conectores metálicos e variando os diâmetros entre 10 e 16 mm. Todas

as peças ensaiadas apresentaram ruptura por meio de embutimento do conector na madeira.

### 4.3 ESTUDO PARAMÉTRICO COM MODELO NUMÉRICO

Considerando as 60 simulações realizadas os conjuntos de resultados são apresentados, considerando ora com o valor da Força de Ruptura ( $F_{rup}$ ) obtido pelo Método dos Elementos Finitos (FEM) ora pela expressão de Johansen (1949). Na Figura 4.4 são apresentados os histogramas de distribuição dos valores das forças de ruptura ( $F_{rup}$ ) obtidos das simulações numéricas via o FEM e do modelo desenvolvido por Johansen.

Os valores máximos e mínimos dos parâmetros utilizados nas simulações numéricas são apresentados na Tabela 4.2.

**Tabela 4.2: Valores máximos e mínimos utilizados para o desenvolvimento do modelo numérico proposto**

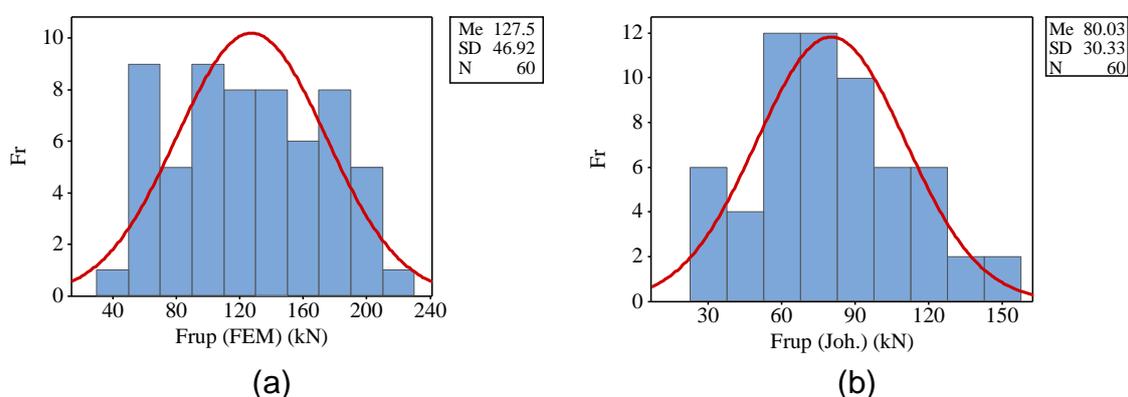
Parâmetro	Unidade	Mínimo	Máximo
$\sigma \cdot N_c \cdot A_r$	MPa·Unid·mm <sup>2</sup>	76,15	600,29
$N_c$	Unidades	6	8
H/Esp	Adimensional	1,33	2
Esp/Ø	Adimensional	3,75	9
$E_{fv}/E_{mad}$	Adimensional	2,03	4,03
$(E_{fv}/E_{mad})^2$	Adimensional	4,13	16,30
Frup FEM	kN	48,37	221,10
Frup Johansen	kN	25,56	142,76

Fonte: Do autor.

Na Figura 4.4 estão sintetizados os resultados das 60 simulações, tanto para o FEM quanto para o modelo proposto por Johansen. Nota-se que o valor médio da  $F_{rup}$  da simulação é de 127,5 kN, e o valor médio obtido pelo método

de Johansen é de 80,03 kN. Desse modo pode-se verificar que o valor apresentado pelo FEM quando comparado com os valores obtidos pela formulação de Johansen é 59,32% superior. A adoção da formulação de Johansen por modelos normativos é considerado favorável visto que a mesma é conservadora e trabalha a favor da segurança.

**Figura 4.4: Histogramas da distribuição dos valores da Força de Ruptura ( $F_{rup}$ ) obtidos: (a) nas simulações numéricas e (b) utilizando-se a formulação de Johansen**



Fonte: Do autor.

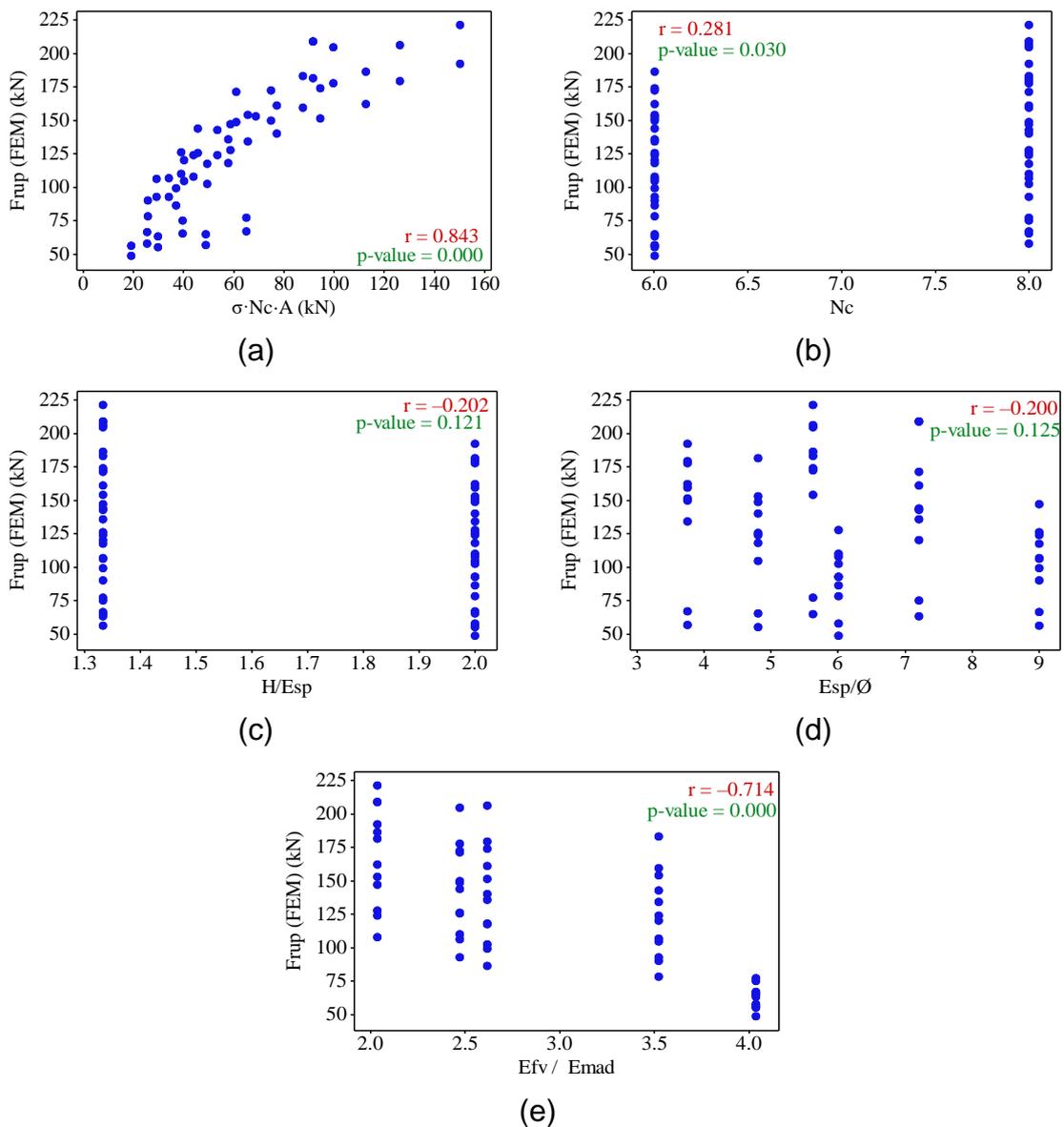
Destaca-se ainda que Szucs *et al.* (2015) analisaram o comportamento de força de ruptura em estruturas de madeira e verificaram que para a mesmas propriedades do material tanto para o método analítico quanto no FEM, as diferenças na carga de ruptura foram relevantes. Os autores justificam que os modelos analíticos são mais imprecisos que as simulações em FEM, visto que buscam representar o comportamento mecânico dos conjuntos com base em análises estatísticas provenientes de ensaios experimentais. A extrapolação dos resultados experimentais obtidos para alimentar as fórmulas analíticas são condicionados por coeficientes de majoração e minoração, a fim de manter a segurança estrutural dos sistemas.

Dorn *et al.* (2013) afirmam que as equações matemáticas utilizadas nos documentos normativos apresentam quantidade significativa de simplificações. Wilkinson e Augarde (2022) constataram que as ligações com pinos metálicos são comuns em estruturas de madeira, no entanto, os códigos normativos

atuais utilizados nos seu dimensionamento são amplamente baseados no empirismo e são simplificados, inibindo o uso otimizado de conexões.

Antes de apresentar o Modelo de Regressão Múltipla de tal forma que correlacione a força de ruptura com características geométricas e mecânicas da ligação, na Figura 4.5, são apresentados os gráficos que representam como as variáveis independentes do modelo de regressão influenciam isoladamente a força de ruptura da ligação.

**Figura 4.5: Gráficos de correlação ( $r$ ) entre os valores das forças de ruptura obtidos das simulações e as demais variáveis independentes consideradas**



Fonte: Do autor.

Na Figura 4.5 são apresentados os resultados das análises de correlação ( $r$  de Pearson:  $-1 \leq r \leq 1$ ) da força de ruptura (variável dependente) com as demais variáveis livres consideradas na geração do modelo de regressão múltipla, com o propósito de identificar correlação isolada das entre as variáveis independentes e a  $F_{rup}$ .

Analisando-se a correlação existente entre a Força de Ruptura obtido pelo FEM e a variável que associa a Tensão de Escoamento da Madeira ( $\sigma$ ), o Número de Conectores ( $N_c$ ) e a Área da Seção Transversal do Conector ( $A_r$ ), nota-se forte correlação (Figura 4.5 (a)). Pois,  $r$  de Pearson apresenta-se positivo e próximo a 1, sendo a maior correlação entre as variáveis confrontadas, o que significa que quando aumenta os valores da variável em questão ( $\sigma \cdot N_c \cdot A_r$ ) os valores obtidos de Força de Ruptura pelo FEM também aumentam. Ao analisar estatisticamente o valor P, observa-se que a correlação é considerada significativa pela análise de variância (ANOVA), pois o valor-p é inferior ao nível de significância de 5%.

Comparando a correlação existente entre a Força de Ruptura ( $F_{rup}$ ) obtido pelo FEM e a variável que associa a quantidade de Número de Conectores ( $N_c$ ), representada pela Figura 4.5 (b), é apresentado a existência de somente 2 níveis que não estão diluídos no espaço entre 6 e 8 conectores, mas sim concentrados nos dois valores de Número de Conectores ( $N_c$ ) utilizados. Nota-se assim, a dificuldade de obter uma correlação entre a variável Número de Conectores e o valor obtido da Força de Ruptura pelo FEM, explicitado pelo valor de  $r$ -Pearson de 0,281. No entanto, analisando o valor-p para a correlação entre Número de Conectores e Força de Ruptura, observa-se que a correlação é considerada significativa pela análise de variância (ANOVA), pois o valor-p é de 0,030, inferior ao nível de significância adotado de 5%. Dessa forma, a Força de Ruptura é de fato influenciada em função do número de conectores.

Quando se compara a correlação existente entre a Força de Ruptura obtido pelo FEM e a variável que associa a razão entre Altura da Ligação e Espessura da ligação ( $H/Esp$ ), Figura 4.5 (c), não foi notado correlação de Pearson entre os parâmetros. Além disso, a correlação não é considerada

significativa pela análise de variância (ANOVA), pois o valor-p é de 0,121, sendo superior ao nível de significância adotado de 5%. O mesmo comportamento de r-Pearson e P-valor, também, é verificado ao analisar o comportamento da variável da razão entre Espessura e Diâmetro (Esp/ Ø), Figura 4.5 (d), pois o valor-p também é superior a 5%.

Analisando-se a correlação existente entre a razão do Módulo de Elasticidade da Fibra de Vidro ( $E_{fv}$ ) e o Módulo de Elasticidade da Madeira ( $E_{mad}$ ), representada pela Figura 4.5 (e), à medida que é aumentada a razão entre os módulos de elasticidade da Fibra de Vidro e da Madeira diminui a força de ruptura, com um r de Pearson de menos 0,714. A correlação considerada significativa pela análise de variância (ANOVA), pois o valor-p é inferior ao nível de significância adotado 5%.

A análise dos componentes do modelo matemático a ser proposto é de extrema importância, pois Milch *et al.* (2017) e Yurrita; Cabrero; Quenneville (2019) afirmam que estudos experimentais de conexões permitem verificar as diferenças nos resultados encontrados devido a essas simplificações em modelos analíticos. Lathuillière *et al.* (2015;) afirmam que os modelos analíticos propostos em documentos normativos foram simplificados, pois a madeira além de ser um material, ortotrópico, as suas propriedades mecânicas se diferenciam entre as espécies.

Com o auxílio da análise de variância (5% de significância), foi possível excluir os termos do modelo quadrático de regressão múltipla considerados não significativos, o que resultou na Equação 4.1, em que o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) obtido foi superior a 75%.

$$F_{rup}^{(reg.)} \text{ (kN)} = \sigma \cdot N_c \cdot A_r \cdot [-5.08 - 0.1216 \cdot N_c + 0.873 \cdot H/Esp + 0.3689 \cdot Esp/\varnothing + 3.180 \cdot E_{fv}/E_{mad} - 0.530 \cdot (E_{fv}/E_{mad})^2] ; R^2 = 75.64\% \quad (4.1)$$

Para a utilização do modelo proposto, é apresentado na Tabela 4.3 o domínio de validade do modelo de regressão, assim como as unidades utilizadas para cada componente da equação.

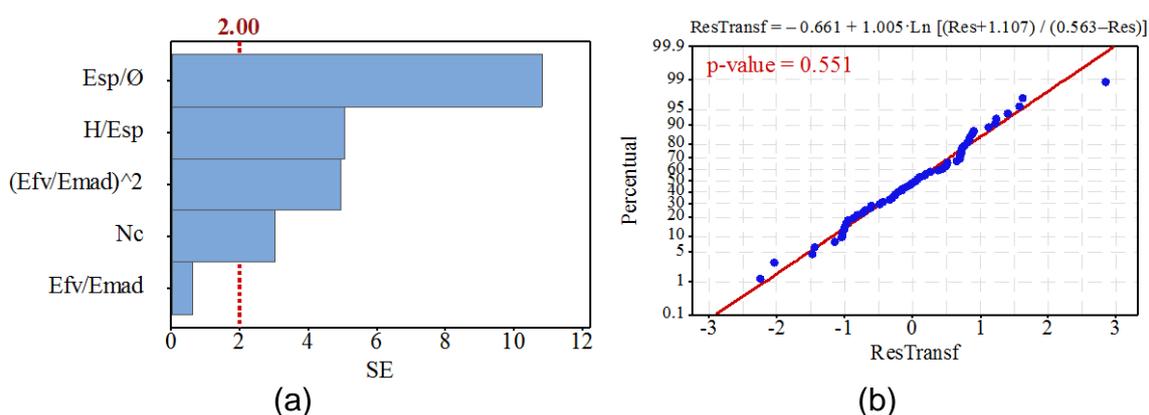
Tabela 4.3: Valores do domínio do modelo de regressão proposto

Parâmetro	Unidade	Mínimo	Máximo
$\sigma$	MPa	40,4	93,3
Nc	Unidade	6	8
$A_r$	mm <sup>2</sup>	78,54	201,06
H	mm	120	120
Esp	mm	60	90
$\emptyset$	mm	10	16
$E_{fv}$	MPa	48000	48000
$E_{mad}$	MPa	1123,31	16253,25

Fonte: Do autor.

Na Figura 4.6 (a) é apresentado o gráfico de Pareto o qual identifica a ordem de significância dos termos do modelo hierárquico. Na Figura 4.6 (b) é apresentado o resultado do teste de normalidade (teste de Anderson-Darling – 5% de significância) dos resíduos da ANOVA do modelo de regressão.

Figura 4.6: (a) Gráfico de Pareto do modelo de regressão e (b) Gráfico de probabilidade normal dos resíduos da ANOVA



Fonte: Do autor.

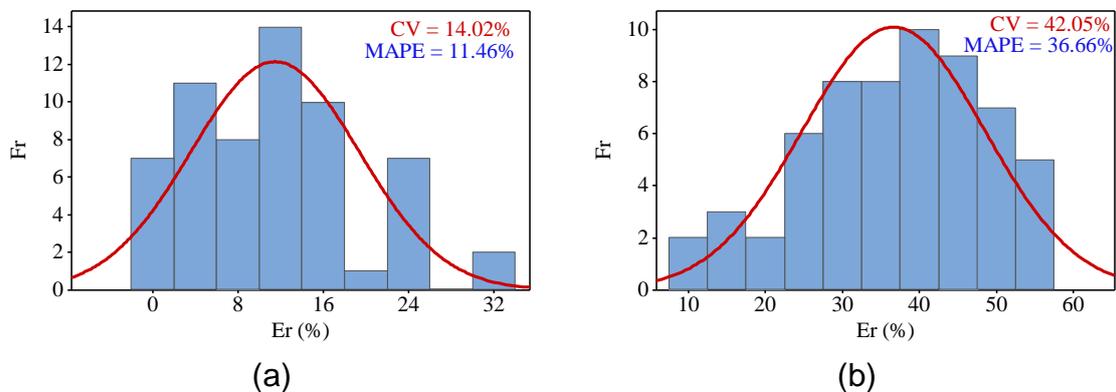
O Gráfico de Pareto, na Figura 4.6 (a), apresenta as variáveis utilizadas na elaboração do modelo proposto para estimativa da Força de Ruptura. Todos os componentes posicionados à direita da Linha de Pareto (linha pontilhada) possuem contribuição significativa no resultado da Força de Ruptura. Dessa

forma, o parâmetro que mais influência na Força de Ruptura estimado pelo modelo é a razão entre Espessura e Diâmetro ( $Esp/\emptyset$ ), e na sequência são os parâmetros: razão entre Altura e Espessura ( $H/Esp$ ), seguidos do quadrado da razão entre Módulos Elasticidade da Fibra de Vidro pelo módulo de Elasticidade da madeira ( $[E_{fv}/E_{mad}]^2$ ) e por último o Número de Conectores ( $N_c$ ). Vale ressaltar que a razão entre os módulos de elasticidade da fibra de vidro pelo módulo de elasticidade da madeira ( $E_{fv}/E_{mad}$ ) não foi considerada significativa pela ANOVA. No entanto são consideradas no modelo, pois há a necessidade de seguir a hierarquia dos modelos. Dessa forma, como o quadrado da razão dos módulos é significativo sendo considerada na elaboração do modelo de regressão proposto.

Na Figura 4.6 (b) o gráfico apresenta os pressupostos da análise de variância, de tal forma que os resíduos da análise de variância apresentam distribuição normal. Para um nível de 5% de significância, com base no teste de normalidade de Anderson-Darling, se o valor-p encontrado for maior que 5% de significância, a hipótese nula para a normalidade é que há normalidade na distribuição dos resíduos o que valida os resultados da significância ANOVA.

Na Figura 4.7 (a) são apresentados os histogramas de frequência da distribuição dos erros associados na estimativa da força de ruptura pelo Modelo de Regressão e também pela formulação de Johansen. Além do Erro, outros parâmetros utilizados são o Coeficiente de Variação (CV) e o Erro Percentual Absoluto Médio (MAPE). Esses valores de CV e MAPE são obtidos a partir dos modelos calculados com o uso das Equações 4.2 e 4.3, em que  $Y^*_i$  consiste no valor estimado da força de ruptura (pelo Modelo de Regressão e pela formulação de Johansen),  $Y_i$  é o valor da Força de Ruptura obtido pela simulação numérica,  $Y_m$  é o Valor Médio da Força de Ruptura também obtido das simulações e  $N$  (60) é o número total de simulações efetuadas.

**Figura 4.7: (a) Histogramas da distribuição dos erros gerados pelo uso do modelo de regressão múltipla e (b) pela formulação de Johansen na estimativa da força de ruptura (Frup)**



Fonte: Do autor.

$$CV(\%) = 100 \cdot \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y^*_i - Y_i)^2}{N}}}{Y_m} \quad (4.2)$$

$$MAPE = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \left| \frac{\tilde{Y}_i - Y_i}{Y_i} \right| \cdot 100 \quad (4.3)$$

Analisando-se a Figura 4.7 (a), verifica-se a existência dos erros percentuais tanto no Modelo de Regressão proposto quanto no modelo de Johansen. Para os valores obtidos a partir do modelo proposto pela pesquisa no espaço amostral das 60 simulações a força de ruptura estimada, em 51 simulações (85%) resultaram em um erro inferior a 20%.

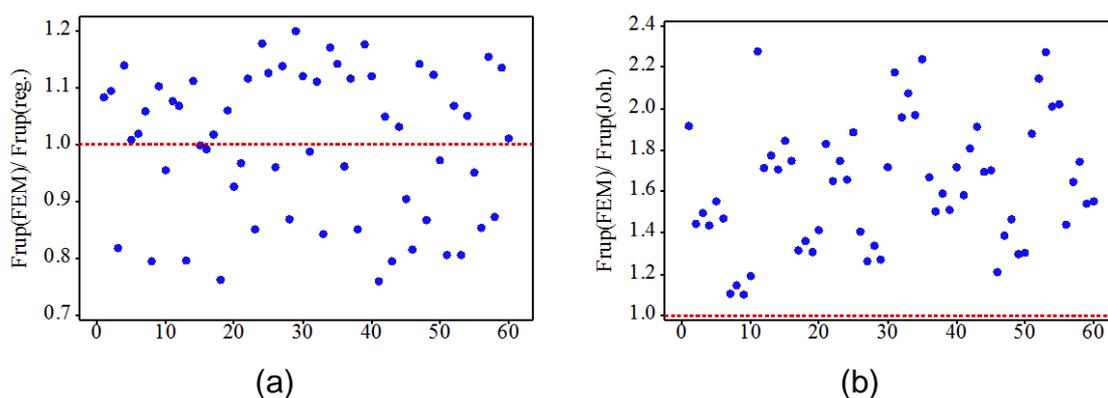
Analisando-se os dados apresentados obtidos por meio do modelo de Johansen, Figura 4.7 (b), no espaço amostral considerado nesse trabalho, com 60 situações, a estimativa da força de ruptura em 7 (12%) resultaram em um erro inferior a 20%. Em 53 estimativas, corresponderam a 88%, o erro apresentado foi superior a 20%.

Evidencia-se assim que o modelo proposto para estimativa da força de ruptura está coerente com os dados obtidos pelo FEM e, que os valores obtidos pelo modelo de Johansen (1949) apresentaram a característica de serem conservadores.

Os valores do Coeficiente de Variação (CV) e o Erro Percentual Absoluto Médio (MAPE) para o modelo de regressão proposto são de 14,02% e de 11,46%, respectivamente. Para o modelo de Johansen o valor do Coeficiente de Variação é 42,05% e o MAPE é de 36,66%. Maior coeficiente de variação representa que os dados obtidos estão mais dispersos em torno da média. Os valores obtidos nesta pesquisa corroboram com a validação de modelos matemáticos mais precisos do que os existentes em modelos analíticos presentes nas normas, para o dimensionamento de ligações considerando diferentes tipos de falha como apontado por Yurrita e Cabrero (2020a) e El Houjeyri *et al.* (2021).

Na Figura 4.8 são ilustrados os gráficos das razões entre os valores da força de ruptura obtidos da simulação, os valores obtidos pelo modelo de regressão e pela formulação de Johansen. A utilização da razão foi necessária com o propósito de verificar se os resultados estimados por ambas as abordagens são ou não a favor da segurança da estrutura.

**Figura 4.8: (a) Razão entre os valores da força de ruptura obtidos pela simulação numérica [Frup(FEM)] e pelo modelo de regressão [Frup(FEM)/ Frup(reg.)] e (b) Razão entre a simulação numérica e o modelo de Johansen [Frup(FEM)/ Frup(Joh.)]**



Fonte: Do autor.

Na Figura 4.8 (a) está representada a Força de Ruptura obtida pela aplicação do FEM dividido pela Força de Ruptura obtida pelo modelo de regressão para os 60 valores. O quociente resultou em uma nuvem de pontos, de tal forma que em 33 ocasiões a Força de Ruptura obtida pela aplicação do

FEM foi superior a Força de Ruptura obtida pelo Modelo de Regressão. Os resultados representando 55% do total evidenciam que o modelo gerado não é caracterizado como um modelo estimador de força de ruptura extremamente conservador. Pois, a razão Força de Ruptura obtida pelo FEM dividido pela Força de Ruptura obtida pelo modelo de regressão foi superior a 1 em 55% apresentam comportamento a favor da segurança.

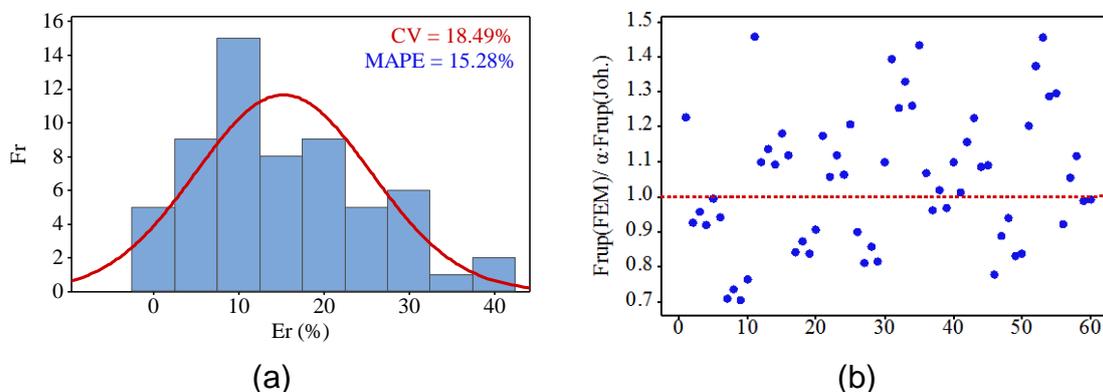
Na Figura 4.8 (b) está representada a Força de Ruptura obtida pelo FEM dividida pela Força de Ruptura obtida pelo modelo de Johansen. Na nuvem de pontos todos os 60 valores apresentam valores superior a 1,0, corroborando para que o modelo de Johansen seja caracterizado como um modelo extremamente conservador. No entanto, ao verificar que 17 resultados (28%) apresentam valores superiores a 1,8 evidencia-se que a formulação de Johansen é extremamente a favor da segurança.

A Equação 4.4 foi utilizada de maneira a estabelecer, via o Método dos Mínimos Quadrados, um coeficiente  $\alpha$  que melhor aproxima os valores da força de ruptura obtidos pela formulação de Johansen com os valores da  $F_{rup}$  obtidos nas simulações numéricas. Como apresentado na Figura 4.9 (b) em algumas situações o quociente entre a Força de Ruptura obtida pelo FEM dividido pela Força de Ruptura obtida pelo modelo de Johansen é superior a 1,8.

$$f(\alpha) = \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^{60} \left( F_{rup}^{(FEM)}_i - \alpha \cdot F_{rup}^{(Joh.)} \right)^2 \quad (4.4)$$

A minimização da Equação 4.4 resultou no valor de  $\alpha = 1,56$ , ou seja, os valores da força de ruptura obtidos pela formulação de Johansen devem ser multiplicados por um coeficiente de 1,56 para que esses resultados se aproximem mais dos obtidos pelas simulações numéricas. Considerando esse coeficiente, o histograma do erro e a razão entre a força de ruptura obtida numericamente e a força de ruptura do modelo de Johansen ajustada pelo coeficiente  $\alpha$  [ $F_{rup}^{(FEM)} / \alpha \cdot F_{rup}^{(Joh.)}$ ] são apresentados na Figura 4.9. Tal mecanismo é proposto com o intuito de realizar uma correção na equação desenvolvida por Johansen em 1949.

**Figura 4.9: (a) Histograma do erro e razão entre os valores da força de ruptura obtidos pela simulação numérica [ $F_{rup}^{(FEM)}$ ] e (b) Razão entre a simulação numérica e o modelo de Johansen ajustado pelo coeficiente  $\alpha = 1,56$  [ $F_{rup}^{(FEM)}/\alpha \cdot F_{rup}^{(Joh.)}$ ].**



Com o objetivo de ser menos conservador com a do modelo Johansen utilizou-se o Método dos Mínimos Quadrados para obter o coeficiente  $\alpha=1,56$  a fim de parametrizar os valores encontrados anteriormente de tal forma que, quando o parâmetro alfa fosse utilizado nos valores de Johansen os valores obtidos sejam mais próximos aos encontrados nas simulações numéricas.

Quando analisados os dados apresentados pela correção utilizando o Método dos Mínimos Quadrados para o modelo proposto por Johansen, Figura 4.9 (a), no espaço amostral das 60 situações da estimativa da força de ruptura, em 36 (60% do total) o erro resultante foi inferior a 20. Ressalta-se também que os valores encontrados foram de 18,49% respectivamente, em relação aos valores encontrados pelo FEM.

Na Figura 4.9 (b) pode-se notar uma melhor distribuição dos valores da Força de Ruptura da razão dos valores do FEM pela Força de Ruptura para o modelo de Johansen ajustado pelo método dos Mínimos Quadrados. Na nuvem de pontos apresentada todos os 34 valores são superiores a 1,0. Dessa forma, caso se queria utilizar a equação normativa de Johansen, presente na Norma Brasileira e em outros documentos normativos, pode-se multiplicar o valor de força encontrado pelo fator 1,56 obtendo-se resultados mais próximos ao encontrados pelo modelo de regressão proposto.

Conhecidos todos os coeficientes de segurança existentes no dimensionamento de um projeto de estruturas utilizando a equação de Johansen, estima-se que a ligação de cisalhamento puro, usada nesta tese, suporta uma carga de 50% a mais do que é estimado no modelo ou equação de Johansen. No entanto, outros trabalhos devem ser desenvolvidos com o objetivo de analisar maior quantidade de espécies de madeira de modo a verificar se o comportamento encontrado neste trabalho pode ser extrapolado a maior quantidade de espécies de madeira conhecidas.

Ao analisar o comportamento do modelo proposto por Johansen (1949) o qual foi desenvolvido para a estimativa de força última de ligações com conectores metálicos em estruturas de madeira nota-se a característica de ser extremamente conservador nos resultados, conforme apontado por Dorn *et al.* (2013) e Wilkinson e Augarde (2022). Essa característica não coincide com as características do material adotado para o conector usado nesse trabalho, pois o aço se caracteriza como um material um material dúctil, de alta resistência e possui patamar de escoamento.

A proposta de um modelo matemático para estimativa de força última para conexões que utilizam conectores fabricados de barras de fibra de vidro, cujo material se caracteriza como sendo um material frágil e de alta resistência apresenta a possibilidade de utilização em conexões em estruturas de madeira.

#### **4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS A RESPEITO DOS RESULTADOS**

Os resultados encontrados a partir da metodologia proposta subsidiaram a análise de resultados de tal forma que permitiu alcançar os objetivos propostos.

O modelo de regressão para a estimativa da força última proposto permitiu a comparação dos valores com o modelo de Johansen. A análise dos valores gerados contribuiu para alcançar os objetivos propostos nesta pesquisa.

Verificou-se que o modelo proposto apresenta coeficiente de correlação maior que 70% permitindo a sua utilização para verificar a força última da ligação. No entanto, o mesmo modelo apresenta limitações e sua utilização deve ser para ligações em estruturas treliçadas.

## 5 CONCLUSÕES

Com a realização desta pesquisa foi possível verificar o comportamento mecânico de conectores fabricados a partir de barras de GFRP. O estudo numérico permitiu verificar o comportamento de ligações de estruturas de madeira em duas propostas as quais variavam os números de conectores, espécie de madeira e diversas configurações geométricas da ligação.

Após a validação de um modelo numérico, com os resultados obtidos nos experimentos de Barcarolo (2019), foi desenvolvido um estudo paramétrico por meio de simulação numérica, utilizando-se o Método de Elementos Finitos. Os resultados serviram de base para a elaboração de um modelo matemático para estimativa de força última.

Além disso, foi analisado como as variáveis adotadas para o modelo matemático interferem na estimativa de força última e verificou-se que os que mais impactam são os seguintes parâmetros: primeiramente a razão entre espessura e diâmetro do conector; seguido da altura e espessura da ligação; e em terceiro lugar o quadrado da razão entre o módulo de elasticidade do conector e o módulo de elasticidade da espécie de madeira, por fim o número de conectores.

O modelo matemático proposto correlaciona os seguintes parâmetros: a) de tensão, b) número de conectores, c) da razão entre altura da ligação e espessura da ligação, d) da razão entre espessura da ligação com diâmetro do conector, e) da razão ao quadrado entre módulo de elasticidade da fibra de vidro e f) da razão do módulo de elasticidade da espécie madeira da ligação, a razão entre os módulos de elasticidade de GFRP do conector e a da espécie de madeira. Esse modelo tem um Coeficiente de Determinação ( $R^2$ ) de 75,64%, como foi apresentado no Capítulo 4.

A comparação do modelo matemático gerado com o modelo proposto por Johansen (1949) evidenciou que as equações apresentadas por Johansen se encontram majoradas, na ordem de 50% e sempre a favor da segurança.

Tal situação pode ser justificada, pois a geração desse modelo considera parâmetros como: a força do embutimento do conector na madeira, a espessura das peças que compõem a ligação e o diâmetro do material.

No modelo proposto nesta pesquisa a força do embutimento da madeira não foi considerado, no entanto utilizou-se os parâmetros: quadrado da razão entre o módulo de elasticidade da fibra de vidro e o módulo de elasticidade da madeira, adotou-se a utilização do número de conectores e a razão entre espessura e o diâmetro do conector, as espessuras das peças de madeira foram analisadas a partir da correlação entre espessura das peças da ligação e diâmetro dos conectores.

Pode-se ressaltar a importância deste estudo uma vez que, grande parte das pesquisas realizadas utilizam materiais dúcteis como ligas metálicas e no presente estudo utilizou-se um material frágil. Ademais, a utilização de conectores metálicos em estruturas de madeira requer maior necessidade de manutenção, pois se os mesmos estiverem em processo de corrosão as características mecânicas da ligação estarão comprometidas podendo levar a estrutura para colapso. Essa situação é minimizada no uso de conectores fabricados a partir de material polimérico reforçado com fibras de vidro.

O modelo de regressão proposto é válido considerando os valores mínimos e máximos utilizados no Estudo Paramétrico. A utilização das espécies, sendo de todas as classes de resistência da madeira, como um parâmetro do modelo permite maior rapidez na estimativa da força de ruptura quando considerado a equação proposta por Johansen que se utiliza da força de embutimento na madeira pelo conector. Destaca-se ainda, que essa ligação foi idealizada para estruturas treliçadas, para conexões mais robustas estudos complementares devem ser realizados.

Visando melhorar o modelo de regressão apresentado sugere-se como trabalhos futuros: estudar as ligações utilizando-se das características das espécies de madeira, o uso de mais espécies de madeiras contidas na mesma classe de resistência, considerar em um modelo a ser desenvolvido o critério de resistência ao embutimento da madeira para uma comparação mais precisa com o modelo de Johansen.

## REFERÊNCIAS

ABAQUS/standard user's manual, version 2022. United States: Dassault Systèmes Simulia Corp; 2022

AEJAZ, S. A.; ADIL DAR, M.; DAR, A. R.; BHAT, J. A., CARVALHO, H. Behaviour of various framed timber joints: Capacity and improved design rules. **Journal of Building Engineering**, v. 44, p. 103417, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103417>

AHMAD, A.; ALJUHNI, A.; ARSHID, U., ELCHALAKANI, M., ABED, F. Prediction of columns with GFRP bars through Artificial Neural Network and ABAQUS. **Structures**, v. 40, p. 247-255, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.03.090>

ALHAYEK, H.; SVECOVA, D. Flexural Stiffness and Strength of GFRP-Reinforced Timber Beams. **Journal of Composites for Construction**, v. 16, n. 3, p. 245–252, 2012. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000261](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000261)

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). **ACI 440.3R**: Guide test methodology for fiber: Reinforced polymer (FRPs) for reinforcing or strengthening concrete structures. Farmington Hills, MI: ACI, 2004.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D3916/D3916M-16** - Standard Test Method for Tensile Properties of pultruded glass-fiber-reinforced plastic rod. West Conshokocken, Pennsylvania, United States of America: American Society for Testing and Materials, 2016. DOI: <https://10.1520/D3916-08R16>

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D4476/D4476M-14** - Standard Test Method for Flexural Properties of Fiber Reinforced Pultruded Plastic Rods. West Conshokocken, Pennsylvania, United States of America: American Society for Testing and Materials, 2014. DOI: [https://10.1520/D4476\\_D4476M-14](https://10.1520/D4476_D4476M-14)

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D7205/D7205M-06**: Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Bars. West Conshohocken, Pennsylvania, United States of America: American Society for Testing and Materials, 2016. DOI: [https://10.1520/D7205\\_D7205M-06R16](https://10.1520/D7205_D7205M-06R16)

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16936**: Edificações em *light wood frame*. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7190**: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7190-1**: Projeto de estruturas de madeira Parte 1: Critérios de dimensionamento. Rio de Janeiro: ABNT, 2022a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7190-2**: Projeto de estruturas de madeira Parte 2: Métodos de ensaio para classificação visual e mecânica de peças estruturais de madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 2022b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7190-3**: Projeto de estruturas de madeira Parte 3: Métodos de ensaio para corpos de prova isentos de defeitos para madeiras de florestas nativas. Rio de Janeiro: ABNT, 2022c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7190-4**: Projeto de estruturas de madeira Parte 4: Métodos de ensaio para caracterização peças estruturais. Rio de Janeiro: ABNT, 2022d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7190-5**: Projeto de estruturas de madeira Parte 5: Métodos de ensaio para determinação da resistência e da rigidez de ligações com conectores mecânicos. Rio de Janeiro: ABNT, 2022e.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7190-6** : Projeto de estruturas de madeira - Parte 6: Métodos de ensaio para caracterização de madeira lamelada colada estrutural. Rio de Janeiro: ABNT, 2022f.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7190-7**: Projeto de estruturas de madeira Parte 7: Métodos de ensaio para caracterização de madeira lamelada colada cruzada estrutural. Rio de Janeiro: ABNT, 2022g.

AUTENGRUBER, M.; LUKACEVIC, M.; GRÖSTLINGER, C.; GRÖSTLINGER, C.; EBERHARDSTEINER, J.; FÜSSL, J. Numerical assessment of wood moisture content-based assignments to service classes in EC 5 and a prediction concept for moisture-induced stresses solely using relative humidity data. **Engineering Structures**, v. 245, n. 15, p. 1128 – 1149, 2021. DOI:

<http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112849>

AVEZ, C.; DESCAMPS, T.; SERRANO, E.; LÉOSKOOL, L. Finite element modelling of inclined screwed timber to timber connections with a large gap between the elements. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 74, n. 3, p. 467–471, 2016.

DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-015-1002-1>

AZEVEDO, A. F. M. Método dos Elementos Finitos. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1ª Edição, 258 p., 2003.

AYANLEYE, S.; UDELE, K.; NASIR, V.; ZHANG, X.; MILITZ, H. Durability and protection of mass timber structures: A review. **Journal of Building Engineering**, v. 46, n. 9, p. 103731, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103731>

BALLARIN, A. W.; NOGUEIRA, M. Caracterização Elástica da Madeira de Eucalyptus citriodora. **Cerne**, v. 9, p. 66-80, 2003.

BARCAROLO, L. R. do V. **Estudo de Eficiência de Ligações por Cavilha de Compósito Estrutural em Vigas de Madeira Laminada**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Centro de Tecnologia e Urbanismo,. Universidade Estadual de Londrina (UEL), 2019.

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**, v. 247, p. 113122, 2021.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113122>

BASTERRECHEA-ARÉVALO, M.; SCHWEIGLER, M.; LEMAÎTRE, R.; BADER, T. K. Numerical modelling of moment-transmitting timber connections. **Engineering Structures**, v. 297, p. 116923, 2023.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116923>

BAZLI, M.; HEITZMANN, M.; VILLACORTA HERNANDEZ, B. Durability of fibre-reinforced polymer-wood composite members: An overview. **Composite Structures**, v. 295, p. 115827, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.115827>

BEDON, C.; FRAGIACOMO, M. Numerical analysis of timber-to-timber joints and composite beams with inclined self-tapping screws. **Composite Structures**, v. 207, p.

13–28, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.09.008>

BEHNAM, H.; KUANG, J. S.; SAMALI, B. Parametric finite element analysis of RC wide beam-column connections. *Computers and Structures*, v. 205, p. 28–44, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2018.04.004>

BLASS, H. J.; ERNST, H.; WERNER, H. **Verbindungen mit Holzstiften, Untersuchungen über die Tragfähigkeit, 10/99 Sonderdruck aus Bauen mit Holz.** Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe, Germany (in German), 1999.

BLASS, H. J.; LASKEWITZ, B. **Tragfähigkeit von Verbindungen mit Stifförmigen Verbindungsmitteln und Zwischenschichten.** Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe, Germany, pp. 1–22, 2003.

BOUHALA, L.; FIORELLI, D.; MAKRADI, A.; BELOUETTAR, S.; SOTAYO, A.; BRADLEY, D. F.; GUAN, Z. Advanced numerical investigation on adhesive free timber structures. **Composite Structures**, v. 246, p. 112389, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112389>

BRAUN, M.; PEŁCZYŃSKI, J.; AL SABOUNI-ZAWADZKA, A.; KROMOSER, B. Calibration and Validation of a Linear-Elastic Numerical Model for Timber Step Joints Based on the Results of Experimental Investigations. **Materials**, v. 15, p. 1639, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15051639>

BROL, J.; WADOWIAK-POSTULAK, A. Old timber reinforcement with FRPs. **Materials**, v. 12, n. 24, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12244197>

CALIL NETO, C.; MOLINA, J. C.; CALIL JUNIOR, C.; LAHR, F. A. R. Modelagem numérica do comportamento de ligações com parafusos auto-atarraxantes em X em corpos de prova de MLC com madeiras do tipo Eucalipto urograndis. **Revista Materia**, v. 22, n. 1, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620170001.0121>

CAMARGO, M. V. d.; CHRISTOFORO, A. L.; BARCAROLO, L. R. d. V.; MOURA, J. d. M. Experimental Analysis of the Performance of Doweled Connections Reinforced with Glass-Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) in Wood *Pinus spp.* **Forests**, v. 14, n. 5, p. 931, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/f14050931>

CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Characterization of Tropical Wood Species for

Use in Civil Constructions. **Journal of Civil Engineering Research**, v. 3, n. 3, p. 98-103, 2013. DOI: DOI: 10.5923/j.jce.20130303.02

CORRADI, M.; BORRI, A.; RIGHETTI, L.; SPERANZINI, E. Uncertainty analysis of FRP reinforced timber beams. **Composites Part B: Engineering**, v. 113, p. 174–184, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.01.030>

CORRADI, M.; VO, T. P.; POOLOGANATHAN, K.; OSOFERO, A. I. Flexural behaviour of hardwood and softwood beams with mechanically connected GFRP plates. **Composite Structures**, v. 206, p. 610–620, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.08.056>

DE ALMEIDA, A. C.; DE MELO MOURA, J. D. Mechanical Behavior of GFRP Dowel Connections to Cross Laminated Timber-CLT Panels. **Forests**, v. 13, n. 2, p. 1–13, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/f13020320>

DE 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**, v. 35, p. 817–828, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.124>

DE LA ROSA GARCÍA, P.; ESCAMILLA, A. C.; GONZÁLEZ GARCÍA, M. N. Bending reinforcement of timber beams with composite carbon fiber and basalt fiber materials. **Composites Part B: Engineering**, v. 55, p. 528–536, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.07.016>

DE SANTIS, Y.; FRAGIACOMO, M. Timber-to-timber and steel-to-timber screw connections: Derivation of the slip modulus via beam on elastic foundation model. **Engineering Structures**, v. 244, n. 4, p. 112798, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112798>

DIAS, A. A.; TREVISAN, J. V. K.; JOHANNES, F. P. Critérios normativos para dimensionamento de ligações por parafusos passantes: avaliação experimental de protótipos. **Revista Principia**, v. 57, p. 51-62, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2021id5807>

DOCUMENTO DE AVALIAÇÃO TÉCNICA. **DATec nº 20** - Sistema construtivo TECVERDE: sistema leve em madeira. Brasília: SNH, PBQP-H, SINAT, 2013.

DORN, M.; DE BORST, K.; EBERHARDSTEINER, J. Experiments on dowel-type timber connections. **Engineering Structures**, v. 47, p. 67–80, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.09.010>

ELCHALAKANI, M.; KARRECH, A.; DONG, M.; MOHAMED ALI, M. S.; YANG, B. Experiments and Finite Element Analysis of GFRP Reinforced Geopolymer Concrete Rectangular Columns Subjected to Concentric and Eccentric Axial Loading. *Structures*, v. 14, n. April, p. 273–289, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2018.04.001>

EL HOUJEYRI, I.; THI, V. D.; OUDJENE, M.; OTTENHAUS, L. M.; KHELIFA, M.; ROGAUME, Y. Coupled nonlinear-damage finite element analysis and design of novel engineered wood products made of oak hardwood. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 79, n. 1, p. 29–47, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01617-7>

ESPINDOLA, L. da R. **O wood frame na produção de habitação social no Brasil**. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paul (USP), 2017.

FABBRI, S., OCTAVIANO, F., SILVA, C., DI THOMMAZO, A., HERNANDES, E., AND BELGAMO, A. (2016). Improvements in the Start tool to better support the systematic review process. In Proc. of the 20th International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering (EASE'16), Limerick, Ireland, June 2016.

FERNANDES, F. P. D.; DIAS, A. A.; MUNAIAR NETO, J. Experimental and numerical analysis on timber-concrete connections with glued reinforcing bars. **Engineering Structures**, V. 277, P. 115437, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115437>

FERNANDES, Felipe Pablo Damasceno. Análise numérica de vigas mistas de madeira e concreto em situação de incêndio. Tese de Doutorado (Doutorado em Ciências). Universidade de São Paulo (USP), 2018.

FIORELLI, J.; DIAS, A. A. Glulam beams reinforced with FRP externally-bonded: Theoretical and experimental evaluation. **Materials and Structures**, v. 44, n. 8, p. 1431–1440, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-011-9708-y>

GRISALES-NOREÑA, L. F.; MONTOYA, O. D.; GIL-GONZÁLEZ, W. J.; PEREA-

MORENO, A.; PEREA-MORENO, M. A Comparative Study on Power Flow Methods for Direct-Current Networks Considering Processing Time and Numerical Convergence Errors. *Electronics*, v. 9, n. 2062, p. 1–20, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics9122062>

FUKUYAMA, H.; KAIRI, M.; HIRSI, H.; INAYAMA, M.; AANDO, N. Shear characteristics of wood dowel shear joint and practical application example. In: **WCTE 2008: 10th Conference on Timber Engineering**, Miyazaki, Japan, 2008.

HANSSON, E. F. Analysis of structural failures in timber structures: Typical causes for failure and failure modes. *Engineering Structures*, v. 33, n. 11, p. 2978–2982, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.02.045>

HARTE, A. M. Mass timber – the emergence of a modern construction material. *Journal of Structural Integrity and Maintenance*, v. 2, n. 3, p. 121–132, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1080/24705314.2017.1354156>

HIGGODA, T. M.; ELCHALAKANI, M.; WITTEK, A.; KIMIAEI, M.; YANG, B. Investigation on the structural failure behaviour of pultruded circular tubular GFRP multiplanar truss bridges with non-metallic connections through finite element modelling. *Engineering Failure Analysis*, v. 142, p. 106739, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.10673>

HILL, R.; A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals. *Proceedings of the Royal Society A*, v.193, p. 281–297, 1948. DOI: <https://doi.org/10.1098/rspa.1948.0045>

JELUŠIČ, P., KRAVANJA, S. Flexural analysis of laminated solid wood beams with different shear connections. *Construction & Building Materials*, v. 174, p. 456–465, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.102>.

JESUS, J. M. H. d.; LOGSDON, N. B.; FINGER, Z. Strength classes of resistance of some timbers from Mato Grosso. *Engineering and Science*, v. 1, n. 3, p. 35–42, 2015.

JOHANSEN, K.W. Theory of timber connections. *International Association for Bridge and Structural Engineering*, v.9, p.249-262, 1949.

JUVANDES, L. F. P.; BARBOSA, R. M. T. Bond analysis of timber structures strengthened with FRP systems. *Strain*, v. 48, n. 2, p. 124–135, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1475-1305.2011.00804.x>

KHALID, M. Y.; RASHID, A. A.; ARIF, Z. U.; SHEIKH, M. F.; ARSHAND, H.; NASIR, M. A. Tensile strength evaluation of glass/jute fibers reinforced composites: An experimental and numerical approach. **Results in Engineering**, v. 10, n. 12, p. 100232, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2021.100232>

KHELIFA, M.; CELZARD, A. Numerical analysis of flexural strengthening of timber beams reinforced with CFRP strips. **Composite Structures**, v. 111, n. 1, p. 393–400, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.01.011>

KHELIFA, M.; KHENNANE, A.; EL GANAOU, M.; CELZARD, A. Numerical modelling of 3D dowelled timber joints using advanced fully coupled hydro-mechanical constitutive equations. **Mechanics and Industry**, v. 16, n. 501, p. 1–7, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1051/meca/2015034>

KHELIFA, M.; KHENNANE, A.; EL GANAOU, M.; CELZARD, A. Numerical damage prediction in dowel connections of wooden structures. **Materials and Structures**, v. 49, n. 5, p. 1829–1840, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0615-5>

KHELIFA, M.; KHENNANE, A.; EL GANAOU, M.; ROGAUME, Y. Analysis of the behavior of multiple dowel timber connections in fire. **Fire Safety Journal**, v. 68, p. 119–128, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2014.05.024>

KILDASHTI, K.; ALINOORI, F.; MOSHIRI, F.; SAMALI, B. Computational simulation of light timber framing connections strengthened with self-tapping screws. **Journal of Building Engineering**, v. 44, p. 103003, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103003>

KIM, Y. J.; HOSSAIN, M.; HARRIES, K. A. CFRP strengthening of timber beams recovered from a 32 year old quonset: Element and system level tests. **Engineering Structures**, v. 57, p. 213–221, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.09.028>

KLIGER, I. R.; HACHANI, R.; BRUNNER, M.; HARTE, M. A.; SCHOBBER, K. Wood-based beams strengthened with FRP laminates: improved performance with pre-stressed systems. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 74, n. 3, p. 319–330, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-015-0970-5>

KREMER, P. D.; SYMMONS, M. A. Mass timber construction as an alternative to concrete and steel in the Australia building industry: A PESTEL evaluation of the

potential. **International Wood Products Journal**, v. 6, n. 3, p. 138–147, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1179/2042645315Y.0000000010>

KORGESAAR, M.; ROMANOFF, J. Influence of mesh size, stress triaxiality and damage induced softening on ductile fracture of large-scale shell structures. *Marine Structures*, v. 38, p. 1–17, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2014.05.001>

KUAI, L.; ORMARSSON, S.; VESSBY, J.; MAHARJAN, R. A numerical and experimental investigation of non-linear deformation behaviours in light-frame timber walls. **Engineering Structures**, v. 252, p. 113599, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113599>

LATHUILLIÈRE, D.; BLÉRON, L.; DESCAMPS, T.; BOCQUET, J. Reinforcement of dowel type connections. **Construction and Building Materials**, v. 97, p. 48–54, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.088>

LI, M.; KHELIFA, M.; KHENNANE, A; EL GANAOU, M. Structural response of cement-bonded wood composite panels as permanent formwork. **Composite Structures**, v. 209, n. 1, p. 13–22, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.10.079>

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

LIU, Y.; CHEN, W.; LI, J.; WANG, E. Mesh Size Optimization of Unidirectional Fiber-Reinforced Composite Model for Precisely Characterizing the Effective Elastic Property. *Journal of Materials Engineering and Performance*, v. 29, n. 4, p. 2707–2719, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11665-020-04778-x>

LOCHAN, P. P.; POLAK, M. A. Determination of tensile strength of GFRP bars using flexure tests. **Construction and Building Materials**, v. 314, p. 125630, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125630>

LOKUGE, W.; OTOOM, O.; BORZOU, R.; NAVARATNAM, S.; HERATH, N.; THAMBIRATNAM, D. Experimental and numerical analysis on the effectiveness of GFRP wrapping system on timber pile rehabilitation. **Case Studies in Construction**

**Materials**, v. 15, p. e00552, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00552>

LU, W.; LING, Z.; GENG, Q.; LIU, W.; YANG, H., YUE, K. Study on flexural behaviour of glulam beams reinforced by Near Surface Mounted (NSM) CFRP laminates. **Construction and Building Materials**, v. 91, p. 23–31, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.04.050>

MASCIA, N. T.; NICOLAS, E. A.; TODESCHINI, R. Comparison between tsai-wu failure criterion and hankinson's formula for tension in wood. **Wood Research**, v. 56, n. 4, p. 499–510, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.04.050>

MAZZÚ, Amanda D. E. **Estudo sobre a substituição de armadura metálica por barras de GFRP em vigas de concreto armadas à flexão quando submetidas ao ataque acelerado de íons cloreto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), 190p, São Carlos, 2020.

MENIS, A.; FRAGIACOMO, M.; CLEMENTE, I. Fire resistance of unprotected cross-laminated timber floor panels: Parametric study and simplified design. **Fire Safety Journal**, v. 107, p. 104–113, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2018.02.001>

MEYER, A. Die Tragfähigkeit von Nagelverbindungen bei statischer Belastung. **European Journal of Wood and Wood Products**, v.15, n.2, p. 96-109, 1957.

MIAO, C.; FERNANDO, D.; ZHOU, H.; WILSON, P.; HEITZMANN, M. Behaviour of hybrid glass fibre-reinforced polymer and timber composite laminates under shear loading: Importance of fibre rotation. **Composite Structures**, v. 287, p. 115304, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.115304>

MILCH, J.; TIPPNER, J.; BRABEC, M.; SEBARA, V.; KUNECKY, J.; KLOIBER, M.; HASNÍKOVÁ, J. Experimental testing and theoretical prediction of traditional dowel-type connections in tension parallel to grain. **Engineering Structures**, v. 152, p. 180–187, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.08.067>

MORALES-CONDE, M. J.; RODRÍGUEZ-LIÑÁN, C.; RUBIO-DE HITA, P. Bending and shear reinforcements for timber beams using GFRP plates. **Construction and Building Materials**, v. 96, p. 461–472, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.079>

NADIR, Y.; NAGARAJAN, P.; AMEEN, M.; ARIF, M. M. Flexural stiffness and strength enhancement of horizontally glued laminated wood beams with GFRP and CFRP

composite sheets. **Construction and Building Materials**, v. 112, p. 547–555, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.133>

NEUBAUEROVÁ, P. Timber beams strengthened by carbon - Fiber reinforced lamellas. **Procedia Engineering**, v. 40, p. 292–297, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.097>

NGO, T. T.; PHAM, T. M.; HAO, H. Proposed new dry and hybrid concrete joints with GFRP bolts and GFRP reinforcement under cyclic loading: Testing and analysis. **Journal of Building Engineering**, v. 49, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104033>

NIE, Y.; VALIPOUR, H. R. Experimental and numerical study of long-term behaviour of timber-timber composite (TTC) connections. **Construction and Building Materials**, v. 304, n. 7, p. 124672, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124672>

O'CEALLAIGH, C.; CONWAY, M.; MEHRA, S.; HARTE, A. M. Numerical Investigation of Reinforcement of Timber Elements in Compression Perpendicular to the Grain using Densified Wood Dowels. **Construction and Building Materials**, v. 288, p. 122990, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122990>

OSMANNEZHAD, S.; FAEZIPOUR, M.; EBRAHIMI, G. Effects of GFRP on bending strength of glulam made of poplar (*Populus deltoids*) and beech (*Fagus orientalis*). **Construction and Building Materials**, v. 51, p. 34–39, 2014. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.035>

PAVKOVIĆ, K.; STEPINAC, M.; RAJČIĆ, V. Brittle failure modes in reinforced and non-reinforced timber joint with large diameter fastener loaded parallel to grain. **Engineering Structures**, v. 222, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111104>

PFEIL, W.; PFEIL, M. Estruturas de madeira. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 224 p., 2003.

POLUS, L.; SZUMIGALA, M. Finite Element Modelling of the Connection for Timber-concrete Composite Beams. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 471, n. 5, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/471/5/052081>

RAFTERY, G. M.; HARTE, A. M. Low-grade glued laminated timber reinforced with FRP plate. **Composites Part B: Engineering**, v. 42, n. 4, p. 724–735, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.01.029>

RAFTERY, G. M.; WHELAN, C. Low-grade glued laminated timber beams reinforced using improved arrangements of bonded-in GFRP rods. **Construction and Building Materials**, v. 52, p. 209–220, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.044>

RAMAGE, M. H.; BURRIDGE, H.; BUSSE-WICHER, M.; FEREDAY, G.; REYNOLDS, T.; SHAH, D. U.; WU, G.; YU, L.; FLEMING, P.; DENSLEY-TINGLEY, D.; ALLWOOD, J.; DUPREE, P.; LINDEN, P. F.; SCHERMAN, O. The wood from the trees: The use of timber in construction. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 68, p. 333–359, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.107>

RATSCH, N.; BÖHM, S.; VOSS, M.; KAUFMANN, M.; VALLÉE, T. Influence of imperfections on the load capacity and stiffness of glued-in rod connections. **Construction and Building Materials**, v. 226, p. 200–211, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.278>

RECCO, E. G. **Análise experimental do sistema de cobertura caibro treliçado em MLP (madeira laminada pregada) utilizando madeira serrada de Pinus spp.** Dissertação (Metodologia de Projeto de Arquitetura e Urbanismo). Universidade Estadual de Londrina (UEL), 2015.

RESCALVO, F. J.; VALVERDE-PALACIOS, I.; SUAREZ, E.; GALLEGO, A. Experimental and analytical analysis for bending load capacity of old timber beams with defects when reinforced with carbon fiber strips. **Composite Structures**, v. 186, 2017, p. 29–38, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.11.078>

RIBEIRO, P.G., Utilização de técnicas não destrutivas para caracterização de madeiras de *Pinus caribaea* Var. *hondurensis* e de *Eucalyptus grandis*, Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

RODACKI, K.; FURTAK, K. Numerical analysis of crack development of timber-glass composite I-beams in the extended finite element method (XFEM). **Composite Structures**, v. 209, p. 349–361, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.01.111>

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

DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14122381>

SANTOS, C. L.; JESUS, A. M. P. DE; MORAIS, J. J. L.; FONTOURA, B. F. C. An experimental comparison of strengthening solutions for dowel-type wood connections. **Construction and Building Materials**, v. 46, p. 114–127, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.021>

SHIRMOHAMMADI, M.; LEGGATE, W.; REDMAN, A. Effects of moisture ingress and egress on the performance and service life of mass timber products in buildings: a review. **Construction and Building Materials**, v. 290, p. 123176, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123176>

SILVA, A.; MARTINS, A. O. F.; MACHADO, J. S. Feasibility of Creosote Treatment for Glued-Laminated Pine-Timber Railway Sleepers. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 27, n. 3, p. 1–11, 2015. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5333.0001073](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5333.0001073)

SISTEMA NACIONAL DE AVALIAÇÃO TÉCNICA (SINAT). **Diretriz SINAT nº 005 - Revisão 01 - Sistemas construtivos estruturados em peças de madeira maciça serrada, com fechamentos em chapas delgadas, Sistemas leves tipo "Light Wood Framing"**. Brasília: PBQP-H, 2016.

SITE 1: <https://casatonelero.com.br/pregos-e-parafusos-casa-tonelero/> acesso em 22/06/2022.

SITE 2: <https://www.srmadeiras.com.br/cavilhas-estriadas-de-madeira-madeireira/mogi-das-cruzes> acesso em 22/07/2022.

SITE 3: <http://gangnail.com.br/conectores-gn-18/> acesso em 22/06/2022.

SITE 4: [https://www.prefabbricatisulweb.it/guida/e-meglio-impiegare-elementi-in-legno-lamellare-o-in-legno-massiccio-per-le-case-in-legno.html#google\\_vignette](https://www.prefabbricatisulweb.it/guida/e-meglio-impiegare-elementi-in-legno-lamellare-o-in-legno-massiccio-per-le-case-in-legno.html#google_vignette) acesso em 18/07/2022.

SITE 5: [http://dedmd.com.br/validacao/2019\\_1/ESTRUTURAS%20DE%20MADEIRA%20E%20ESTRUTURAS%20MET%20C3%81LICAS/Unidade%201/s3/](http://dedmd.com.br/validacao/2019_1/ESTRUTURAS%20DE%20MADEIRA%20E%20ESTRUTURAS%20MET%20C3%81LICAS/Unidade%201/s3/) acesso em 30/07/2022.

SITE 6: [https://www.discoverlivesteam.com/magazineold/IMG\\_1932.JPG](https://www.discoverlivesteam.com/magazineold/IMG_1932.JPG) acesso em 19/06/2022.

SITE 7: <https://www.e-composites.com.br/> acesso em 25/07/2022.

SITE 8: <https://www.cfrp-tstar.com/pt/Haste-de-fibra-de-carbono-3k/> acesso em 20/06/2022.

SITE 9: <https://portuguese.alibaba.com/product-detail/GFRP-fiber-glass-reinforced-polymer-bending-62408933390.html> acesso em 20/07/2022.

SITE 10: [https://www.reg.ru/domain/shop/lot/regiontechservice.ru?utm\\_medium=referral&utm\\_source=regiontechservice.ru&utm\\_campaign=regiontechservice.ru&rid=30515](https://www.reg.ru/domain/shop/lot/regiontechservice.ru?utm_medium=referral&utm_source=regiontechservice.ru&utm_campaign=regiontechservice.ru&rid=30515) acesso em 13/06/2022.

SITE 11: [https://www.researchgate.net/publication/345778414\\_Properties\\_evaluation\\_of\\_fiber\\_reinforced\\_polymers\\_and\\_their\\_constituent\\_materials\\_used\\_in\\_structures\\_-\\_A\\_review](https://www.researchgate.net/publication/345778414_Properties_evaluation_of_fiber_reinforced_polymers_and_their_constituent_materials_used_in_structures_-_A_review) acesso em 15/06/2022.

SMITH, R. E.; GRIFFIN, G.; RICE, TALBOT; HAGEHOFER-DANIELL, B. Mass timber: evaluating construction performance. **Architectural Engineering and Design Management**, v. 14, n. 1–2, p. 127–138, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1080/17452007.2016.1273089>

SOTAYO, A.; BRADLEY, D.; BATHER, M.; SAREH, P.; OUDJENE, M.; EL-HOUJEYRI, I.; MEHRA, SAMEER; O'CEALLAIGH, C.; HALLER, P.; NAMARI, S.; MAKHADI, A.; BELOUETTAR, S.; BOUHALA, L.; DENEUFBOURG, GUAN, Z. Review of state of the art of dowel laminated timber members and densified wood materials as sustainable engineered wood products for construction and building applications. **Developments in the Built Environment**, v. 1, p. 100004, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2019.100004>

STRATUS. Rebar Stratus – Especificações e características de vergalhões em fibra de vidro, estribos e estruturas armadas. Setembro/2015.

SOTSEK, N. C.; SANTOS, A. de P. L. Panorama do sistema construtivo light wood frame no Brasil. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 3, p. 309–326, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212018000300283>

SZÁSZ, A.; HLAVIČKA, V., LUBLÓY, E.; BIRÓ, A. Numerical modelling of the fire resistance of double sheared steel-to-timber connections. **Journal of Building**

**Engineering**, v. 37, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102150>

SZUCS, C.A., TEREZO, R.F., VALLE, A. Estruturas de madeira, Florianópolis, UFSC, 2015.

TAPIA, C.; AICHER, S. A new concept for column-to-column connections for multi-storey timber buildings—Numerical and experimental investigations. **Engineering Structures**, v. 295, p. 116770, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116770>

TOUMPANAKI, E.; RAMAGE, M. Cyclic Loading of Glued-In FRP Rods in Timber: Experimental and Analytical Study. **Journal of Composites for Construction**, v. 26, n. 2, p. 1–19, 2022. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0001182](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0001182)

TRAN, V. D.; OUDJENE, M.; MÉAUSOONE, P. J. Experimental and numerical analyses of the structural response of adhesively reconstituted beech timber beams. **Composite Structures**, v. 119, p. 206–217, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.08.013>

VAHEDIAN, A.; SHRESTHA, R.; CREWS, K. Bond strength model for externally bonded FRP-to-timber interface. **Composite Structures**, v. 200, p. 328–339, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.05.152>

VAHEDIAN, A.; SHRESTHA, R.; CREWS, K. Experimental and analytical investigation on CFRP strengthened glulam laminated timber beams: Full-scale experiments. **Composites Part B: Engineering**, v. 164, p. 377–389, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.12.007>

VILGUTS, A.; STAMATOPOULOS, H.; MALO, K. A. Experimental and analytical evaluation of semi-rigid timber connection with screwed-in threaded rods and steel coupling part. **Journal of Building Engineering**, v. 94, p. 109923, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109923>

VODIANNIKOV, M. A.; KASHEVAROVA, G. G.; STAROBOGATOV, D. Numerical modeling and full-scale experiments of glued wooden structures joint destruction on carbon-fiber dowel pins. **International Journal for Computational Civil and Structural Engineering**, v. 16, n. 2, p. 101–112, 2020.

VODIANNIKOV, M.; KASHEVAROVA, G. Composite solutions for glulam joints. **Key Engineering Materials**, v. 801, p. 47–52, 2019.

WAN, J.; SMITH, S. T.; QIAO, P.; CHEN, F. Experimental Investigation on FRP-to-Timber Bonded Interfaces. **Journal of Composites for Construction**, v. 18, n. 3, p. 1–9, 2014. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000418](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000418)

WANG, Z.; LI, Z.; XIONG, W. Numerical study on three-point bending behavior of honeycomb sandwich with ceramic tile. **Composites Part B: Engineering**, v. 167, n. 1, p. 63–70, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.11.108>

WU, C.; ZHANG, Z.; HE, L.; TAM, L. Experimental study on the static and fatigue performances of GFRP-timber bolted connections. **Composites Structures**, v. 304, n. 2, p. 116435, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116435>

WILKINSON, G.; AUGARDE, C. A serviceability investigation of dowel-type timber connections featuring single softwood dowels. **Engineering Structures**, v. 260, p. 114210, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114210>

XIE, Q.; ZHANG, B.; ZHANG, L.; GUO, T.; WU, Y. Normal contact performance of mortise and tenon joint: theoretical analysis and numerical simulation. **Journal of Wood Science**, v. 67, n. 1, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1186/s10086-021-01963-x>

XIN, Z.-Y.; BABER, K.; GATTAS, J. M. A novel tension strap connection for rapid assembly of temporary timber structures. **Engineering Structures**, v. 262, p. 114320, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114320>

YANG, H.; JU, D.; LIU, W.; LU, W. Prestressed glulam beams reinforced with CFRP bars. **Construction and Building Materials**, v. 109, p. 73–83, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.008>

YANG, Y. L.; LIU, J. W.; XIONG, G. J. Flexural behavior of wood beams strengthened with HFRP. **Construction and Building Materials**, v. 43, p. 118–124, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.029>

YEBOAH, D.; GKANTOU, M. Investigation of flexural behaviour of structural timber beams strengthened with NSM basalt and glass FRP bars. **Structures**, v. 33, p. 390–405, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.04.044>

YURRITA, M.; CABRERO, J. M. Effective thickness of timber elements for the

evaluation of brittle failure in timber-to-steel connections with large diameter fasteners loaded parallel-to-grain at the elastic range: A new method based on a beam on elastic foundation. **Engineering Structures**, v. 209, p. 109959, 2020a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109959>

YURRITA, M.; CABRERO, J. M. Effective thickness of timber elements for the evaluation of brittle failure in timber-to-steel connections with large diameter fasteners loaded parallel-to-grain at the elastic range: A new method based on a beam on elastic foundation. **Engineering Structures**, v. 209, p. 109959, 2020b. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109959>

YURRITA, M.; CABRERO, J. M. New design model for brittle failure in the parallel-to-grain direction of timber connections with large diameter fasteners. **Engineering Structures**, v. 217, p. 110557, 2020c. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110557>

YURRITA, M.; CABRERO, J. M.; MORENO-ZAPATA, E. Brittle failure in the parallel-to-grain direction of timber connections with small diameter dowel-type fasteners: A new design model for plug shear. **Engineering Structures**, v. 241, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112450>

YURRITA, M.; CABRERO, J. M.; QUENNEVILLE, P. Brittle failure in the parallel-to-grain direction of multiple shear softwood timber connections with slotted-in steel plates and dowel-type fasteners. **Construction and Building Materials**, v. 216, p. 296–313, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.100>

ZERBST, D.; AFFRONTI, E.; GEREKE, T.; BUCHELT, B.; CLAUSS, S.; MARKLEIN, M.; CHERIF, C. Experimental analysis of the forming behavior of ash wood veneer with nonwoven backings. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 78, n. 2, p. 321–331, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01494-0>

## ANEXO 1

Este Anexo exhibe os protocolos criados no software StArt para a realização da Revisão Sistemática da Literatura (RSL) contendo os tópicos pertinentes como citado na Seção 2.1.1.

Na Tabela A1.1 são apresentados os critérios utilizados na elaboração do protocolo para a realização da RSL com a temática em Ligações em Estruturas de Madeira e Material Compósito.

**Tabela A1.1: Protocolo criado no StArt para a RSL com o tema Pesquisas em Ligações em Estruturas de Madeira e Material Compósito**

Campos do Protocolo StArt	Conteúdo
Objetivo	Obter artigos científicos que evidenciam o estado da arte sobre Pesquisas em Ligações em Estruturas de Madeira e Material Compósito, por meio do levantamento, revisão e classificação de artigos publicados nos últimos 10 anos em periódicos indexados
Questões de pesquisa	Quais as Áreas de Estudo dos artigos publicados dentro desta temática? / Qual o Enfoque Teórico abordado? / Quais os Métodos adotados? / Quais os resultados obtidos?
Base de dados	Scopus / Engineering Village / Springer
Palavras-chave	<i>((timber structure) AND (connection OR joint) OR (fiber AND reinforced AND polymer OR frp) OR (carbon AND reinforced AND polymer OR cfrp) OR (glass AND fiber AND reinforced AND polymer OR gfrp))</i>
Filtros	Ano de publicação: 2011 a maio 2024 / Tipo de publicação: Apenas artigos / Idioma: Inglês / Área da pesquisa: Engenharia, Estruturas, Estruturas de Madeira, Compósitos.
Critério de seleção	<b>Inclusão:</b> Artigos que tratam de Estruturas de Madeira e Materiais Compósitos. <b>Exclusão:</b> Os artigos que não tratam de Estruturas de Madeira e Materiais Compósitos / Não é da área de Estruturas de Madeira / Não está em Inglês / O texto completo não foi encontrado.
Critério de classificação: Área de Estudo	Estruturas de Madeira / Ligações / Materiais Compósitos / Restauro

Critério de classificação: Enfoque teórico.	Aborda Estruturas de Madeira e Materiais Compósitos / Analisa o comportamento de Ligações e conexões / Discute vantagens e desvantagens do uso de materiais compósitos e a influência em estruturas de madeira
Critério de classificação: Método da Pesquisa.	Revisão de Literatura / Estudo Empírico / Estudo Experimental / Estudo Numérico

Na Tabela A1.2 são apresentados os critérios utilizados na elaboração do protocolo para a realização da RSL com a temática em Pesquisas sobre Modelos para Estimativa de Força Última e Fratura em Ligações de Estruturas de Madeira.

**Tabela A1.2: Protocolo criado no StArt para a RSL com o tema Pesquisas sobre Modelos de Estimativa de Força Última e Fratura em Ligações de Estruturas de Madeira**

Campos do Protocolo StArt	Conteúdo
Objetivo	Obter artigos científicos que evidenciam o estado da arte sobre Pesquisas sobre Modelos para Estimativa de Força Última e Fratura em Ligações de Estruturas de Madeira, por meio do levantamento, revisão e classificação de artigos publicados nos últimos 10 anos em periódicos indexados.
Questões de pesquisa	Quais as Áreas de Estudo dos artigos publicados dentro desta temática? / Qual o Enfoque Teórico abordado? / Quais os Métodos adotados? / Quais os resultados obtidos?
Base de dados	Scopus / Engineering Village / Springer
Palavras-chave	<i>((timber structure) AND (connection OR joint) AND (ultimate AND strength) OR (ultimate AND strength AND model))</i>
Filtros	Ano de publicação: 2011 a maio 2024 / Tipo de publicação: Apenas artigos / Idioma: Inglês / Área da pesquisa: Engenharia, Estruturas, Estruturas de Madeira, Modelos de estimativa e Força última.
Critério de seleção	<b>Inclusão:</b> Artigos que tratam de modelos de estimativa de força última e fratura. <b>Exclusão:</b> Os artigos que não tratam de Estruturas de Madeira e não apresenta modelos de estimativa de força última e fratura / Não é da área de Estruturas de Madeira / Não está em

	Inglês / O texto completo não foi encontrado.
Critério de classificação: Área de Estudo	Estruturas de Madeira / Ligações / Modelos matemáticos / Força última / Fratura.
Critério de classificação: Enfoque teórico.	Aborda Estruturas de Madeira força última / Analisa o comportamento da fratura de Ligações / Discute vantagens e desvantagens das equações normativas para estimar carregamento e modo de falha.
Critério de classificação: Método da Pesquisa.	Revisão de Literatura / Estudo Empírico / Estudo Experimental / Estudo Numérico.

Na Tabela A1.3 são apresentados os critérios utilizados na elaboração do protocolo para a realização da RSL com a temática em Pesquisas com Simulação Numérica em Estruturas de Madeira.

**Tabela A1.3: Protocolo criado no StArt para a RSL com o tema Pesquisas com Simulação Numérica em Estruturas de Madeira**

<b>Campos do Protocolo StArt</b>	<b>Conteúdo</b>
Objetivo	Obter artigos científicos que evidenciam o estado da arte sobre Pesquisas com Simulação Numérica em Estruturas de Madeira, por meio do levantamento, revisão e classificação de artigos publicados nos últimos 10 anos em periódicos indexados.
Questões de pesquisa	Quais as Áreas de Estudo dos artigos publicados dentro desta temática? / Qual o Enfoque Teórico abordado? / Quais os Métodos adotados? / Quais os resultados obtidos?
Base de dados	Scopus / Engineering Village / Springer
Palavras-chave	<i>((timber structure) AND (connection OR joint) AND (finite AND element AND method OR fem))</i>
Filtros	Ano de publicação: 2011 a maio 2024 / Tipo de publicação: Apenas artigos / Idioma: Inglês / Área da pesquisa: Engenharia, Estruturas, Estruturas de Madeira, Simulação Numérica.
Critério de seleção	<b>Inclusão:</b> Artigos que tratam de trabalhos que utilizam simulação numérica em estruturas de madeira.

	<b>Exclusão:</b> Os artigos que não tratam de Estruturas de Madeira / Não utiliza simulação numérica / Não é da área de Estruturas de Madeira / Não está em Inglês / O texto completo não foi encontrado.
Critério de classificação: Área de Estudo	Estruturas de Madeira / Simulação Numérica / Abaqus / Ansys / Sap 2000.
Critério de classificação: Enforque teórico.	Aborda simulação numérica como o método / Apresenta parâmetros utilizados nas simulações / Discute vantagens e desvantagens das configurações inseridas no programa de simulação.
Critério de classificação: Método da Pesquisa.	Estudos Primários / Revisão de Literatura / Estudo Experimental / Estudo Numérico.

## ANEXO 2

Neste anexo são apresentadas as características das classes de madeira utilizadas para uma análise não linear com o software Abaqus.

Para a simulação realizada neste trabalho foi considerada a espécie de madeira *Pinus Elliottii* (*Pinus elliotii var. elliotii*). As informações das Propriedades Elásticas estão apresentadas na Tabela A2.1 e as informações das Propriedades Plásticas estão na Tabela A2.2.

**Tabela A2.1: Valores utilizados para as propriedades elásticas da madeira *Pinus (Pinus elliotii var. elliotii)* na simulação não-linear**

Parâmetro	Valor	Unidade
Módulo de Elasticidade Longitudinal (E1)	6093,67	MPa
Módulo de Elasticidade Longitudinal (E2)	2181,58	MPa
Módulo de Elasticidade Longitudinal (E3)	1123,31	MPa
Coefficiente de Poison (Nu12)	0,013	Adimensional
Coefficiente de Poison (Nu13)	0,013	Adimensional
Coefficiente de Poison (Nu23)	0,23	Adimensional
Módulo de Elasticidade Transversal (G12)	406,24	MPa
Módulo de Elasticidade Transversal (G13)	406,24	MPa
Módulo de Elasticidade Transversal (G23)	406,24	MPa
Densidade	0,446	g/cm <sup>3</sup>

Fonte: Barcarolo, 2019.

**Tabela A2.2: Valores utilizados para as propriedades plásticas da madeira *Pinus (Pinus elliotii var. elliotii)* utilizadas na simulação não-linear**

Parâmetro	Valor	Unidade	Deformação
Resistência sem deformação permanente	70	MPa	0
Resistência última	70.7	MPa	0,0001

Fonte: Barcarolo, 2019.

Para a simulação realizada neste trabalho com a segunda espécie de madeira foi considerada a Capiúba (*Goupia glabra Aublet*). As informações das Propriedades Elásticas estão apresentadas na Tabela A2.3 e as informações das Propriedades Plásticas estão na Tabela A2.4.

**Tabela A2.3: Valores utilizados para as propriedades elásticas da madeira Capiúba (*Goupia glabra Aublet*) na simulação não-linear**

Parâmetro	Valor	Unidade
Módulo de Elasticidade Longitudinal (E1)	13922,32	MPa
Módulo de Elasticidade Longitudinal (E2)	4984,25	MPa
Módulo de Elasticidade Longitudinal (E3)	2566,42	MPa
Coeficiente de Poison (Nu12)	0,018	Adimensional
Coeficiente de Poison (Nu13)	0,018	Adimensional
Coeficiente de Poison (Nu23)	0,25	Adimensional
Módulo de Elasticidade Transversal (G12)	928,13	MPa
Módulo de Elasticidade Transversal (G13)	928,13	MPa
Módulo de Elasticidade Transversal (G23)	928,13	MPa
Densidade	0,73	g/cm <sup>3</sup>

Fonte: Fernandes, 2018; Jesus *et al.*, 2015, Christoforo *et al.*, 2013; Ballarin e Nogueira, 2003.

**Tabela A2.4: Valores utilizados para as propriedades plásticas da madeira linear Capiúba (*Goupia glabra Aublet*) utilizadas na simulação não-linear**

Parâmetro	Valor	Unidade	Deformação
Resistência sem deformação permanente	86	MPa	0
Resistência última	86.77	MPa	0,0001

Fonte: Fernandes, 2018; Jesus *et al.*, 2015, Christoforo *et al.*, 2013; Ballarin e Nogueira, 2003.

Para a simulação realizada neste trabalho com a terceira espécie de madeira foi considerada a Garapa (*Apuleia leiocarpa*). As informações das Propriedades Elásticas estão apresentadas na Tabela A2.5 e as informações das Propriedades Plásticas estão na Tabela A2.6.

**Tabela A2.5: Valores utilizados para as propriedades elásticas da madeira Garapa (*Apuleia leiocarpa*) na simulação não-linear**

Parâmetro	Valor	Unidade
Módulo de Elasticidade Longitudinal (E1)	14881,39	MPa
Módulo de Elasticidade Longitudinal (E2)	5327,65	MPa
Módulo de Elasticidade Longitudinal (E3)	2743,24	MPa
Coefficiente de Poison (Nu12)	0,029	Adimensional
Coefficiente de Poison (Nu13)	0,029	Adimensional
Coefficiente de Poison (Nu23)	0,33	Adimensional
Módulo de Elasticidade Transversal (G12)	992,08	MPa
Módulo de Elasticidade Transversal (G13)	992,08	MPa
Módulo de Elasticidade Transversal (G23)	992,08	MPa
Densidade	0,85	g/cm <sup>3</sup>

Fonte: Fernandes, 2018; Jesus *et al.*, 2015, Christoforo *et al.*, 2013; Ballarin e Nogueira, 2003.

**Tabela A2.6: Valores utilizados para as propriedades plásticas da madeira linear Garapa (*Apuleia leiocarpa*) utilizadas na simulação não-linear**

Parâmetro	Valor	Unidade	Deformação
Resistência sem deformação permanente	83.6	MPa	0
Resistência última	84.3	MPa	0,0001

Fonte: Fernandes, 2018; Jesus *et al.*, 2015, Christoforo *et al.*, 2013; Ballarin e Nogueira, 2003.

Para a simulação realizada neste trabalho com a quarta espécie de madeira foi considerada a Eucalipto Citriodora (*Eucalyptus citriodora*). As informações das Propriedades Elásticas estão apresentadas na Tabela A2.7 e as informações das Propriedades Plásticas estão na Tabela A2.8.

**Tabela A2.7: Valores utilizados para as propriedades elásticas da madeira Eucalipto Citriodora (*Eucalyptus citriodora*) na simulação não-linear**

Parâmetro	Valor	Unidade
Módulo de Elasticidade Longitudinal (E1)	16139,48	MPa
Módulo de Elasticidade Longitudinal (E2)	5778,05	MPa
Módulo de Elasticidade Longitudinal (E3)	2975,15	MPa
Coeficiente de Poison (Nu12)	0,027	Adimensional
Coeficiente de Poison (Nu13)	0,027	Adimensional
Coeficiente de Poison (Nu23)	0,37	Adimensional
Módulo de Elasticidade Transversal (G12)	1075,95	MPa
Módulo de Elasticidade Transversal (G13)	1075,95	MPa
Módulo de Elasticidade Transversal (G23)	1075,95	MPa
Densidade	0,73	g/cm <sup>3</sup>

Fonte: Fernandes, 2018; Jesus *et al.*, 2015, Christoforo *et al.*, 2013; Ballarin e Nogueira, 2003.

**Tabela A2.8: Valores utilizados para as propriedades plásticas da madeira linear Eucalipto Citriodora (*Eucalyptus citriodora*) utilizadas na simulação não-linear**

Parâmetro	Valor	Unidade	Deformação
Resistência sem deformação permanente	80	MPa	0
Resistência última	87.7	MPa	0,0001

Fonte: Fernandes, 2018; Jesus *et al.*, 2015, Christoforo *et al.*, 2013; Ballarin e Nogueira, 2003.

Para a simulação realizada neste trabalho com a quinta espécie de madeira foi considerada a Jatobá (*Hymenaea spp.*). As informações das Propriedades Elásticas estão apresentadas na Tabela A2.9 e as informações das Propriedades Plásticas estão na Tabela A2.10.

**Tabela A2.9: Valores utilizados para as propriedades elásticas da madeira Jatobá (*Hymenaea spp.*) na simulação não-linear**

Parâmetro	Valor	Unidade
Módulo de Elasticidade Longitudinal (E1)	16253,25	MPa
Módulo de Elasticidade Longitudinal (E2)	5818,78	MPa
Módulo de Elasticidade Longitudinal (E3)	2996,13	MPa
Coeficiente de Poison (Nu12)	0,039	Adimensional
Coeficiente de Poison (Nu13)	0,039	Adimensional
Coeficiente de Poison (Nu23)	0,40	Adimensional
Módulo de Elasticidade Transversal (G12)	1083,53	MPa
Módulo de Elasticidade Transversal (G13)	1083,53	MPa
Módulo de Elasticidade Transversal (G23)	1083,53	MPa
Densidade	0,645	g/cm <sup>3</sup>

Fonte: Fernandes, 2018; Jesus *et al.*, 2015, Christoforo *et al.*, 2013; Ballarin e Nogueira, 2003.

**Tabela A2.10: Valores utilizados para as propriedades plásticas da madeira linear Jatobá (*Hymenaea spp.*) utilizadas na simulação não-linear**

Parâmetro	Valor	Unidade	Deformação
Resistência sem deformação permanente	90	MPa	0
Resistência última	90.7	MPa	0,0001

Fonte: Fernandes, 2018; Jesus *et al.*, 2015, Christoforo *et al.*, 2013; Ballarin e Nogueira, 2003.

## ANEXO 3

Neste anexo estão reproduzidas as características das Barras de Fibra de Vidro conforme fornecidas pela empresa Stratus Compostos Estruturais LTDA., e utilizadas na fabricação dos pinos de GFRP para substituir os conectores metálicos. As informações foram extraídas do catálogo encaminhado por e-mail em Maio/2022.

Para a simulação realizada neste trabalho foi considerada para a barra de GFRP as informações das Propriedades Elásticas que estão apresentadas na Tabela A3.1 e as informações das Propriedades Plásticas estão na Tabela A3.2.

**Tabela A3.1: Valores utilizados para as propriedades elásticas da conector de GFRP da empresa STRATUS na simulação não-linear**

Parâmetro	Valor	Unidade
Módulo de Elasticidade Longitudinal (E)	41900,5	MPa
Coefficiente de Poison (Nu)	0,18	Adimensional
Módulo de Elasticidade Transversal (G)	11174,33	MPa
Densidade	1,75	g/cm <sup>3</sup>

Fonte: Stratus (2015).

Informou-se também as características iniciais e finais no estado plástico da barra de fibra de vidro, como: tensão de escoamento e deformação, como apresentado na Tabela 3.5.

**Tabela A3.2: Valores utilizados para as propriedades plásticas da do conector de GFRP da empresa STRATUS utilizadas na simulação não-linear**

Parâmetro	Valor	Unidade	Deformação
Resistência sem deformação permanente	140	MPa	0
Resistência última	320	MPa	0,0045

Fonte: Stratus (2015).



## VERGALHÕES EM FIBRA DE VIDRO FRP Rebar – STRATUS



**Agosto de 2021**

Stratus Compostos Estruturais Ltda é fornecedora de soluções completas em plástico reforçado com fibra de vidro (PRFV), fibra de carbono ou aramida.

Possuímos equipes próprias para especificação, projeto, fabricação e montagem dos mais diversos produtos, através das tecnologias de pultusão, laminação ou injeção, tais como: grades de piso (montadas ou injetadas), guarda-corpos, escadas (marinheiro e inclinadas), plataformas, passarelas, leitos para cabos, eletrocalhas, eletrodutos, etc.

São produtos de alta resistência à corrosão, mecânica e baixo peso. A Stratus é uma empresa certificada pela ISO 9001:2008 e homologada com CRCC Petrobrás. Além destas referências de qualidade, a Stratus também possui a certificação Type Approval BV e DNV.



Antes de imprimir este e-mail, ou qualquer documento, pense no meio ambiente. Nos colaboradores da Stratus ajudamos na reciclagem!





## TÓPICOS

1. OBJETIVOS
2. A EMPRESA
3. POLÍTICA DA QUALIDADE STRATUS
4. CERTIFICAÇÕES
5. PROCESSO DE FABRICAÇÃO
6. DESCRIÇÃO TÉCNICA
7. FORMAS DE FORNECIMENTO
8. CÓDIFICAÇÃO
9. PADRÃO DE RESINA
10. CARACTERÍSTICAS DO PRODUTO
11. CORES
12. CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS
13. CARACTERÍSTICAS DE APLICAÇÃO DOS VERGALHÕES e ESTRIBOS EM CAMPO

### 1- OBJETIVOS

Descrever as características técnicas e propriedades mínimas asseguradas nos vergalhões STRATUS, fabricados em Polímero Reforçado por Fibras de Vidro (PRPV / GFRP), através do processo de pultrusão, associado com o processo de filament winding, denominado "pultruding" para aplicações em projetos de construção civil e obras especiais de engenharia.

### 2- A EMPRESA

A STRATUS Composites Estruturais Ltda é uma Empresa 100% Brasileira, localizada no cluster aeronáutico e aeroespacial de São José dos Campos, São Paulo, possui mais de 20 anos no desenvolvimento e fabricação de materiais compósitos para aplicações especiais com o uso de fibras de vidro, carbono e aramida e resinas especiais.

Formada por Engenheiros oriundos do ITA (Instituto Tecnológico de Aeronáutica) com vasta experiência em Engenharia de Materiais, a Stratus possui larga experiência na fabricação de produtos com nível de qualidade e exigências elevadas em atendimento às principais normas nacionais e internacionais.

Além de recursos humanos altamente capacitados, a STRATUS possui equipamentos e recursos tecnológicos de última geração voltados para especificação, projeto, fabricação e montagem dos mais diversos produtos e serviços em materiais compósitos para os segmentos de mineração, petróleo e gás, saneamento, aeroespacial, infraestrutura, química e petroquímica, construção civil e indústria em geral, levando a STRATUS a ser referência de qualidade e líder no mercado de projetos e produtos especiais em materiais compósitos.



MATRIZ



FILIAL



### 3- POLÍTICA DA QUALIDADE STRATUS

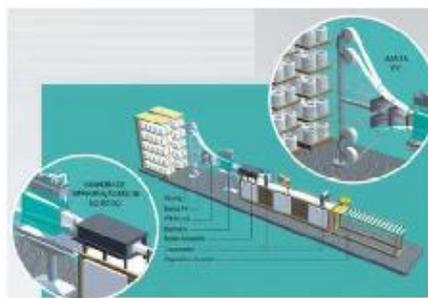
Superar continuamente as expectativas dos nossos clientes com produtos e serviços inovadores de alto conteúdo técnico, fazendo portanto, jus a um retorno que assegure seu contínuo crescimento e fortalecimento, revertido em benefício de seus integrantes, parceiros e sociedade, sempre dentro de princípios éticos e respeito ao meio ambiente.

### 4- CERTIFICAÇÕES e HOMOLOGAÇÕES

Além da certificação ISO 9001:2016, conforme certificado nº 285241-2018-AQ-BRA-INMETRO, a STRATUS é homologada tecnicamente para atendimento da Petrobras com o CRC Nº 7000110070-0 e possui também os certificados de Type Approval pelos órgãos certificadoras ABS, DNV e BV, garantindo qualidade superior para atendimento das condições mais críticas de aplicação.

### 5- PROCESSO DE FABRICAÇÃO (PULLWINDING)

O processo de fabricação dos vergalhões, GFRP Rebar STRATUS consiste na fabricação de perfis contínuos e uniformes com elevado teor de fibra de vidro, assegurando elevada resistência à tração do material e associada com uma ótima aderência ao concreto.



Para fabricação dos estribos em fibra de vidro STRATUS o processo consiste em uma linha envolvendo a fabricação de barras contínuas com etapas posteriores e consecutivas de dobra no formato e dimensões desejadas, acabamento e cura final do material.

### 6- DESCRIÇÃO RESUMIDA

Vergalhões e estribos em Polímero Reforçado por Fibra de Vidro (PRFV / GFRP), produzidos pelo processo de "pullwinding" com a utilização de fibras de vidro especiais e resina termofixa epóxi de alta qualidade, resultando em um produto resistente quimicamente em meio alcalino de concreto, elevada resistência à tração, alto módulo de elasticidade e elevado nível de aderência ao concreto.



## 7- FORMAS DE FORNECIMENTO

### 7.1 – Fornecimento sob a forma de BARRAS DE VERGALHÕES

Os vergalhões podem ser fornecidos nas bitolas padrão de 8;10;12,5;16;25 e 32mm, sob a forma de barras de comprimentos padrão de 8, 9,12 e 15 metros, ou mesmo, em dimensões especiais de bitolas e comprimentos, conforme demanda em projeto.



### 7.2 – Fornecimento de ESTRIBOS e CONTRAVENTAMENTOS

Além dos vergalhões em forma de barras, a STRATUS também fornece estribos, prontos de fabrica nas formas e dimensões definidas em projeto, conforme exemplo de modelos abaixo:

a) Exemplo de estribos e contraventamentos, fornecidos conforme dimensões de projeto:





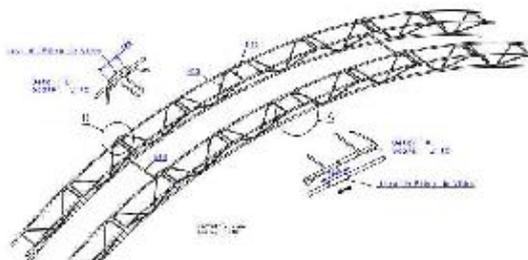
### 7.3 – Fornecimento sob a forma de TELAS “POP”

O fornecimento também pode ser feito sob a forma de telas POP nas malhas padrões de 10x10cm, 15x15cm, 20x20cm ou mesmo nas dimensões demandadas em projeto.



### 7.4 – Fornecimento de CÂMBOTAS, ARCOS e TRELIÇAS

O fornecimento também pode ser feito por meio de cambotas, arcos e treliças, de acordo com dimensões e exigências do projeto.



### 7.5 – Acabamento Superficial

O padrão de superfície dos vergalhões poderá ser adequado ao nível de aderência / ancoragem desejadas e poderão ser fornecidos, sob as seguintes formas:

- Barra com ranhuras helicoidais na superfície, onde a aderência ao concreto é formada por “conos” nas cavidades da superfície do vergalhão.
- Barra com ranhuras helicoidais e aplicação de quartzo na superfície. Este padrão possibilita níveis de aderência e ancoragem ainda superiores.  
*Obs: Nas duas opções a aderência ao concreto é maior que as encontradas nos padrões de vergalhões em aço, conforme pode ser observado no “Relatório de conformação superficial” em anexo.*
- Uma terceira opção de fornecimento é sob a forma de barras cilíndricas lisas, utilizadas como barra de transferência, onde a aderência ao concreto é praticamente inexistente.

### II- CÓDIGOS STRATUS

Os códigos STRATUS de referência para especificação, encontram-se conforme relação abaixo:

- Vergalhão em barras com ranhuras helicoidais é o VERG®
- Vergalhão em barras com ranhuras helicoidais e quartzo na superfície é o VERGQS
- Vergalhão em barras lisas é o BCS
- Estribos e contraentramentos é o EVERG®
- Telas é o TVERG®



#### 9- PADRÃO DE RESINA e FIBRA DE VIDRO

A decisão correta na escolha do padrão de fibra de vidro e resina são fatores críticos e determinantes para atendimento de todas as características exigidas em estruturas de concreto. Por este motivo, torna-se necessária a utilização do padrão de Resina Epóxi Éster Vinílico em conjunto com fibras de vidro especiais, resultando em um padrão de vergalhão resistente aos meios alcalinos do concreto e alcançando propriedades mecânicas exigidas para estas aplicações.

#### 10- CARACTERÍSTICAS e VANTAGENS DO PRODUTO

A combinação do uso de materiais especiais aliado ao processo de fabricação por "pultruding", resulta em um produto com as seguintes características:

- ✓ **Excelente Resistência à tração e baixo peso**  
Os vergalhões FRP Rebar STRATUS possuem o dobro de resistência à tração dos vergalhões em aço e com apenas 1/4 do seu peso. Este desempenho é proporcionado pelo uso de fibras de vidro especiais utilizadas na fabricação do produto, portanto podem ser utilizados vergalhões com diâmetros menores em fibra de vidro, alcançando o mesmo desempenho de vergalhões com diâmetros maiores em aço.

Abaixo encontra-se uma tabela de comparação de equivalência de resistência entre os vergalhões em aço (esquerda) e VERGALHÕES em FIBRA de VIDRO (direita)

Ø6	≡	Ø4
Ø8	≡	Ø6
Ø10	≡	Ø7
Ø12	≡	Ø8
Ø14	≡	Ø10
Ø16	≡	Ø12

- ✓ **Elevada Resistência à Corrosão** – são impermeáveis à ação de íons de sal, corrosão causada por agentes químicos e à alcalinidade elevada no momento da cura do concreto.
- ✓ **Facilidade de corte** – processo rápido e seguro de corte dos vergalhões, através de ferramentas de corte convencionais. Esta característica do material possibilita enormes ganhos de velocidade, redução de custos e segurança no processo de rompimento de paredes diafragmas com armaduras em fibra de vidro (soft eye), através de Máquinas Construtoras de Túneis (TBM's).
- ✓ **Peso** – a densidade do vergalhão em fibra de vidro é cerca de ¼ do aço, proporcionando economias significativas em transporte, movimentação de materiais e peso final da estrutura.
- ✓ **Neutridade Eletromagnética** – não contém metais e não irão interferir no funcionamento de dispositivos eletrônicos sensíveis, como salas de operação de radares, ressonância magnética, praças de pedágio e sub-estações elétricas expostas à altas tensões e a elevados campos eletromagnéticos.
- ✓ **Isolante Térmico e Elétrico** – não absorve calor e não conduz energia elétrica
- ✓ **Coefficiente de dilatação** – material com coeficiente muito baixo próximo ao concreto.
- ✓ **Adesão Mecânica** – A adesão mecânica é feita através do intertravamento entre as nervuras das barras e o concreto, formado por "consoles de concreto". A adesão pode ser aumentada, ainda mais com a utilização de vergalhões com camadas superficiais de quartzo, que possibilitam uma adesão e ancoragem superiores aos vergalhões em aço.



- ✓ **Resistência à Protensão** – Todos os materiais estruturais, quando submetidos a uma carga constante, inclusive o aço, pode falhar repentinamente após um período de tempo, um fenômeno conhecido como "creep de ruptura". Provam que o aço está limitado a 80% da força, e tal deformação de ruptura não ocorre nos vergalhões de fibra de vidro, devido a sua alta resistência a tração.
- ✓ **Material ecologicamente correto**



Os vergalhões em fibra de vidro são fabricados a partir de fibras especiais de vidro que, além de conferirem desempenho superior aos vergalhões em aço, também possuem aspectos ecológicos importantes:

- ✓ **Menor consumo de energia no processo de fabricação:** os vergalhões em fibra de vidro requerem menor utilização de energia para processamento e fabricação, sendo demandado até 75% menos de energia que os vergalhões em aço para fabricação das mesmas quantidades de barras.
- ✓ **Menor emissão de gases que agredem a camada de ozônio:** Os vergalhões em fibra de vidro são fabricados em fábricas modernas e com o uso de alta tecnologia, não necessitando de usinas poluidoras a exemplo do que é demandado para os vergalhões em de aço.
- ✓ **Menor agressão ao meio ambiente:** para a obtenção da matéria prima para fabricação dos vergalhões em fibra de vidro não há a necessidade de devastação e destruição de grandes áreas de natureza para extração e transporte, a exemplo do que ocorre com o minério de ferro para fabricação dos vergalhões em aço.
- ✓ **Redução no consumo:** Devido ao desempenho superior e ao menor peso dos vergalhões em fibra de vidro comparados aos vergalhões em aço, é possível atender a todas as aplicações utilizando-se de uma menor quantidade de vergalhões em fibra de vidro, mas com o mesmo desempenho, traduzindo em uma redução expressiva no consumo e demanda de materiais.
- ✓ **Menor gasto de concreto**  
Devido à elevada resistência à corrosão dos vergalhões em fibra de vidro (não correm nunca) é possível utilizar camadas mais espessas de concreto em rebocos de paredes sem a necessidade de utilização de grandes espessuras de concreto para assegurar a proteção contra corrosão da estrutura, a exemplo do que ocorre com o aço.





### 11- CORES

A cor característica dos vergalhões em fibra é o branco leitoso. Cores especiais podem ser fabricadas sob consulta.

### 12- CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS

#### a) NORMAS APLICADAS

Os vergalhões produzidos pela Stratus seguem os padrões de normas internacionais, que conferem aos seus produtos o desempenho e a qualidade necessários para as mais diversas exigências de aplicações.

Para cálculo de projeto e definições propriedades mecânicas é utilizado como referência a norma ACI-440 (American Concrete Institute).

#### b) COMPORTAMENTO DOS VERGALHÕES EM PRFV / GFRP

Apesar dos vergalhões em fibra de vidro possuírem apenas um quarto do peso do aço, a sua resistência à tração possui valores muito superiores.

Apesar desta característica, um aspecto a ser considerado nos materiais compósitos é a não existência de módulo de plastificação ou zona plástica.

O material compósito apresenta um gráfico de tensão deformação (ver figura abaixo) como uma reta linear com uma deformação elástica muito baixa de até 3%, sendo que, acima deste patamar haverá o rompimento do material.

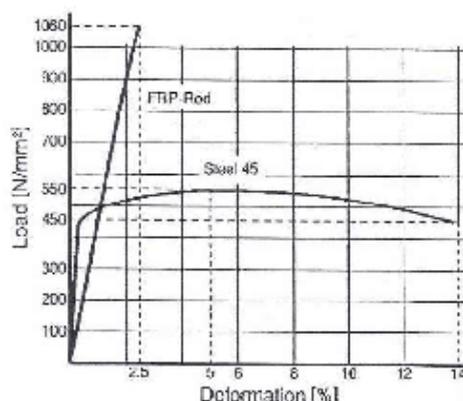


Gráfico com sobreposição entre vergalhões em PRFV e aço



### c) PROPRIEDADES MECÂNICAS

Abaixo encontram-se as principais propriedades mecânicas dos vergalhões FRP Rebar STRATUS

REBAR STRATUS - Propriedades Mecânicas

Dados	Un.	Diâmetros									
		Ø6	Ø10	Ø12	Ø14	Ø16	Ø20	Ø25	Ø30	Ø36	Ø42
Diâmetro nominal	[mm]	6	10	12	14	16	20	25	30	36	42
Diâmetro nominal	[pol.]	1/4	3/8	1/2	5/8	5/8	3/4	1	1 1/4	1 1/2	1 3/4
Área nominal	[mm <sup>2</sup> ]	31,67	71,20	125,7	197,9	285	387,9	500,7	641,3	791,7	972,3
Área nominal [pol. <sup>2</sup> ]	[pol. <sup>2</sup> ]	0,049	0,110	0,156	0,307	0,442	0,601	0,785	0,984	1,227	1,547
Resistência à tração garantida	MPa	581	580	617	699	850	1099	1300	1500	1700	1900
Módulo de elasticidade	GPa	48,00	48,00	48,00	48,00	47,00	47,00	46,00	42,00	41,00	
Carga de tração final	kN	30	67	115	178	250	321	410	504	581	
Alongamento	%	1,98	1,83	1,87	1,80	1,52	1,55	1,37	1,39	1,21	
Tensão nominal de cisalhamento	MPa	210	210	210	210	201	201	200	200	200	
Coefficiente longitudinal de dilatação	10 <sup>-6</sup> /°C	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	
Coefficiente transversal de dilatação	10 <sup>-6</sup> /°C	27,3	27,3	28,7	29,3	27,9	26	23,2	21,1	23,1	
Densidade	g/cm <sup>3</sup>	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	
Absorção de umidade	%	0,65	0,618	0,73	0,39	0,31	0,27	0,17	0,14	0,14	

<sup>1</sup> Diâmetros, apenas as polegadas fabricadas, sob encomenda.

Através dos valores obtidos nos ensaios de tração, demonstrados no relatório abaixo, pode-se observar que estes resultados em uma série de 10 corpos de provas ensaiados, são superiores aos valores demandados em projeto.





Ensaio de Tração - Stratus  
Relatório de Ensaio

Programa Test: versão 3.01      Método de Ensaio: ASTM D 3010-02  
 Ident. Amostras: \*\*\*\*\* Escrutor: Adriano Brito      Nº Amostras: Vergalhões 6,2mm      Material: Fibras de vidro

Corpo de Prova	Diametro (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Força Força Max. (N)	Tensão Força Max. (MPa)	Tensão a 0,1% (MPa)	Tensão a 1,0% (MPa)	Med. Elong. (MPa)	Del. Esp. Calorada (%)
CP 1	6,20	30,19	33,16	1038,41	48,12	484,92	48977,54	2,24
CP 2	6,20	30,19	39,13	953,61	64,68	523,00	50534,21	1,88
CP 3	6,20	30,19	34,97	1148,21	52,88	481,64	47642,49	2,41
CP 4	6,20	30,19	36,99	1222,84	53,48	500,51	50330,16	2,43
CP 5	6,20	30,19	34,44	1140,82	51,71	465,31	46287,70	2,46
CP 6	6,10	29,08	34,78	1153,53	56,18	503,81	49736,56	2,32
CP 7	6,10	29,08	34,70	1153,30	55,35	475,22	47652,54	2,45
CP 8	6,10	29,08	34,37	1140,36	51,38	483,77	47982,73	2,38
CP 9	6,14	29,61	30,40	1016,80	68,28	492,14	47984,01	2,18
CP 10	6,18	30,00	32,43	1081,12	54,49	491,84	48394,01	2,22
Número CPs	10	10	10	10	10	10	10	10
<b>Média</b>	6,189	30,08	32,49	<b>1080</b>	58,48	491,4	<b>48410</b>	2,245
Desv. Padrão	0,01825	0,1796	4,897	165,2	6,240	15,28	1450	0,3394
Coef. Var. (%)	0,2964	0,5976	15,38	15,30	11,25	3,111	3,026	16,08
Máximo	6,640	29,61	39,13	1336	48,12	488,3	45200	1,252
Mínimo	6,300	30,19	36,99	1222	68,28	520,0	50500	2,465

Tabela de resultados

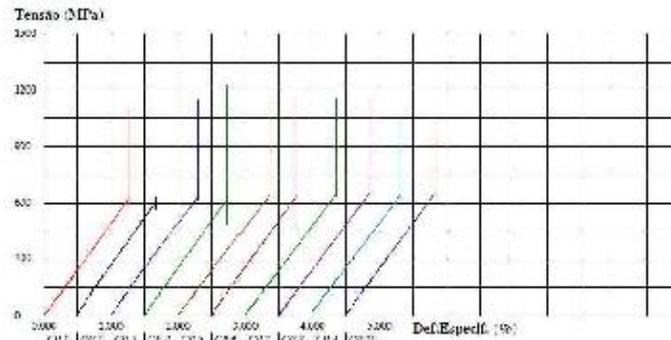


Gráfico tensão x Deformação

d) RESULTADOS DE ENSAIOS

Abaixo podem ser observados outros ensaios mecânicos realizados para o Rebar Stratus:

✓ COEFICIENTE DE CONFORMAÇÃO SUPERFICIAL / ADERÊNCIA

- Relatório de ensaio Falcão Rebar Nº 118888EA





- ✓ **ENSAIOS MECÂNICOS**
- Flexão, Tração, Cisalhamento e Compressão



### 13 – CARACTERÍSTICAS DE APLICAÇÃO DOS VERGALHÕES e ESTRIBOS EM CAMPO

- a) **MONTAGEM DAS ARMADURAS**  
A construção das armaduras requerem os mesmos procedimentos de trabalho utilizados para uma armadura de aço. As barras e estribos necessárias serão fornecidas sob medida e poderão ser fixas com arame recozido, fitilhos plásticos, abraçadeiras de nylon (fita tyrap / Heliemann) ou produtos similares.

### 14. APLICAÇÕES COMPROVADAS MUNDIALMENTE

Material utilizado mundialmente, desde a década de 80, em países, como Estados Unidos, Canadá, Europa e da Ásia.

Exemplos:

- a) **Primeira ponte construída nos Estados Unidos com estrutura 100% em vergalhões em fibra de vidro e que se encontra em perfeita operação até o presente momento.**



**Green Building with FRP Concrete Rebar in the USA, from the Beginning**

The U.S. EPA and the U.S. Environmental Protection Agency (EPA) have been instrumental in the development of the Ketchikan Fiber Bridge, a concrete bridge with FRP concrete reinforcement (FRP) bars. The U.S. Environmental Protection Agency (EPA) has been instrumental in the development of the Ketchikan Fiber Bridge, a concrete bridge with FRP concrete reinforcement (FRP) bars.

The Ketchikan Fiber Bridge is a concrete bridge with FRP concrete reinforcement (FRP) bars. The bridge is a concrete bridge with FRP concrete reinforcement (FRP) bars. The bridge is a concrete bridge with FRP concrete reinforcement (FRP) bars.

The Ketchikan Fiber Bridge is a concrete bridge with FRP concrete reinforcement (FRP) bars. The bridge is a concrete bridge with FRP concrete reinforcement (FRP) bars. The bridge is a concrete bridge with FRP concrete reinforcement (FRP) bars.

The Ketchikan Fiber Bridge is a concrete bridge with FRP concrete reinforcement (FRP) bars. The bridge is a concrete bridge with FRP concrete reinforcement (FRP) bars. The bridge is a concrete bridge with FRP concrete reinforcement (FRP) bars.

The Ketchikan Fiber Bridge is a concrete bridge with FRP concrete reinforcement (FRP) bars. The bridge is a concrete bridge with FRP concrete reinforcement (FRP) bars. The bridge is a concrete bridge with FRP concrete reinforcement (FRP) bars.



- b) Vídeo que demonstra a resistência de paredes e barreiras com vergalhão em fibra de vidro  
<https://www.youtube.com/watch?v=DeeZHMfSVIU>  
<https://www.youtube.com/watch?v=3WDDQFPOFA>
- c) Vídeo que demonstra a resistência do vergalhão em fibra de vidro  
<https://www.youtube.com/watch?v=7hrEBoZhszA>

**STRATUS COMPOSTOS ESTRUTURAIS LTDA.**