

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Luciana Fernandes Hoppe

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO À FLEXÃO DE VIGAS EM
MADEIRA REFORÇADAS COM BARRAS DE GFRP**

Santa Maria, RS
2023

Luciana Fernandes Hoppe

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO À FLEXÃO DE VIGAS EM MADEIRA
REFORÇADAS COM BARRAS DE GFRP**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de concentração em Construção Civil e Preservação Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Rogério Cattelan Antochaves de Lima

Coorientador: Prof. Dr. Almir Barros da Silva Santos Neto

Santa Maria, RS
2023

Hoppe, Luciana Fernandes

Análise do Comportamento à Flexão de Vigas em Madeira
Reforçadas com Barras de GFRP / Luciana Fernandes Hoppe.-
2023.

117 f.; 30 cm

Orientador: Rogério Cattelan Antocheves de Lima
Coorientador: Almir Barros da Silva Santos Neto
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, RS, 2023

1. Reforço estrutural 2. Vigas de madeira 3. GFRP 4.
Comportamento à flexão I. Lima, Rogério Cattelan
Antocheves de II. Santos Neto, Almir Barros da Silva
III. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Declaro, LUCIANA FERNANDES HOPPE, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

Luciana Fernandes Hoppe

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO À FLEXÃO DE VIGAS EM MADEIRA
REFORÇADAS COM BARRAS DE GFRP**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de concentração em Construção Civil e Preservação Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

Aprovado em 10 de outubro de 2023:

Prof. Dr. Rogério Cattelan Antochaves de Lima
(Presidente/Orientador)

Prof. Dr. Almir Barros da Silva Santos Neto (UFSM)
(Coorientador)

Prof Dr. Andre Lübeck (UFSM)

Prof Dr. Alisson Simonetti Milani (UNIPAMPA)

Santa Maria, RS
2023

A você, Pietra

AGRADECIMENTOS

Agradecer a todos que colaboraram para a realização desse trabalho é quase impossível. Ao longo dos anos, foram inúmeras as pessoas que contribuíram para sua concretização. Muitos cederam documentos ou dados, leram e comentaram textos, expressaram opiniões ou, simplesmente, conversaram; às vezes sem nos darmos conta que ali nascia uma ideia ou estava o complemento que faltava a ela. Outros deram um apoio menos explícito, mas nem por isso, menos importante: familiares e amigos que suportaram períodos de ausência e colegas que tiveram maior carga de trabalho por conta de minha dedicação a essa tarefa. Uma página certamente não seria suficiente para nomear a todos.

Agradeço a Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) que possibilitou essa aprendizagem.

Agradeço, de maneira especial, aos professores Rogério Cattelan Antochaves de Lima e Almir Barros da Silva Santos Neto, pela orientação e pela inestimável ajuda e compreensão. Da mesma forma, agradeço ao professor André Lübeck.

Por fim, agradeço imensamente a minha família, pela convivência harmoniosa e investigadora que sempre me impulsionou à constante busca pelo conhecimento e a Pietra, amada filha, a quem dedico esse trabalho.

RESUMO

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO À FLEXÃO DE VIGAS EM MADEIRA REFORÇADAS COM BARRAS DE GFRP

AUTORA: Luciana Fernandes Hoppe
ORIENTADOR: Rogério Cattelan Antochaves de Lima
COORIENTADOR: Almir Barros da Silva Santos Neto

A madeira é um material natural, originário de fontes renováveis e, portanto, de grande apelo ecológico e sustentável que se constitui em alternativa viável para uso em edificações. Devido às suas propriedades mecânicas é possível uma ampla aplicabilidade na construção civil. Entretanto, pode apresentar defeitos naturais que interferem em suas propriedades mecânicas, além da limitação em suas dimensões comerciais. Nesta direção, este trabalho analisou o comportamento a flexão de vigas de madeiras dos tipos Conífera (Cedrinho - *Erismia uncinatum*) e Dicotiledônea (Pinus - *Pinus elliottii*), reforçadas com barras compostas de polímero reforçado com fibra de vidro, GFRP (do inglês *Glass Fiber Reinforced Polymer*) em comparação às vigas referência (não reforçadas) destas mesmas madeiras. Trata-se de uma pesquisa explicativa e experimental, que submeteu 12 corpos-de-prova de cada madeira ao ensaio normatizado de compressão paralela as fibras, no intuito de caracterização simplificada das madeiras, obtendo-se a sua classe de resistência. Seguiu-se o programa experimental, com o desenvolvimento dos ensaios normatizados de flexão de quatro pontos em uma amostra de 20 vigas de madeira testadas até a falha sob carregamento, para análise do comportamento a flexão. As 20 vigas submetidas ao ensaio eram de dimensões 45 mm x 90mm x 1100mm, sendo 5 de Cedrinho sem reforço e 5 de Pinus sem reforço, para estabelecer os valores de referência; 5 vigas de madeira do tipo Cedrinho reforçadas e 5 vigas de madeira do tipo Pinus reforçadas. As vigas foram reforçadas pela técnica NSM (Reforço Montado na Superfície), sendo a barra de GFRP fixada na viga de madeira através de adesivo epóxi, inserida em uma ranhura executada no centro da face inferior da mesma (zona tracionada). Os resultados mostraram que as vigas reforçadas tiveram desempenho melhor à flexão do que as vigas de referência para os dois tipos de madeira analisadas. Assim, foi possível concluir que houve melhoria no desempenho à flexão nas vigas de madeira que receberam as barras de reforço na ordem de 8% para um percentual de 0,5 de armadura na madeira do tipo Cedrinho e na ordem de 40% para um percentual de 0,5 de armadura na madeira do tipo Pinus. O desenvolvimento desta pesquisa permitiu constatar que o uso de barras compostas de polímero reforçado com fibra de vidro como armadura de reforço em vigas de madeira pode ser uma solução ao desafio relacionado as suas dimensões, contribuindo para o aumento da vida útil da estrutura, que pode estar sujeita à deterioração ou dano.

Palavras-chave: Reforço estrutural. Vigas de madeira. GFRP. Comportamento à flexão.

ABSTRACT

BENDING BEHAVIOR ANALYSIS OF WOODEN BEAMS REINFORCED WITH GFRP BARS

AUTHOR: Luciana Fernandes Hoppe
ADVISOR: Rogério Cattelan Antochaves de Lima
CO-ADVISOR: Almir Barros da Silva Santos Neto

Wood is a natural material originating from renewable sources, thus representing an ecologically conscious and sustainable option for use in constructions. Due to its mechanical properties, it finds a wide range of applications in the construction industry. However, it can exhibit natural defects that affect its mechanical properties, in addition to limitations in its commercial dimensions. In this regard, this study analyzed the bending behavior of wood beams of the Conifer (Cedar - *Erisma uncinatum*) and Dicotyledon (Pine - *Pinus elliottii*) types, reinforced with bars made of Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP), compared to reference (unreinforced) beams of the same woods. This is an explanatory and experimental research that subjected 12 specimens of each type of wood to the standardized test of parallel-to-grain compression, aiming at a simplified wood characterization and obtaining its strength class. The experimental program followed with the development of standardized four-point bending tests on a sample of 20 wood beams, tested to failure under load, to analyze their bending behavior. The 20 tested beams had dimensions of 45 mm x 90 mm x 1100 mm, with 5 Cedar beams and 5 Pine beams without reinforcement to establish reference values; 5 reinforced Cedar wood beams and 5 reinforced Pine wood beams. The beams were reinforced using the Near Surface Mounted (NSM) technique, where GFRP bars were fixed to the wood beams using epoxy adhesive, inserted into a groove made on the lower face's center (tension zone). The results showed that the reinforced beams exhibited better bending performance than the reference beams for both types of wood analyzed. Thus, it was possible to conclude that there was an improvement in the bending performance of the wood beams that received reinforcement bars, by approximately 8% for a 0.5% reinforcement ratio in Cedar wood, and around 40% for a 0.5% reinforcement ratio in Pine wood. The development of this research allowed us to affirm that the use of GFRP composite bars as reinforcement in wood beams can be a solution to the challenges related to their dimensions, contributing to the increased lifespan of the structure, which might be susceptible to deterioration or damage.

Keywords: Structural reinforcement. Wooden beams. GFRP. Bending behavior.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABIMCI	Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
BFRP	<i>Basalt Fiber Reinforced Polymer</i> - Polímero reforçado com fibra de basalto
CAN/CSA	Canadian Standards Association
CFRP	<i>Carbon Fiber Reinforced Polymer</i> - Polímero reforçado com fibra de carbono
EBR	<i>Externally Bonded Reinforcing</i> - Reforço colado externamente
FIB 9.3 TG	Federation Internationale Du Beton
FRP	<i>Fiber Reinforced Polymer</i> - Polímero reforçado com fibra
GFRP	<i>Glass Fiber Reinforced Polymer</i> - Polímero reforçado com fibra de vidro
NSM	<i>Near Surface Mounted</i> - Reforço colado próximo à superfície

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 -	Situação das florestas no Brasil (2021)	20
FIGURA 2 -	Processo de pultrusão na fabricação de barras de GFRP	26
FIGURA 3 -	Modelos de tratamento superficial em barras de FRP	27
FIGURA 4 -	Representação de diagramas tensão-deformação de barras de FRP	28
FIGURA 5 -	Representação de formas de ruptura de barras de FRP por tração	28
FIGURA 6 -	Representação dos sistemas EBR e NSM	32
FIGURA 7 -	Seção transversal da viga	35
FIGURA 8 -	Comportamento típico tensão-deformação da madeira na tração (a); Comportamento típico tensão-deformação da madeira na compressão (b); Comportamento típico tensão-deformação do PRF na tração (c)	37
FIGURA 9 -	Seção transversal (a); deformações específicas (b); tensões (c); forças resultantes (d)	38
FIGURA 10 -	Fluxograma do programa experimental	43
FIGURA 11 -	Distribuição geográfica dos plantios de Pinus no Brasil (2021).....	45
FIGURA 12 -	Corpos de prova de Cedrinho	48
FIGURA 13 -	Corpos de prova de Pinus	48
FIGURA 14 -	Barras compostas de polímero reforçado com fibra de vidro (GFRP)	51
FIGURA 15 -	Embalagem comercial do adesivo Tecbond FM Quartzolit bicomponente	52
FIGURA 16 -	Fresa circular de 8.0 mm utilizada para a execução do entalhe nas vigas de madeira.....	54
FIGURA 17 -	Seção transversal das vigas ensaiadas.....	54
FIGURA 18 -	Vigas de Cedrinho preparadas para ensaio.....	55
FIGURA 19 -	Esquema de montagem do ensaio de flexão de quadro pontos	56
FIGURA 20 -	Ensaio de resistência à compressão paralela as fibras.....	59
FIGURA 21 -	Corpo de prova de madeira após o ensaio de resistência à compressão paralela as fibras.....	60
FIGURA 22 -	Tensão versus deformação resultante do ensaio de resistência à compressão paralela as fibras.....	61

FIGURA 23 - Ensaio de resistência à compressão paralela as fibras na madeira Pinus.....	63
FIGURA 24 - Corpo de prova da madeira Pinus após o ensaio de resistência à compressão paralela as fibras.....	63
FIGURA 25 - Tensão versus deformação resultante do ensaio de resistência à compressão paralela as fibras.....	65
FIGURA 26 - Sequência de ensaio de viga de flexão de quatro pontos em vigas referência de madeira Cedrinho. (a) início da aplicação de cargas; (b) instante de ruptura da viga	66
FIGURA 27 - Carga versus deslocamento resultante do ensaio de resistência à flexão de quatro pontos nas vigas referência de Cedrinho	69
FIGURA 28 - Sequência de ensaio de resistência à flexão de quatro pontos. (a) início da aplicação de cargas; (b) instante de ruptura da viga, (c) detalhe da ruptura...71	
FIGURA 29 - Carga versus deslocamento resultante do ensaio de resistência a flexão nas vigas de Cedrinho com reforço.....	73
FIGURA 30 - Sequência de ensaio de resistência à flexão de quatro pontos. (a) início da aplicação de cargas; (b) momento de ruptura da viga.....	74
FIGURA 31 - Carga versus deslocamento resultante do ensaio de resistência à flexão nas vigas referência de Pinus.....	76
FIGURA 32 - Sequência de ensaio de resistência à flexão de quatro pontos. (a) início da aplicação de cargas; (b) momento de ruptura da viga; (c) detalhe ruptura	77
FIGURA 33 - Carga versus deslocamento resultante do ensaio de resistência à flexão nas vigas de Pinus com reforço.....	79
FIGURA 34 - Carga versus deslocamento - comparativo entre as vigas referência e vigas reforçadas com GFRP na madeira Cedrinho.....	81
FIGURA 35 - Carga versus deslocamento - comparativo entre as vigas referência e vigas reforçadas com GFRP na madeira Pinus.....	82
FIGURA 36 - Carga versus deslocamento - comparativo entre as vigas reforçadas com GFRP na madeira Cedrinho e Pinus.....	84
FIGURA 37 - Seção transversal da viga reforçada com hastes de GFRP.....	86

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 -	Propriedades das fibras de vidro usadas na fabricação de barras de GFRP.....	24
TABELA 2 -	Propriedades das matrizes poliméricas dos compósitos de FRP	25
TABELA 3 -	Classes de resistência de espécies de florestas nativas definidas em ensaios de corpos de prova isentos de defeitos	47
TABELA 4 -	Classes de resistência definidas em ensaios de peças estruturais de madeira	50
TABELA 5 -	Resultados do ensaio de compressão paralela as fibras – carga de ruptura	60
TABELA 6 -	Resultados do ensaio de compressão paralela as fibras – carregamento e deslocamento	61
TABELA 7 -	Resultados do ensaio de resistência à compressão paralela as fibras – Cedrinho.....	62
TABELA 8 -	Resultados do ensaio de resistência à compressão paralela as fibras – carga de ruptura.....	64
TABELA 9 -	Resultados do ensaio de resistência à compressão paralela as fibras – carregamento e deslocamento.....	64
TABELA 10 -	Resultados do ensaio de resistência à compressão paralela as fibras – Pinus.....	65
TABELA 11 -	Resultados do ensaio de resistência à flexão de quatro pontos – carga de ruptura.....	67
TABELA 12 -	Resultados do ensaio de resistência à flexão de quatro pontos - carregamento e deslocamento.....	67
TABELA 13 -	Valores médios para vigas referência – Cedrinho.....	70
TABELA 14 -	Resultados do ensaio de resistência à flexão de quatro pontos – carga de ruptura.....	71
TABELA 15 -	Resultados do ensaio de resistência à flexão de quatro pontos – carregamento e deslocamento.....	71
TABELA 16 -	Valores médios para vigas com reforço – Cedrinho.....	73

TABELA 17 -	Resultados do ensaio de resistência à flexão de quatro pontos – carga de ruptura.....	74
TABELA 18 -	Resultados do ensaio de resistência à flexão de quatro pontos – carregamento e deslocamento.....	74
TABELA 19 -	Valores médios para vigas referência – Pinus.....	76
TABELA 20 -	Resultados do ensaio de resistência à flexão de quatro pontos – carga de ruptura.....	78
TABELA 21 -	Resultados do ensaio de resistência à flexão de quatro pontos – carregamento e deslocamento.....	78
TABELA 22 -	Valores médios para vigas com reforço – Pinus.....	80
TABELA 23 -	Comparativo entre viga referência e viga reforçada – Cedrinho.....	81
TABELA 24 -	Comparativo entre viga referência e viga reforçada – Pinus	83
TABELA 25 -	Comparativo entre as vigas reforçadas de Cedrinho e Pinus.....	83
TABELA 26 -	Carga de ruptura média da resistência a compressão do cedrinho.....	97
TABELA 27 -	Resultados da resistência a compressão da amostra de cedrinho.....	97
TABELA 28 -	Carga de ruptura média da resistência a compressão do pinus.....	98
TABELA 29 -	Resultados da resistência a compressão da amostra de pinus.....	98
TABELA 30 -	Carga de ruptura média de resistência a flexão do cedrinho.....	100
TABELA 31 -	Resultados da resistência a flexão da amostra de cedrinho.....	100
TABELA 32 -	Carga de ruptura média da resistência a flexão do cedrinho com reforço.....	102
TABELA 33 -	Resultados da resistência a flexão da amostra de cedrinho com reforço.....	102
TABELA 34 -	Carga de ruptura média da resistência a flexão do pinus.....	104
TABELA 35 -	Resultados da resistência a flexão da amostra de pinus.....	104
TABELA 36 -	Carga de ruptura média da resistência a flexão do pinus com reforço.....	105
TABELA 37 -	Resultados da resistência a flexão da amostra de pinus com reforço.....	105
TABELA 38 -	Resultado do tratamento de dados dos ensaios de resistência a compressão do cedrinho.....	109
TABELA 39 -	Resultado do tratamento de dados dos ensaios de resistência a compressão do pinus.....	109
TABELA 40 -	Resultado do tratamento de dados dos ensaios de resistência a flexão do cedrinho.....	110

TABELA 41 -	Resultado do tratamento de dados dos ensaios de resistência a flexão do cedrinho com reforço.....	110
TABELA 42 -	Resultado do tratamento de dados dos ensaios de resistência a flexão do pinus.....	110
TABELA 43 -	Resultado do tratamento de dados dos ensaios de resistência a flexão do pinus com reforço.....	111

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - Propriedades e características da barra GFRP STRATUS FRP 5.0 mm.....	51
QUADRO 2 - Descrição, usos, cor e vantagens do adesivo Tecbond FM Quartzolit bicomponente.....	53
QUADRO 3 - Propriedades e características do adesivo Tecbond FM Quartzolit bicomponente.....	53
QUADRO 4 - Descrição da composição de cada amostra.....	57
QUADRO 5 - Modos de falha em vigas de madeira armadas à flexão com barras de GFRP	86

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 CONTEXTO, PROBLEMATIZAÇÃO E JUSTIFICATIVAS	13
1.2 HIPÓTESES, QUESTÃO, OBJETIVOS E LIMITAÇÕES DA PESQUISA.....	16
1.2.1 Hipóteses	16
1.2.2 Questão	17
1.2.3 Objetivo geral	17
1.2.4 Objetivos específicos	17
1.2.5 Limitações	18
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 MATERIAIS ENVOLVIDOS.....	20
2.1.1 A madeira de reflorestamento	20
2.1.2 O polímero reforçado com fibra	23
2.1.3 O adesivo	29
2.2 TÉCNICAS DE REFORÇO ESTRUTURAL EM VIGAS DE MADEIRA.....	30
2.3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	33
2.3.1 Conceitos fundamentais adotados	33
2.3.2 Dimensionamento teórico de vigas de madeira com reforço estrutural	35
2.4 SÍNTESE DO CAPÍTULO	40
3 METODOLOGIA DA PESQUISA	41
3.1 MÉTODOS CIENTÍFICOS ADOTADOS	41
3.1.1 Classificações da pesquisa	41
3.1.2 Delineamento da pesquisa	42
3.2 DESCRIÇÃO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL	43
3.2.1 Madeiras selecionadas	44
3.2.2 Caracterização simplificada das madeiras	45
3.2.4 Barras de GFRP	50
3.2.5 Adesivo	52
3.2.6 Vigas de madeira	53
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	58
4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS MADEIRAS	58
4.1.1 Caracterização simplificada das madeiras - Ensaio de resistência à compressão paralela as fibras da madeira Cedrinho	59

4.1.2 Caracterização simplificada das madeiras - Ensaio de resistência à compressão paralela as fibras da madeira Pinus.....	62
4.2. RESISTÊNCIA À FLEXÃO DAS VIGAS DE MADEIRA.....	66
4.2.1 Viga referência de Cedrinho.....	66
4.2.2 Viga de Cedrinho com reforço	70
4.2.3 Viga referência de Pinus	73
4.2.4 Viga de Pinus com reforço	76
4.3 SÍNTESE E COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS	80
5 CONCLUSÕES.....	88
REFERÊNCIAS	90
APÊNDICE A – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO PARALELA AS FIBRAS.....	97
A.1 AMOSTRA DE CEDRINHO.....	97
A.2 AMOSTRA DE PINUS.....	98
APÊNDICE B – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA A FLEXÃO	100
B.1 VIGA REFERÊNCIA DE CEDRINHO.....	100
B.2 VIGA DE CEDRINHO COM REFORÇO	102
B.3 VIGA REFERÊNCIA DE PINUS	104
B.4 VIGA DE PINUS COM REFORÇO	105
APÊNDICE C – TRATAMENTO DE RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO PARALELA AS FIBRAS	109
C.1 AMOSTRA DE CEDRINHO.....	109
C.2 AMOSTRA DE PINUS	109
APÊNDICE D – TRATAMENTO DE RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO DE QUATRO PONTOS.....	110
D.1 AMOSTRA DE CEDRINHO.....	110
D.2 AMOSTRA DE CEDRINHO COM REFORÇO	110
D.3 AMOSTRA DE PINUS.....	110
D.4 AMOSTRA DE PINUS COM REFORÇO	111

1 INTRODUÇÃO

A madeira é considerada um dos materiais de construção mais antigos da história humana, com especulações de seu uso há mais de 10.000 anos. Na Europa, a *longhouse* neolítica é um dos grandes exemplos do uso desse material para fins habitacionais (EESCJR, 2022).

Devido as suas propriedades mecânicas, como elevada resistência à tração e à compressão, tem ampla aplicabilidade na construção civil, desde grandes edifícios comerciais a habitações residenciais de pequeno porte, além dos seus usos mais popularizados no cenário brasileiro como partes secundárias da estrutura (caibros e terças) ou com fins decorativos (EESCJR, 2022). Além disso, por ser um material natural, oriundo de fontes renováveis, gerando menor emissão de gases do efeito estufa em relação aos métodos construtivos tradicionais, durante toda sua cadeia produtiva, sua utilização é tendência global em termos de construções sustentáveis.

Segundo Calil Júnior e Brito (2010), a madeira é um material muito durável quando utilizada com tecnologia, pois pode ser efetivamente protegida contra a deterioração por período de 50 anos ou mais e, quando tratada por processos preservativos, requer pouca manutenção e pinturas.

Em contraponto às vantagens apresentadas, é necessário apontar que a madeira pode apresentar defeitos naturais como nós ou modificação nas direções das fibras, fatores que influenciam na sua qualidade e nos valores de suas propriedades mecânicas. No caso do uso da madeira serrada existe ainda a limitação nas suas dimensões comerciais, sendo essa uma condição determinante para o seu uso.

Portanto, conforme adverte Nahuz (2013), na escolha da madeira correta para um determinado uso, devem-se observar quais as propriedades e os respectivos níveis requeridos para que a madeira possa apresentar desempenho satisfatório. Esse procedimento é primordial, especialmente em países tropicais como o Brasil, onde a variedade e o número de espécies de madeiras disponíveis na floresta são expressões de sua biodiversidade (NAHUZ, 2013).

Na busca por soluções a estas limitações, ao longo dos anos, têm sido realizadas pesquisas científicas que se ocupam do desenvolvimento de sistemas estruturais construtivos, de forma a minimizar os efeitos das condicionantes naturais e do desgaste causado pelo tempo durante o desempenho da função estrutural a que se destina a peça de madeira.

Nesta direção, este trabalho analisou o uso de barras de reforço, compostas de polímero reforçado com fibra de vidro (GFRP - do inglês *Glass Fiber Reinforced Polymer*), como proposta para fortalecer vigas de madeira maciça de reflorestamento, de dois tipos específicos,

a fim de variar a classe de resistência: uma Conífera, que é o Cedrinho (*Erismia uncinatum*) e outra Dicotiledônea, que é o Pinus (*Pinus elliottii*).

Visando proporcionar uma linha de continuidade na leitura, este capítulo inicial foi dividido somente em três grandes seções; uma que traz o contexto, problematização e justificativas para a realização do trabalho; outra que identifica as hipóteses, questões e objetivos da pesquisa e; finalmente, uma terceira seção que relata a estrutura de todo o trabalho.

1.1 CONTEXTO, PROBLEMATIZAÇÃO E JUSTIFICATIVAS

Segundo os preceitos da Teoria das Estruturas, elementos estruturais, quando em uso - submetidos às solicitações, absorvem e transferem cargas externas até o solo, além de distribuir cargas internas correspondentes (força normal, força cortante e momentos), resultando em deformações e tensões na estrutura das edificações que não devem ultrapassar os limites de resistência e de deformação estabelecidos em projeto. Em síntese, segundo Soriano (2005, p.2), as ações externas provocam deformação na estrutura e, conseqüentemente, tensão “em cada um de seus pontos materiais”. Nesse sentido, Ricardo (1978, p. 5), explica que “as estruturas são o suporte material para o transporte de esforços, forças ou binários”.

Deve-se observar que, ao longo do tempo, as estruturas, além de submetidas as solicitações de uso, podem submeter-se ao aumento de cargas e até a desgastes resultantes da degradação natural, abalos e/ou acidentes, fatores estes que podem levar a uma decaída na eficiência do elemento estrutural. Diante dessas situações, uma interação entre os materiais utilizados, na forma de reforço no elemento estrutural, pode otimizar a estrutura como um todo, proporcionando maior segurança e funcionalidade às solicitações.

Por sua vez, a madeira usada como material de construção apresenta uma excelente capacidade de resistência às solicitações resultantes de esforços estruturais, também não necessita de grandes manutenções, caracterizando-se como um material durável, estando o maior desafio para seu uso no conhecimento das dimensões necessárias para atender a estas solicitações. Nessa esteira, Calil Júnior e Brito (2010) explicam que a durabilidade da madeira é a sua propriedade de resistir, em maior ou menor grau, ao ataque de agentes destruidores, sob condição natural de uso.

Em estruturas de madeira existentes, tanto a seção transversal como as propriedades do elemento podem ser reduzidas devido a deterioração e a danos mecânicos e biológicos que, segundo Calil Júnior e Brito (2010, p.40) são decorrentes de “duas causas principais: agentes

bióticos (vivos) e agentes abióticos (não vivos)”. Ambos influenciam a capacidade de carga e a manutenção de elementos isolados ou da construção como um todo. Na avaliação de estruturas de madeira, danos ou falhas devem ser detectados e avaliados quanto à resistência e à facilidade de manutenção do elemento de madeira.

Dessa forma, o uso de reforços em vigas de madeira pode ser uma solução ao desafio relacionado as dimensões, além de contribuir para o aumento da vida útil da estrutura, sujeita à deterioração ou dano ao material ou, ainda, a mudança de uso.

De maneira a ampliar as possibilidades do uso de estruturas de madeira de menor dimensões, estudos envolvendo a interação de dois ou mais elementos usados em conjunto na forma de reforço, compondo assim um novo elemento estrutural, vem sendo propostos.

Em 1970, Lantos completou um programa experimental sobre vigas de madeira reforçadas com barras de aço. Trabalhou em uma análise teórica do comportamento de vigas mistas, verificando experimentalmente fórmulas desenvolvidas para tensões de aderência entre aço e madeira e para flechas da viga. O reforço em vigas de madeira com barras de aço redondas, próximo ao topo e ao fundo, proporcionou ganhos calculados de rigidez de até 77%, com o uso de apenas 2% de armadura de aço. Proporcionalmente, vigas de madeira de menor qualidade obtiveram maior ganho a partir de determinado percentual de reforço, se comparadas a vigas de melhor qualidade.

Com relação aos reforços metálicos, as barras de aço também foram utilizadas por Dziuba (1985) e Bulleit, Santberg, Woods, (1989). Enquanto aumentos significativos na resistência e rigidez puderam ser alcançados, os problemas encontrados no uso do reforço metálico em vigas de madeira, geralmente estavam relacionados a incompatibilidades entre a madeira e o metal (DAGHER; LINDYBERG, 2000). Essas incompatibilidades incluíam as diferenças entre a higro-expansão e rigidez da madeira e o reforço metálico e podiam estar próximas à linha de cola.

Um dos materiais de reforço utilizados como alternativa ao reforço metálico é o polímero reforçado com fibra (FRP - do inglês *Fiber-Reinforced Polymer*), disponível na forma de chapas, hastes e barras (GENTILE; SVECOVA; RIZKALLA, 2002; FIORELLI; ALVES, 2003). Atualmente, polímeros reforçados com fibra de carbono (CFRP), fibra de vidro (GFRP) e fibra de basalto (BFRP) são os principais tipos de reforços FRP (ALAM; ANSELL; SMEDLEY, 2009; GARCIA; ESCAMILLA; GARCÍA, 2013; LI *et al.*, 2014).

A recomendação para o uso de polímeros reforçados com fibras (FRP) se deve ao fato deste material apresentar vantagens peculiares como flexibilidade de uso e praticidade, rigidez adaptável aos critérios de projeto, além de alta resistência à tração, imunidade à corrosão,

facilidade de aplicação em locais de difícil acesso, capacidade de deformação, uso em tamanhos e geometrias diversas (FIB BULLETIN 14, 2001).

Os primeiros experimentos envolvendo o reforço de elementos de madeira usando compósitos de FRP estão documentados na literatura de Bulleit (1984). Já o reforço de madeira laminada colada usando placas de FRP recicláveis foi investigado experimentalmente e numericamente com um modelo não linear por Raftery e Harte (2011) e Raftery e Harte (2013).

A partir do início da década de 1990, quando Plevris e Triantafillou (1992) aplicaram pela primeira vez FRP unidirecional para fortalecer as estruturas de madeira, estudos se sucederam argumentando que, com o reforço de FRP na zona de tração, existe uma melhoria na capacidade de carga, na rigidez à flexão e na ductilidade de deformação das vigas de madeira (DE LORENZIS; SCIALPI; LA TEGOLA, 2005; RAFTERY; WHELAN, 2014; MORALES-CONDE; RODRÍGUEZ-LIÑÁN; RUBIO-DEHITA, 2015). Além disso, Corradi *et al.* (2006) também observaram aumento na capacidade de resistência ao cisalhamento das estruturas de madeira através do reforço de FRP.

Outras pesquisas (GENTILE; SVECOVA; RIZKALLA, 2002; CORRADI; BORRI, 2007; RAFTERY; WHELAN, 2014) trataram da aplicação de materiais compósitos no reforço de vigas de madeira, onde foi considerada a infusão de resina em ranhuras feitas na própria estrutura de madeira, para a fixação de barras FRP, em um processo de reforço.

Atualmente, as técnicas de reforço mais comuns usando FRP são, segundo o ACI 440.2R (2008), o reforço colado externamente (EBR – do inglês *Externally-Bonded Reinforcing*) e o reforço colado próximo à superfície (NSM – do inglês *Near-Surface Mounted*). A técnica de reforço EBR tem sido amplamente estudada e utilizada, não só em estruturas de concreto, mas também em estruturas de madeira. Segundo De Lorenzis e Teng (2007), a técnica NSM é mais recente, mas sua eficácia no ganho de resistência à flexão e ao cisalhamento é bastante relevante.

A literatura publicada sobre a utilização de barras de FRP para o reforço de elementos de madeira maciça de baixa rigidez ou macia é limitada. Hastes de GFRP foram usadas para reforçar madeira tratada com creosoto (GENTILE; SVECOVA; RIZKALLA, 2002) e têm sido usadas como reforço de cisalhamento em elementos de madeira (SVECOVA; EDEN, 2004). Fibras de aço carbono de alta resistência também tem sido usadas como reforço em madeira (BORRI; CORRADI, 2011). Segundo estudo de Raftery, Harte e Rodd (2009), considerando que a resistência à tração do FRP é muito superior à da madeira, o GFRP foi selecionado como o tipo de fibra mais adequado devido ao seu custo ser relativamente baixo se comparado à fibra de carbono e aramida, também por ser um material reciclável e por ter o viniléster como matriz,

uma resina capaz de resistir à absorção de umidade, importante condicionante no uso da técnica de colagem.

Uma investigação do comportamento à flexão de vigas de madeira da espécie Yellow Meranti, reforçadas com barras de GFRP, foram pesquisadas por Ahmad e Saleh (2010), no experimento todas as vigas foram ensaiadas até a falha sob carregamento de quatro pontos. Os resultados mostraram que as vigas reforçadas tiveram um desempenho melhor do que a viga controle.

Em termos de reforço em vigas de madeira, a geometria das ranhuras entalhadas na madeira (se circulares ou retangulares), mostrou ser influente na melhoria a rigidez e na capacidade de momento último, sendo a ranhura de geometria circular a que apresentou melhores resultados, no caso do uso de reforço com barras de GFRP em vigas de madeira laminada colada de baixo teor. O uso de várias barras de menor diâmetro com o objetivo de aumentar a área de contato na mesma ranhura, não apresentou melhora significativa para o elemento (RAFTERY; WHELAN, 2014).

Pelo exposto, a utilização de armaduras não metálicas em substituição ao uso de barras de aço como reforço estrutural em vigas de madeira, oferece soluções promissoras, principalmente em relação ao aumento de rigidez, capacidade de carga e, durabilidade, sem grande acréscimo de peso.

Sendo assim, considerando a possibilidade de manifestações patológicas e as dificuldades enfrentadas, principalmente na interação entre elementos metal e madeira, há necessidade de incentivo ao desenvolvimento de pesquisas sobre o uso de novos materiais, aplicados a novas tecnologias, para o uso na construção civil, especialmente para o caso da madeira maciça de reflorestamento em conjunto com outros materiais, como é o caso dos materiais compósitos, visando a melhoria do desempenho da peça estrutural, de maneira que a falha do elemento estrutural quando do tipo frágil não venha a ser também catastrófica (GARDNER, 1989), que justificaram o desenvolvimento desta pesquisa.

1.2 HIPÓTESES, QUESTÃO, OBJETIVOS E LIMITAÇÕES DA PESQUISA

1.2.1 Hipóteses

Esta pesquisa adotou como hipótese geral, que o uso da técnica de reforço, com barras compostas de polímero reforçado com fibra de vidro (GFRP), melhora o desempenho estrutural de vigas de madeira, e que o uso deste reforço possibilita o uso de peças estruturais de madeira

maciça de reflorestamento dos tipos Cedrinho e Pinus em dimensões comerciais. Após a efetivação do programa experimental, os resultados obtidos devem comprovar aumento nos valores de resistência à flexão e de rigidez nas vigas de madeira que receberam as barras de reforço de GFRP.

Foi hipótese secundária da pesquisa, que tal desempenho pode ser avaliado e comparado a partir da análise do comportamento à flexão de vigas de madeira reforçadas com barras de GFRP e sem reforços.

1.2.2 Questão

A partir da identificação do contexto e das justificativas e, ainda, das hipóteses de pesquisa, pode-se dizer que a questão a ser respondida por esse trabalho foi a seguinte: O uso de barras de reforço de GFRP em vigas de madeira pode ser uma solução ao desafio relacionado as limitações quanto as dimensões, contribuindo para a melhoria de desempenho da estrutura?

1.2.3 Objetivo geral

Esta pesquisa teve como objetivo geral analisar o comportamento à flexão de vigas de madeira do tipo Conífera e do tipo Dicotiledônea, reforçadas com barras de GFRP em comparação às vigas referência sem o reforço destas mesmas madeiras.

1.2.4 Objetivos específicos

Em decorrência do objetivo geral, foram objetivos específicos:

- Avaliar experimentalmente o comportamento da carga versus deslocamento das vigas de madeira reforçadas com barras de GFRP e sem reforços;
- Analisar os valores de contribuição percentual do aumento da resistência à flexão referente e comparativamente ao tipo de madeira em que foi aplicado o reforço com barras de GFRP;
- Contribuir para a avaliação do comportamento de estruturas de madeira reforçadas com barras de GFRP em situação de solicitação à flexão, a partir dos resultados obtidos nesta pesquisa experimental.

1.2.5 Limitações

Apesar de a temática apresentada suscitar inúmeros desdobramentos, importante registrar que esta pesquisa ficou delimitada ao estudo de dois tipos diferentes de madeiras maciças comercialmente utilizadas para a execução de vigas estruturais, a fim de variar a classe de resistência: uma Conífera, que é o Cedrinho (*Erisma uncinatum*) e outra Dicotiledônea, que é o Pinus (*Pinus elliottii*). Sendo assim, é preciso ter claro que os resultados que estão apresentados no capítulo 4 são válidos especificamente para este estudo, muito embora possam servir como referência para situações semelhantes, uma vez que a metodologia poderá ser aplicada em outras investigações.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos. O presente capítulo, denominado de INTRODUÇÃO, traz o contexto, o problema e as justificativas para a pesquisa; apresenta suas hipóteses, questão e objetivos, além de expor a estrutura deste trabalho.

O referencial teórico selecionado no capítulo 2, denominado de REVISÃO BIBLIOGRÁFICA, discorre inicialmente sobre os materiais envolvidos no estudo, quais sejam: madeiras de reflorestamento, polímeros reforçados com fibras, e adesivos. Na sequência, apresenta as técnicas de reforço estrutural utilizadas em vigas de madeira. Também se ocupa de registrar uma fundamentação teórica, na qual expõe os conceitos fundamentais adotados e as bases necessárias para o dimensionamento teórico de vigas de madeira com reforço estrutural e, com isso, para a análise dos resultados experimentais obtidos. Como comentário final do capítulo, a quarta e última seção traz uma síntese sobre este capítulo como preparação para os capítulos seguintes, de forma a dar um corpo único ao texto e prepará-lo para as conclusões finais.

No capítulo 3 são apresentados os materiais e métodos de estudo utilizados. Denominado de METODOLOGIA DA PESQUISA, possui duas grandes seções. A primeira apresenta as classificações, estratégias e o delineamento da pesquisa. A segunda detalha o programa experimental, aprofundando os procedimentos realizados.

O capítulo 4 foi intitulado RESULTADOS E DISCUSSÕES. É destinado à apresentação e discussão dos resultados obtidos no programa experimental realizado. Também se ocupa em comparar tais resultados com aqueles apresentados em outras pesquisas sobre o tema.

Nessa lógica, no capítulo 5, denominado de CONCLUSÕES, são retomados as hipóteses e os objetivos para a apresentação das conclusões obtidas e, também, de possíveis sugestões para atividades futuras, visando uma continuidade e complementação à pesquisa. Ao final do trabalho estão descritas as referências utilizadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo está estruturado em quatro seções, alinhadas ao contexto do estudo que foi proposto. Na primeira, discorre-se sobre os três materiais envolvidos na pesquisa: a madeira de reflorestamento; o polímero reforçado com fibra e; o adesivo. Na sequência, a segunda seção aborda as técnicas de reforço estrutural que vem sendo utilizadas em vigas de madeira. A terceira seção traz uma fundamentação teórica, na qual expõe os conceitos fundamentais adotados e as bases necessárias para o dimensionamento teórico de vigas de madeira com reforço estrutural e, com isso, para a análise dos resultados experimentais obtidos e, como encerramento, a quarta e última seção traz uma síntese como preparação para os capítulos seguintes.

2.1 MATERIAIS ENVOLVIDOS

2.1.1 A madeira de reflorestamento

De acordo com dados da FAO (2020 *apud* ABIMCI, 2022), atualmente as florestas mundiais ocupam área total equivalente a 4,0 bilhões de hectares, sendo 3,74 bilhões de hectares representados por florestas nativas (93% do total) e 291 milhões de hectares (7%) por florestas plantadas. De acordo com o mesmo relatório da ABIMCI (2022), no Brasil, a cobertura florestal atual é de cerca de 495 milhões de hectares (60% do território nacional), sendo 485,4 milhões de hectares (98,1%) representados por florestas nativas e; 9,5 milhões de hectares (1,9%) referentes às florestas plantadas (principalmente eucalipto e pinus). A Figura 1 ilustra essa situação.

Figura 1 – Situação das florestas no Brasil (2021)



Fonte: Extraído de ABIMCI (2022, p.49).

Nesse sentido, a ABIMCI (2022) explica que as florestas plantadas são responsáveis pelos maiores níveis de produção de madeira em tora da indústria florestal madeireira-nacional.

Botanicamente, árvores são classificadas como fanerógamas - grupo de plantas superiores, de elevada complexidade anatômica e fisiológica, que se subdivide em Gimnospermas e Angiospermas. Dentro do grupo das Gimnospermas destacam-se as Coníferas, conhecidas internacionalmente como madeiras moles ou *softwoods* (CALIL JÚNIOR; BRITO, 2010). No grupo das Angiospermas há duas categorias, as Monocotiledôneas e as Dicotiledôneas. Na categoria das Monocotiledôneas encontram-se as palmas e gramíneas enquanto as Dicotiledôneas são usualmente designadas como madeira dura ou *hardwoods*, sendo desta última categoria as principais espécies utilizadas na construção civil no Brasil (CALIL JÚNIOR; BRITO, 2010).

A utilização do elemento madeira como material construtivo, oriunda do fato de existir na natureza em profusão, ser um material de fonte renovável e, apresentar características mecânicas e durabilidade que possibilitam este uso. Ao longo dos anos e com a crescente aplicação da madeira como elemento estrutural, surgiu a necessidade de desenvolvimento de estudos para a melhor compreensão da madeira e de suas propriedades características. Estes estudos elevaram sua condição de uso, conduzindo ao dimensionamento da madeira como elemento estrutural para diferentes utilizações e propósitos aplicados à construção civil. A madeira em comparativo a outros materiais de uso estrutural, apresenta uma relação resistência/peso elevada (PFEIL; PFEIL, 2003), sendo essa considerada também uma vantagem para sua aplicação.

A madeira, por ser um material vivo lenhoso, apresenta características anisotrópicas (valores diferentes, variados de acordo com a direção de crescimento) e heterogêneas (composta por diferentes partes na sua essência); assim a resistência às tensões internas resultantes da tração ou expansão das fibras, e às forças exteriores, é um fator intrínseco as propriedades mecânicas, e que se apresenta de forma diferente, variando de acordo com a direção de crescimento (axial, tangencial e radial) do elemento base (VIDE, 2016).

A orientação durante o crescimento da estrutura do lenho das árvores serve para atender as diferentes ações sofridas ao longo da vida, como a ação da gravidade (esforço de compressão) e a ação do vento (semelhante a um esforço de flexão).

A caracterização da madeira se baseia nas suas propriedades mecânicas, relativas a duas direções principais, longitudinal e transversal. Dessa forma, os ensaios usuais para caracterização estrutural de peças de madeira são ensaios à compressão e ensaios à flexão (CALIL JÚNIOR; BRITO; 2010).

A madeira pode ser considerada um material de comportamento estrutural frágil, resultante principalmente da natureza anisotrópica, o que significa que suas propriedades variam em diferentes direções, devido à organização das fibras que compõem a sua estrutura. Mesmo sendo um elemento altamente resistente à compressão ao longo das fibras, sua resistência à tração perpendicular às fibras é significativamente menor, o que torna a peça de madeira mais propensa a rachaduras e fraturas quando submetida a esforços de tração, o que pode comprometer sua integridade estrutural (VIDE, 2016).

Na sequência discorre-se sobre resistência à tração paralela às fibras, resistência à compressão paralela às fibras e, resistência à flexão estática de vigas de madeira.

a) Resistência à tração paralela às fibras

Em relação a sua estrutura fibro-anatômica, a madeira apresenta uma elevada resistência à tração paralela às fibras (axial) se comparado à compressão axial. Sua resistência a tração axial, segundo Carvalho (1996), pode ser até três vezes maior que sua compressão axial. O resultado da aproximação das fibras causado por solicitações é o aumento da coesão, que causa melhora significativa na aderência do elemento de madeira. A resistência a tração axial tem real importância para o uso de tirantes, nas ligações entre componentes estruturais e elementos de estruturas restauradas.

b) Resistência à compressão paralela às fibras

A resistência à compressão paralela as fibras é a reação resultante da carga aplicada na direção paralela as fibras em um elemento de madeira, por exemplo, uma ação aplicada em colunas de sustentação. A aplicação de carga no sentido paralelo as fibras geram uma solicitação, resultando na separação das fibras longitudinais, de forma a diminuir a coesão da estrutura, afetando a resistência global da peça estrutural (FARIA; NEGRÃO, 2009).

A resistência à compressão no sentido das fibras pode alcançar valores elevados, fato que eleva a importância desta propriedade no processo de dimensionamento, principalmente em pilares. No caso do uso da madeira em elementos sujeitos a compressão, como é o caso de pilares, existe a necessidade de se adotar maior atenção referente ao fenômeno de encurvadura, resultante da condição de a madeira apresentar baixo módulo de elasticidade, fator prejudicial ao desempenho em relação a resistência à compressão paralela às fibras (MARTINS, 2009).

c) Resistência à flexão estática

Assim como a madeira apresenta uma elevada resistência à tração paralela as fibras, também apresenta uma elevada resistência à flexão estática, podendo chegar a se equiparar em valores.

Embora as peças de madeira aplicadas estruturalmente expressem considerável capacidade para resistir aos esforços de tração ou compressão, é nas peças expostas a ação de flexão, como vigas, que a madeira revela todo o seu potencial como elemento construtivo.

Um exemplar de espécime de madeira resistente é o Pinho Bravo, que apresenta uma resistência à flexão estática de 140 MPa (em uma peça sem defeitos), representando 90% do seu valor de tração axial. Segundo Pfeil e Pfeil (2003), os esforços de flexão em peças de madeira resultam em dois tipos de comportamento: Esforços de tração na zona de extradorso e esforços de compressão na zona de intradorso. A ação destes dois comportamentos pode levar a uma pré-ruptura na região de compressão quando ultrapassado o limite de tolerância à resistência à compressão, e quando a peça chega ao limite de tensão resistente à tração, esta sofre uma ruptura por estilhaçamento das fibras de extradorso. Além das considerações citadas anteriormente, é preciso atentar para o módulo de elasticidade, um parâmetro mecânico que serve para medir a rigidez de um elemento, sendo sua resistência à deformação elástica (PFEIL; PFEIL, 2003).

2.1.2 O polímero reforçado com fibra

O surgimento de materiais *Fiber-Reinforced Polymer* (FRP), ou polímero reforçado com fibra, e seu uso como armadura em elementos estruturais submetidos à flexão e ao cisalhamento, se deu pela necessidade de suprir as limitações do aço e minimizar os danos ambientais causados pela extração dele.

Compósitos de FRP

O termo compósito pode ser atribuído, segundo a ACI 440 R (1996), a uma ligação entre dois ou mais materiais, separados por uma área de interação identificável entre eles. Esta nova estrutura apresenta propriedades mecânicas dependentes das propriedades dos materiais constituintes e da interface que os une. Os materiais compósitos são formados por duas ou mais fases descontínuas (reforço), embebidas em uma fase contínua (matriz).

Segundo a ACI 440 R (1996), a interface, em geral, recebe um tratamento superficial, com o objetivo de garantir melhor aderência entre o componente e a matriz polimérica e, a

mecânica de resistência da nova estrutura está ligada a geometria e as propriedades do reforço. Assim as propriedades finais da barra de FRP estão intrinsicamente ligadas ao tipo de fibra empregada no processo de fabricação (ACI 440 R, 1996). Na indústria da construção civil, as principais fibras empregadas na fabricação das barras são as fibras de aramida, carbono e fibra de vidro.

Barras de GFRP

A tecnologia responsável pela fabricação das barras de FRP origina-se de uma matriz inteligente mais uma resina polimérica, sendo que desta combinação resulta uma barra capaz de resistir a ataques físicos e químicos. O uso de barras de FRP como material na construção civil atribui uma melhora na durabilidade das estruturas, reduzindo os efeitos da fadiga e promovendo o desenvolvimento sustentável da edificação como um todo (KOCÃOZ; SAMARANAYAKE; NANNI, 2005).

As barras de GFRP são constituídas por um núcleo de fibras estiradas de alta resistência, impregnadas por uma resina (matriz polimérica), caracterizando-se por apresentar propriedades anisotrópicas (maior resistência longitudinal em relação a resistência transversal), após um processo de fabricação, o qual faz a combinação entre a matriz polimérica e as fibras de vidro, resultando em um material de elevada razão entre seu comprimento e o raio, sendo que sua maior resistência se apresenta no sentido longitudinal, de características visuais semelhantes a barra de aço, mas com diferentes propriedades mecânicas (COUTO, 2007).

A Tabela 1 apresenta as propriedades das fibras mais usadas na fabricação de GFRP.

Tabela 1 – Propriedades das fibras de vidro usadas na fabricação de barras de GFRP

	Vidro-E	Vidro álcali resistente
Resistência à tração (MPa)	3430-3528	1764-3430
Módulo de deformação (GPa)	72,5-73,5	68,6-7,0
Alongamento (%)	4,8	4,5-2,3
Massa específica (g/cm ³)	2,6	2,27
Diâmetro (µm)	8-12	

Fonte: Extraída e adaptada de Uomoto *et al.* (2002).

Financeiramente, a fibra de vidro oferece um ótimo custo-benefício, apresentando-se nas versões: vidro-E, Vidro-S e Vidro álcali resistente (COUTO, 2007; BENMOKRANE *et al.* 2002).

No mundo, o uso de barras de FRP como reforço estrutural, está condicionado pela vigência de normas de aplicação, como a ACI 440.1R (2015), que é uma Norma Técnica Americana e a CAN/CSA S806 (2002), que é uma Norma Técnica Canadense.

Matriz polimérica e caracterização das barras de GFRP

A responsabilidade pela descarga de tensões entre as fibras que compõe a barra de GFRP e o material confinante, é da matriz polimérica. Segundo Couto (2007), as resinas denominadas termofixas (poliéster, vinil éster e epóxi) são empregadas na fabricação das barras e suas propriedades como mostrado na Tabela 2 (FIB 9.3 TG (2003)).

Tabela 2 - Propriedades das matrizes poliméricas dos compósitos de FRP

PROPRIEDADES	MATRIZ		
	Poliéster	Epóxi	Vinil Éster
Massa específica (g/cm ³)	1,2 – 1,4	1,2 – 1,4	1,15 - 1,35
Resistência à tração (MPa)	34,5 – 104	55 – 130	73 – 81
Módulo longitudinal (GPa)	2,1 – 3,45	2,75 – 4,10	3,0 – 3,5
Coefficiente de Poisson	0,35 – 0,39	0,38 – 0,40	0,36 – 0,39
Coefficiente de dilatação térmica (10 ⁻⁶ /°C)	55 – 100	45 – 65	50 – 75
Teor de umidade (%)	0,15 – 0,60	0,08 – 0,15	0,24 – 0,30

Fonte: FIB 9.3 TG (2003).

Originalmente, elementos compósitos de FRP são materiais de baixo peso específico, considerado mais leve que aço em torno de 4 a 6 vezes, fato que corrobora a otimização do processo construtivo desde o manejo até a instalação da estrutura (RIBEIRO, 2009; MACHADO, 2002).

O comportamento das barras de GFRP varia de acordo com alguns parâmetros como o tipo de fibra usado na sua composição, direção longitudinal e transversal desta e o percentual de resina usada em proporção a fibra. Também o coeficiente de dilatação térmica das barras depende da direção das fibras e composição da mistura.

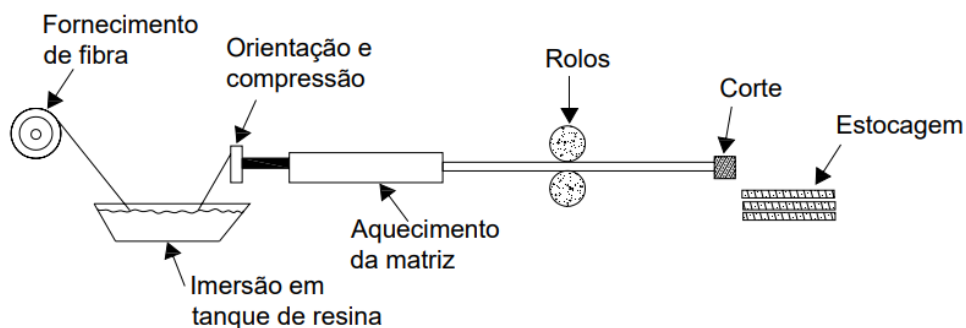
O processo industrial fabril está ligado a condição de aderência das barras de GFRP, sendo o responsável por atribuir as propriedades mecânicas e impressão da superfície da barra. O processo de fabricação deve garantir a qualidade da barra, através da qualidade da resina empregada.

Processo de fabricação das barras de GFRP

Segundo o ACI 440 R (1996), são três tipos de processos de fabricação para componentes estruturais de FRP: O “*Filament Winding*”, um processo usado para a fabricação de tubos, tanques e outros materiais normalmente cilíndricos; o processo de compactação a vácuo, usado para a fabricação de laminados e o processo de pultrusão.

O método de pultrusão é o mais utilizado na produção das barras de GFRP, esquematizado na Figura 2, considerado simples, forma barras de orientação oblíqua, de comprimento determinado pelas necessidades do uso a que se destina, condicionado a logística e transporte, suas fibras são impregnadas em resina, catalisador e aditivos, resultando em um material compósito que é então expandido para a formação do perfil (CAN/CSA S806, 1996). Esse método se beneficia da força da fibra na direção longitudinal para a condição de extrusão, proporcionando um ganho em eficiência na produção das barras de resistência elevada, de qualidade, garantindo menor desperdício (MICALI, 2010).

Figura 2 - Processo de pultrusão na fabricação de barras de GFRP



Fonte: Couto (2007).

Para atender os parâmetros de aderência, as barras de GFRP recebem diferentes tratamentos antes do seu endurecimento, podendo ser um procedimento de filamentação de fibra em formato helicoidal ao longo de todo o seu comprimento, moldagem de entalhes nas barras, aplicação de um filme texturizado e após remoção do mesmo, e impregnação de agregados finos em sua superfície (COUTO, 2007; BAKIS *et al.*, 2002). A Figura 3 apresenta alguns modelos de tratamento superficial em barras de FRP.

Figura 3 - Modelos de tratamento superficial em barras de FRP



Fonte: FIB 9.3 TG (2007).

Propriedades mecânicas

As barras de GFRP apresentam várias vantagens sobre os materiais tradicionais, nomeadamente a sua leveza, elevada resistência e reduzidos requisitos de manutenção. No entanto, a baixa rigidez, a ruptura frágil e o comportamento frágil ao fogo vêm dificultando o uso generalizado de materiais GFRP em aplicações de engenharia civil (CORREIA; ALMEIDA; FIGUEIRA, 2011); CORREIA *et al.*, 2013; CORREIA; BAI; KELLER, 2015).

As propriedades mecânicas do material compósito sofrem influências de diferentes fatores, como a corrosão (deformações na superfície causadas por agentes químicos), umidades, exposição ao fogo e raios ultravioletas, variação de temperaturas (ACI 440, 1996).

Estes fatores condicionam a escolha do tipo de fibra, de resina e se exigem a incorporação de aditivos a esta resina, para a fabricação dos vergalhões.

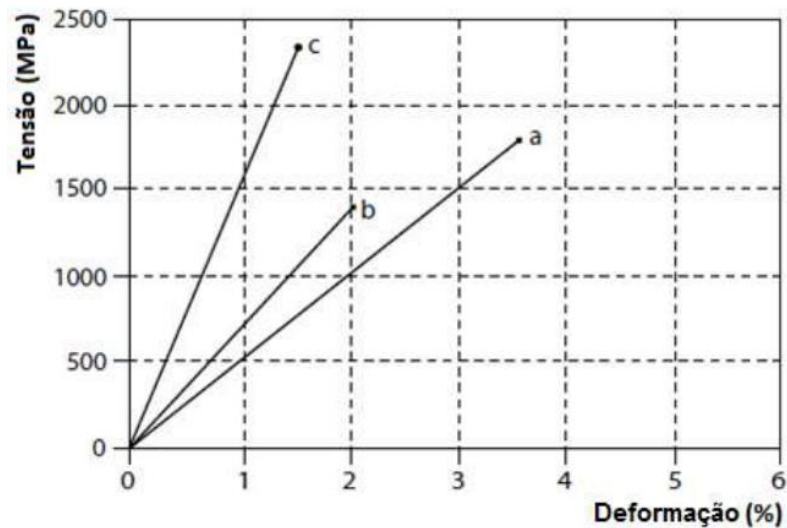
Resistência a tração e módulo de elasticidade

As propriedades mecânicas de um produto estão relacionadas às propriedades e proporções oriundas dos seus materiais constituintes (UOMOTO *et al.*, 2002).

Considerando a utilização de barras de FRP como material de reforço, seu comportamento sob tensão precisa ser conhecido. As barras de FRP apresentam um comportamento frágil quando submetidas a uma força de tração, consistindo em uma relação linear elástica até sua ruptura, que ocorre de forma brusca (ACI 440.1R, 2006).

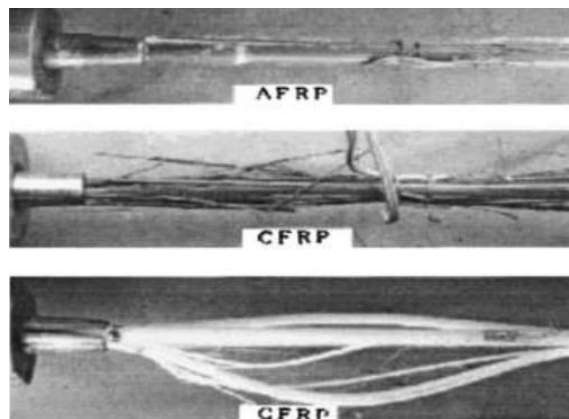
Pode-se observar na Figura 4 a representação dos diagramas tensão-deformação de barras FRP na direção das fibras e na Figura 5, pode-se ver a forma de ruptura das barras, características por tração.

Figura 4 - Representação de diagramas tensão-deformação de barras de FRP
(a)GFRP; (b) BFRP; (c) CFRP



Fonte: FIB TG 9.3 (2007).

Figura 5 - Representação de formas de ruptura de barras FRP por tração



Fonte: Uomoto *et al.* (2002).

A determinação da resistência à tração e do módulo de elasticidade das barras de FRP se dá através de ensaios de tração direta nas barras de acordo com a norma americana ACI 440.3R (2004), dentre outras normas técnicas existentes.

2.1.3 O adesivo

Segundo Broughton e Hutchinson (2003), cinco categorias de adesivos estão disponíveis no mercado, sendo: epóxis, poliuretanos, poliésteres, fenólicos e aminoplásticos. Por serem elementos de característica tixotrópica (capacidade de se liquefazer à medida que se aplica uma determinada quantidade de calor ou uma força mecânica) e de baixa retração de cura, os adesivos em geral, apresentam um bom desempenho de colagem tanto em ambiente controlado quanto para aplicação *in loco* (PIZZO, SMEDLEY, 2015).

Inicialmente os adesivos de base epóxi foram desenvolvidos para o uso em diferentes materiais, principalmente o concreto, e para o uso em reparos de peças estruturais *in loco*. Atualmente, formulações de epóxi foram desenvolvidas especificamente para uso em peças de madeira. As propriedades dos elementos reforçados estão intrinsecamente ligadas a qualidade e eficiência na execução do processo, resultando em uma peça estrutural o mais coesa possível.

O reforço em peças estruturais de madeira com barras de FRP é normalmente executado através da técnica de colagem adesiva (EBR ou NSM). Para a execução do processo de colagem de barras de FRP pultrudadas em peças de madeira pela técnica de NSM, o adesivo deve ser aplicado ao substrato de madeira e posteriormente a barra de FRP é aplicada ao adesivo sob pressão, de maneira que o adesivo envolva a barra de reforço.

A escolha do adesivo para aplicação no processo de reforço por colagem de barras de FRP à madeira deve ser realizada de maneira criteriosa, este deve apresentar capacidade de aderência tanto ao FRP quanto à madeira e ter resistência compatível as solicitações de uso da peça estrutural.

Devido à grande variedade de formulações epóxi disponíveis, a compatibilidade com os aderentes deve ser verificada pelo fabricante. *In loco*, o teor de umidade e a qualidade da superfície da madeira são difíceis de controlar e pode não ser possível atingir a pressão de adesão desejada. No processo de reforço (NSM), a camada de aplicação do adesivo, deve ser de 1 a 3 mm. As superfícies a serem coladas devem estar secas, livres de contaminantes, como agentes desmoldantes e poeira, e ter rugosidade superficial suficiente para dar suporte de aderência. A preparação da superfície deve ser realizada imediatamente antes da colagem, enquanto a preparação e aplicação do adesivo devem estar de acordo com as instruções do fabricante (SMEDLEY, CRUZ, PAULA, 2008).

2.2 TÉCNICAS DE REFORÇO ESTRUTURAL EM VIGAS DE MADEIRA

Estudos baseados em alternativas de reforço para elementos estruturais de madeira solicitados a flexão usando polímeros reforçados com fibras, na forma de barras, relatam aumentos significativos de resistência e rigidez em comparação com elementos não reforçados. (DAGHER *et al.*, 1996; MICELL; SCIALPI; LA TEGOLA, 2005)

Técnicas de reforço usando FRP podem ser realizadas de forma fácil e eficiente, sendo que o aumento de dimensões ou peso é insignificante ao membro reforçado. A base principal deste tipo de técnica é a ligação adesiva, considerada como método eficiente para a transferência de tensão entre dois materiais, evitando a concentração de tensão associadas aos fixadores mecânicos. Além disso, a ligação adesiva não exige técnicas adicionais para acabamento e os custos de montagem são menores. (BROUGHTON; HUTCHINSON, 2001)

O reforço de vigas de madeira em flexão usando barras, tiras, chapas ou outras formas estruturais de aço, ou FRP pultrudado tem sido objeto de pesquisa nos últimos 50 anos. O reforço pode ser implantado internamente por barras ou tiras coladas em ranhuras entalhadas nas faces de tração e compressão da peça estrutural (técnica NSM), ou aplicada externamente por colagem na face de tração (técnica EBR), mas não na face de compressão devido ao risco de falha por flambagem no elemento de FRP.

Experimentos para investigar o reforço de vigas de madeira maciça e madeira lamelada com reforço de CFRP, demonstraram que o uso de uma pequena porcentagem de armadura na ordem de 1,5-2,5% pode resultar em aumentos na resistência à flexão e rigidez de até 90% e 100%, respectivamente. Além disso, vigas armadas apresentaram menor variabilidade em suas propriedades do que vigas não armadas. Com quantidades crescentes de armadura de tração, a resposta carga-deflexão torna-se dúctil devido ao escoamento de compressão em altos níveis de deformação. (JOHNS; LACROIX, 2000; BORRI; CORRADI; GRAZINI, 2005; KLIGER; JOHANSSON; CROCETTI, 2008; LI; XIE; TSAI, 2009; NOWAK; JASIÉKO; CZEPIZAK, 2013).

Devido aos altos custos associados aos materiais de CFRP, vários pesquisadores (JOHNS; LACROIX, 2000; GENTILE; SVECOVA; RIZKALLA, 2002; ALAM; ANSELL; SMEDLEY, 2009; RAFTERY; HARTE, 2011) estudaram o reforço de flexão em elementos de madeira com GFRP. Já no caso do CFRP, grandes aumentos de resistência foram relatados quando se utilizam pequenas porcentagens de reforço. No entanto, os aumentos na rigidez foram menos significativos usando GFRP, devido à menor rigidez do material.

O Reforço Ligado Externamente (EBR) é uma técnica na qual o reforço do tipo tira/tecido de FRP é colado à superfície do elemento estrutural. Para garantir a aderência do reforço a superfície do elemento, é utilizada uma camada fina de adesivo (resina epóxi), aplicado de maneira uniforme. Os reforços ficam expostos ao meio ambiente. Os resultados mostraram que a principal razão para o acontecimento de falhas usando esta técnica é o descolamento do reforço.

O Reforço Colado próximo a Superfície (NSM) é uma técnica de reforço considerada eficiente em relação ao aumento da resistência ao cisalhamento e flexão da peça estrutural, consiste na incorporação de um elemento de reforço, como barras de GFRP ou aço, em ranhuras entalhadas na face da peça a ser reforçada, podendo ser aplicada em uma ou mais faces.

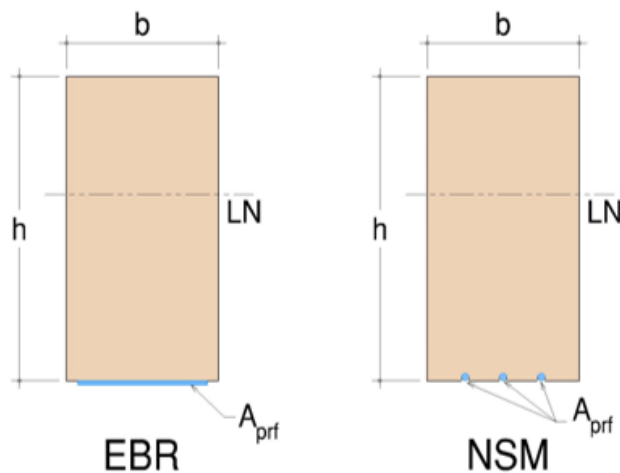
O NSM reduz a possibilidade de dissociação madeira-barras, devido ao processo de introdução do reforço na peça, o que aumenta a resistência do sistema composto. Uma investigação numérica foi desenvolvida para analisar a avaliação de danos em vigas de madeira reforçadas com tiras de CFRP, aplicando a técnica de reforço NSM, baseada na Mecânica de Danos Contínuos (do inglês *Continuum Damage Mechanics - CDM*), como alternativa ao método EBR, de maneira a sanar a principal falha deste método que é o descolamento do reforço. (KHELIFA; CELZARD, 2014)

Uma abordagem semelhante foi conduzida por Nowak *et al.* (2013), para replicar numericamente o comportamento de vigas de madeira reforçadas com barras de CFRP, resultando no aumento significativo da capacidade final da peça. As barras de CFRP foram coladas em ranhuras entalhadas nas vigas, aplicando a técnica NSM. Vigas reforçadas com duas barras de CFRP coladas alinhadas verticalmente resultaram em um aumento de 79% e 32% na capacidade de carga e rigidez, respectivamente. A técnica de reforço levou a uma perfeita ligação entre a madeira e o CFRP, e o modo de falha primário foi reconhecido como sendo devido à presença de nós e inclinação de grãos na zona de tração do elemento.

Em 2015, Lu *et al.* aplicaram a técnica NSM de reforço em vigas de madeira laminada colada. Além disso, testes de *pull-out* investigaram as características de ligação entre a abordagem de reforço baseada em NSM destas vigas e barras de CFRP.

A Figura 6 mostra um esquema representativo das duas técnicas de reforço, EBR e NSM.

Figura 6 - Representação dos sistemas EBR e NSM



Fonte: Adaptado de ACI 440.2R (2008).

Quando comparado ao EBR, o reforço NSM apresenta algumas vantagens, como:

(a) na quantidade de armadura *in situ*, o trabalho de instalação pode ser reduzido, uma vez que não é mais necessária a preparação da superfície além da ranhura (por exemplo, a remoção da cobertura não é necessária; as irregularidades da superfície da madeira podem ser mais facilmente acomodadas);

(b) o reforço NSM é menos propenso a descolar do substrato;

(c) os elementos NSM podem ser mais facilmente ancorados em membros adjacentes para evitar falhas de descolamento;

(d) Os elementos NSM são protegidos pela cobertura de madeira e, portanto, estão menos expostos a impactos acidentais e danos mecânicos, incêndios e vandalismo;

(e) a estética da estrutura reforçada é praticamente inalterada.

Na literatura são encontradas poucas publicações relacionadas às aplicações de FRP com a técnica NSM em estruturas de madeira, como por exemplo: Borri; Corradi; Grazini, 2005; Johnsson; Blanksvärd; Carolin, 2007 e Ahmad, 2010. Os resultados apontados nestes trabalhos revelam um bom desempenho da técnica NSM para aumento tanto da capacidade de resistência, quanto da rigidez.

2.3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.3.1 Conceitos fundamentais adotados

A parte inicial da NBR 7190 (ABNT, 2022) apresenta as propriedades da madeira como sendo condicionadas por sua estrutura anatômica, devendo distinguir-se os valores correspondentes à tração dos correspondentes à compressão, bem como os valores correspondentes à direção paralela às fibras dos correspondentes à direção perpendicular às fibras. Uma discussão sobre resistência à tração paralela às fibras, resistência à compressão paralela às fibras e, resistência à flexão estática de vigas de madeira foi apresentada no item 2.1.1.

Dessa forma, observa-se que se deve distinguir os conceitos de resistência, rigidez e dureza. E, para o entendimento e análise dos resultados do programa experimental proposto, ainda é necessária a explanação dos conceitos de ruptura frágil e dúctil. Sendo assim, todos estes conceitos fundamentais estão expostos a seguir:

Resistência

Hibbeler (2018) descreve que a resistência de um material depende da sua capacidade de suportar carga sem deformação excessiva ou falha. O mesmo autor explica que essa propriedade é inerente ao material e que deve ser determinada por métodos experimentais tais como os ensaios de tração ou compressão. Por sua vez, de forma mais detalhada, a NBR 7190-1 (ABNT, 2022) diz que a resistência é a aptidão da matéria suportar tensões, sendo determinada, convencionalmente, pela máxima tensão que pode ser aplicada a corpos-de-prova isentos de defeitos do material considerado ou elementos estruturais, até o aparecimento de fenômenos particulares de comportamento, além dos quais há restrição de emprego do material em elementos estruturais; explicando que, de modo geral, estes fenômenos são os de ruptura ou de deformação específica excessiva.

Rigidez

De uma maneira bem simples, Beer e Johnston Júnior (2006) explicam que a rigidez é a capacidade do material de resistir a deformações. A rigidez dos materiais é medida pelo valor médio do módulo de elasticidade (E), determinado na fase de comportamento linear elástico. Hibbeler (2018) explica que o módulo de elasticidade é uma propriedade mecânica que indica

a rigidez de um material. Segundo este autor, materiais que são muito rígidos apresentam grandes valores de (E), enquanto materiais esponjosos como a borracha vulcanizada, apresentam valores baixos. Para o caso da madeira, o módulo médio de elasticidade na direção paralela às fibras é obtido no ensaio de flexão ($E_{c0,med}$ no caso de ensaios em peças estruturais) ou no ensaio de compressão paralela às fibras ($E_{c0,med}$ no caso de ensaios em corpos de prova isentos de defeitos) (ABNT NBR 7190-1, 2022).

Dureza

A dureza é uma medida de resistência do material, que se opõem a uma deformação plástica, permanente e localizada, do tipo deformação pequena ou risco. Assim, considera-se que quanto maior for a dureza do material, também será maior a resistência a esta deformação, a qual torna esta mais difícil. (CALLISTER JUNIOR; RETHWISCH, 2002)

Rupturas

Para Beer e Johnston Júnior (2006), um material tem comportamento elástico quando as deformações causadas por certo carregamento desaparecem com a retirada deste carregamento. Mas segundo os mesmos autores, se o material atingir o escoamento e se deformar de maneira permanente, ele tem comportamento plástico.

Hibbeler (2018) menciona que materiais que exibem pouco ou nenhum escoamento antes da falha são denominados materiais frágeis. Dessa forma, um material que experimenta uma deformação plástica muito pequena ou mesmo nenhuma deformação plástica antes de sofrer a ruptura é chamado de frágil, rompe de maneira brusca, sem aviso prévio.

Por outro lado, para Hibbeler (2018), qualquer material que possa estar sujeito a grandes deformações antes de sofrer ruptura é denominado material dúctil. Ou seja, o material que apresenta uma considerável deformação plástica antes da ruptura é chamado de dúctil, rompe de maneira lenta, apresentando média ou grande deformação.

Um material caracterizado por atingir a situação de ruptura do elemento, no momento que se dá o limite de proporcionalidade, sem apresentar deformações preliminares que denotem a chegada da situação de ruína, é dito de comportamento frágil, sendo considerado material de comportamento flexível o que se caracterize por situação contrária a esta. Esta caracterização tem importância no cálculo de estruturas, pois correlaciona o valor do módulo de elasticidade à flexão estática e conseqüentemente a tensão atuante no elemento estrutural, e entre a massa volumétrica e a resistência mecânica da peça de madeira exposta aos esforços axiais.

2.3.2 Dimensionamento teórico de vigas de madeira com reforço estrutural

2.3.2.1 Análise da rigidez à flexão

A rigidez à flexão da viga reforçada é obtida utilizando-se o método da seção transformada ou homogeneizada, amplamente empregado em análises estruturais. Segundo Santos Neto *et al.* (2023), neste método, os diferentes materiais são considerados todos como um único, adaptando-se suas dimensões em função da relação entre os módulos de elasticidade (a_e), como mostra a Equação 1.

$$\alpha_e = \frac{E_{prf}}{E_m} \quad (1)$$

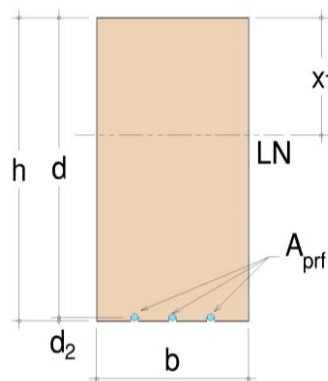
É necessário homogeneizar a seção porque é composta por dois materiais (madeira e PRF) com propriedades diferentes. Essa homogeneização se dá substituindo-se a área de PRF (A_{prf}) por uma área correspondente de madeira equivalente ($A_{m,eq}$), a partir da Equação 2.

$$A_{m,eq} = \alpha_e \cdot A_{prf} \quad (2)$$

Assim, a profundidade da linha neutra da viga reforçada é calculada como o centroide da seção transformada (Figura 7), utilizando-se a Equação 3.

$$\bar{x} = \sum \frac{A_i \cdot x_i}{A_i} \quad (3)$$

Figura 7 – Seção transversal da viga



Fonte: Santos Neto *et al.* (2023)

Sendo \bar{x} a profundidade da linha neutra, medida a partir da face superior da viga; A_i a área dos elementos e x_i a distância do centro de cada elemento até a face superior; considerando-se o momento estático em relação a linha neutra (Q_{LN}) igual a zero (Equação 4), sendo possível calcular a profundidade x_1 da linha neutra.

$$Q_{LN} = b \cdot x_1 \cdot \frac{x_1}{2} - b(h - x_1) \cdot \frac{(h - x_1)}{2} - (\alpha_e - 1) \cdot A_{prf} \cdot (d - x_1) = 0 \quad (4)$$

Assim, obtém-se x_1 (Equação 5):

$$x_1 = \frac{\frac{b \cdot h^2}{2} + (\alpha_e - 1) \cdot A_{prf} \cdot d}{b \cdot h + (\alpha_e - 1) \cdot A_{prf}} \quad (5)$$

Obtido x_1 pode-se calcular o momento de inércia equivalente da seção transversal (I_{eq}), a partir da Equação 6.

$$I_{eq} = \frac{b \cdot h^3}{12} + b \cdot h \cdot \left(x_1 - \frac{h}{2}\right)^2 + (\alpha_e - 1) \cdot A_{prf} \cdot (d - x_1)^2 \quad (6)$$

A rigidez à flexão da seção é calculada multiplicando-se o momento de inércia equivalente pelo módulo de elasticidade da madeira (SANTOS NETO *et al.*, 2023).

2.3.2.2 Reforço à flexão e momento resistente último

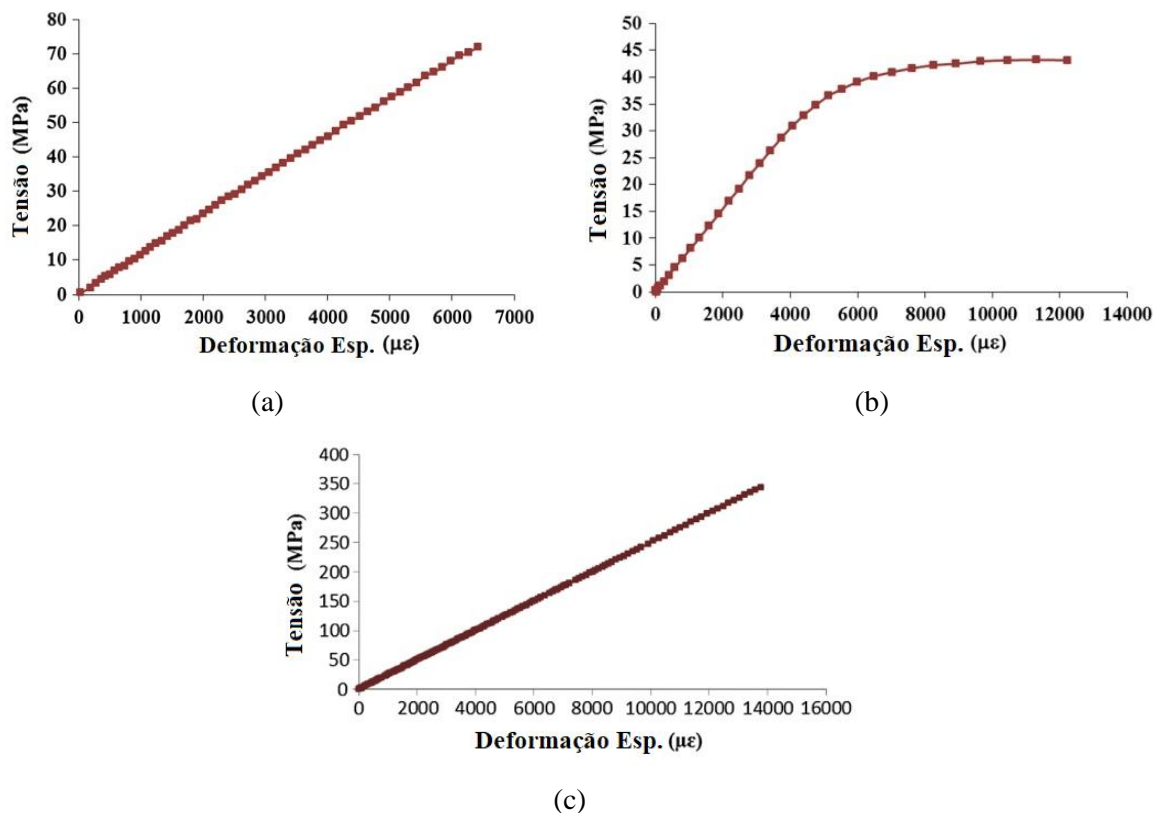
Conforme já foi exposto ao longo deste trabalho, o reforço à flexão nas vigas de madeira pode ser posicionado nas faces tracionadas e comprimidas da viga, podendo ser na forma de placas coladas externamente (EBR) ou com reforços de barras ou tiras/fitas próximas à superfície da viga (NSM), sendo essa última a técnica adotada neste estudo.

A análise dos elementos reforçados à flexão é baseada na teoria clássica da resistência dos materiais, considerando as seguintes hipóteses:

- A seção transversal é simétrica no plano de flexão;
- A seção permanece plana na flexão;

- Existe uma perfeita ligação entre a madeira e o reforço PRF, não havendo escorregamento nem descolagem entre os materiais;
- O comportamento da madeira é linear na tração (Figura 8a) e não linear na compressão (Figura 8b);
- O comportamento do PRF é linear até a ruptura, tanto à tração quanto à compressão (Figura 8c).

Figura 8 – Comportamento típico tensão-deformação da madeira na tração (a); Comportamento típico tensão-deformação da madeira na compressão (b); Comportamento típico tensão-deformação do PRF na tração (c)



Fonte: Nadir, Nagarajan e Ameen (2016).

Em consulta a literatura técnica, percebe-se que muitos modelos constitutivos foram utilizados considerando o comportamento não linear da madeira na compressão. O modelo bilinear de Buchanan (1990) assume o comportamento elástico-linear até o ponto de escoamento, seguido de uma curva em ramo descendente até a ruptura. Este modelo foi corroborado em alguns resultados experimentais satisfatórios. (BORRI; CORRADI; GRAZINI,

2005; GENTILE; SVECOVA; RISKALLA, 2002; BRADY; HARTE, 2008) Em alguns estudos o ramo descendente até a ruptura não foi encontrado, sendo neste caso utilizado um modelo elasto-plástico perfeito. (KLIGER; JOHANSSON; CROSSETTI, 2008; HERNANDEZ, 1997) Modelos com aproximações quadráticas também foram utilizados com sucesso. (LI; XIE; TSAI, 2009)

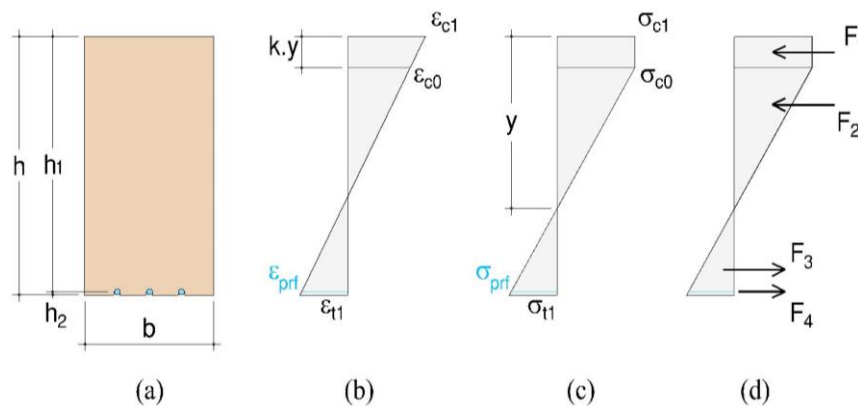
Com o objetivo de definir o momento resistente último, todos os possíveis modos de ruptura devem ser considerados. No entanto, na revisão bibliográfica realizada não foi encontrado relato de a ruptura ter acontecido no reforço de FRP. Nesse sentido, a Figura 9 apresenta a distribuição de deformações e tensões na seção transversal da viga.

As simbologias utilizadas nesta figura podem ser assim definidas: y distância do eixo neutro até a face superior da viga; σ_{c1} tensão de compressão na madeira e σ_{c0} tensão de escoamento na compressão da madeira; σ_{t1} tensão de tração na madeira; A_{prf} área de reforço de fibra e σ_{prf} a tensão de tração no reforço de fibra.

As deformações específicas ε_{c1} , ε_{t1} , ε_{c0} e ε_{prf} são as deformações específicas de compressão e tração na madeira, deformação de escoamento na compressão da madeira e deformação de tração do FRP, respectivamente.

O momento resistente último é calculado considerando o instante que a madeira atinge a deformação de ruptura na compressão na face superior da viga ou sua tensão de ruptura à tração, na face inferior da viga.

Figura 9 - Seção transversal (a); deformações específicas (b); tensões (c); forças resultantes (d)



Assim, aplicando as equações de equilíbrio das forças, Figura 8d, tem-se a Equação 7:

$$F_1 + F_2 - F_3 - F_4 = 0 \quad (7)$$

Onde, as forças na região comprimida da seção são dadas pelas Equações 8 e 9:

$$F_1 = \sigma_{c1} \cdot b \cdot k \cdot y \quad (8)$$

$$F_2 = \frac{\sigma_{co}}{2} \cdot b \cdot y \cdot (1 - k) \quad (9)$$

E as forças na região tracionada são dadas pelas Equações 10 e 11:

$$F_3 = \frac{\sigma_{t1}}{2} \cdot b \cdot (h - y) \quad (10)$$

$$F_4 = A_{prft} \cdot \sigma_{prft} \quad (11)$$

Utilizando as relações lineares das deformações (Figura 8b), é possível encontrar a Equação 12:

$$\frac{\varepsilon_{c1}}{y} = \frac{\varepsilon_{t1}}{h - y} = \frac{\varepsilon_{co}}{y - (k \cdot y)} = \frac{\varepsilon_{prft}}{h_1 - y} \quad (12)$$

A partir das relações constitutivas dos materiais madeira e FRP define-se as Equações 13 a 16, a seguir apresentadas:

$$\sigma_{c1} = E_1 \cdot \varepsilon_{c1} \quad \text{se } \varepsilon_{c1} \leq \varepsilon_{co} \quad (13)$$

$$\sigma_{c1} = \sigma_{co} \quad \text{se } \varepsilon_{c1} > \varepsilon_{co} \quad (14)$$

$$\sigma_{t1} = E_1 \cdot \varepsilon_{t1} \quad (15)$$

$$\sigma_{prft} = E_{prft} \cdot \varepsilon_{prft} \quad (16)$$

Utilizando as equações 7 a 16 é possível encontrar a equação que define a profundidade da linha neutra, para cada caso de ruptura. Uma vez obtida a profundidade da linha neutra, o momento resistente último pode ser calculado da seguinte maneira (Equação 17):

$$M_u = F_1 \cdot \left[\frac{k \cdot y}{2} + (y - k \cdot y) \right] + \frac{2}{3} F_2 \cdot (y - k \cdot y) + \frac{2}{3} F_3 \cdot (h - y) + F_4 \cdot (h_1 - y) \quad (17)$$

2.4 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Das informações apresentadas na primeira seção, ficou evidente que o uso da madeira como elemento construtivo estrutural é uma alternativa econômica e sustentável e que o uso de material compósito como elemento de reforço, em especial a barra de GFRP, agrega os mesmos propósitos de economia e sustentabilidade, além de melhorar a resistência e a rigidez da peça de madeira, unidos pelo adesivo epóxi de maneira eficaz e eficiente.

Na segunda seção, ficou evidente que a união destes três elementos pela técnica de reforço NSM, tratada em suas etapas, em especial a etapa de entalhe da ranhura onde a barra de GFRP é inserida na peça de madeira, é o melhor método para a comprovação do objetivo geral proposto.

Na terceira seção entendeu-se necessário registrar um breve estudo teórico do comportamento à flexão da viga de madeira reforçada com barra de GPRF aplicada sob a técnica NSM, que permite dimensionar teoricamente sua capacidade de carga, rigidez à flexão e o momento resistente último, como fundamentação para a análise do comportamento à flexão da peça estrutural. Antes, porém, registrou-se também os conceitos fundamentais necessários ao entendimento dos resultados obtidos pelo programa experimental, tais como as definições de resistência, rigidez e dureza e, dos modos de ruptura frágil e dúctil.

3 METODOLOGIA DA PESQUISA

Neste terceiro capítulo, dividido em duas grandes seções, são apresentados os materiais e métodos de trabalho utilizados. A primeira seção descreve os métodos científicos adotados, apresentando as classificações e o delineamento da pesquisa. A segunda registra o programa experimental, aprofundando os procedimentos realizados.

3.1 MÉTODOS CIENTÍFICOS ADOTADOS

3.1.1 Classificações da pesquisa

Conforme menciona Gil (2002), é usual realizar-se a classificação das pesquisas científicas com base em seus objetivos gerais. Segundo este autor, é possível classificar as pesquisas em três grandes grupos: exploratórias, descritivas e explicativas.

A partir da classificação proposta por Gil (2002) e de seus objetivos, a pesquisa conduzida neste trabalho pode ser considerada como explicativa, pois teve “como preocupação central identificar os fatores que determinam ou que contribuem para a ocorrência dos fenômenos” (GIL, 2002, p. 42), “valendo-se quase exclusivamente do método experimental” (GIL, 2002, p. 43).

Gil (2002) também menciona que embora a classificação das pesquisas em exploratórias, descritivas e explicativas seja muito útil para o estabelecimento de seu marco teórico, ou seja, para possibilitar uma aproximação conceitual, na prática também é importante classificar as pesquisas segundo o seu delineamento, que se refere aos procedimentos técnicos de coleta e análise de dados utilizados. É somente a natureza do problema que determinará o tipo de técnica a ser utilizado (CASTRO, 2006, p. 97).

Nesse sentido, dentre as possibilidades registradas por Gil (2002), trabalhou-se com pesquisa experimental, aquela que “consiste essencialmente em determinar um objeto de estudo, selecionar as variáveis capazes de influenciá-lo e definir as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto” (GIL, 2002, p. 48).

Assim, a partir destas classificações, o delineamento da pesquisa está detalhado na próxima subseção.

3.1.2 Delineamento da pesquisa

Embora esteja classificada como pesquisa experimental, seu delineamento envolveu seis grandes etapas, incluindo etapas não experimentais, as quais foram detalhadas a seguir:

1) Revisão bibliográfica

Como primeira etapa, a revisão bibliográfica permitiu o conhecimento inicial da temática a ser tratada. Importante mencionar que foram atendidos os critérios de importância, originalidade e viabilidade, sugeridos por Castro (2006), para a escolha do tema. Foram priorizadas bases científicas como *Scientific Direct*, *Elsevier*, *Nature* e *John Wiley & Sons (Wiley)*, que se apresentam, na contemporaneidade, como fontes de pesquisas sólidas e confiáveis.

A revisão bibliográfica continuou sendo desenvolvida ao longo de todo o período de trabalho, a fim de complementar o estudo e o programa experimental.

2) Seleção das madeiras

Após ampla explanação sobre a madeira em geral, nos capítulos iniciais deste trabalho, a segunda etapa foi a busca por espécies usuais de madeira, encontradas e comercializadas na região de Santa Maria/RS.

A seleção recaiu sobre o Cedrinho (*Erismia uncinatum*) e o Pinus (*Pinus elliottii*), detalhados posteriormente. Como já mencionado, foram selecionadas madeiras de duas diferentes classes de resistência, a fim de possibilitar a comparação do comportamento entre as classes pesquisadas.

3) Definição das dimensões da peça estrutural e seleção dos ensaios a serem adotados

Nesta etapa foram definidas as dimensões da madeira e das vigas das madeiras a ser ensaiada e, também, a partir das Normas Brasileiras, foram determinados os ensaios a serem adotados para a determinação das propriedades mecânicas necessárias à conclusão do experimento, bem como o ensaio de validação do objetivo geral.

4) Realização da fundamentação e análise teórica

A partir da revisão bibliográfica e da definição do elemento estrutural base do estudo, seguiu-se à realização da fundamentação teórica, a qual possibilitou a análise dos resultados experimentais.

5) *Desenvolvimento do programa experimental*

Momento que submeteu as madeiras, as barras e as vigas das madeiras a ensaios normatizados, detalhados posteriormente.

Nesta etapa foram realizados os ensaios de resistência à compressão paralela as fibras para a caracterização simplificada das madeiras utilizadas no estudo e os ensaios normatizados de resistência à flexão de quatro pontos nas vigas das madeiras selecionadas.

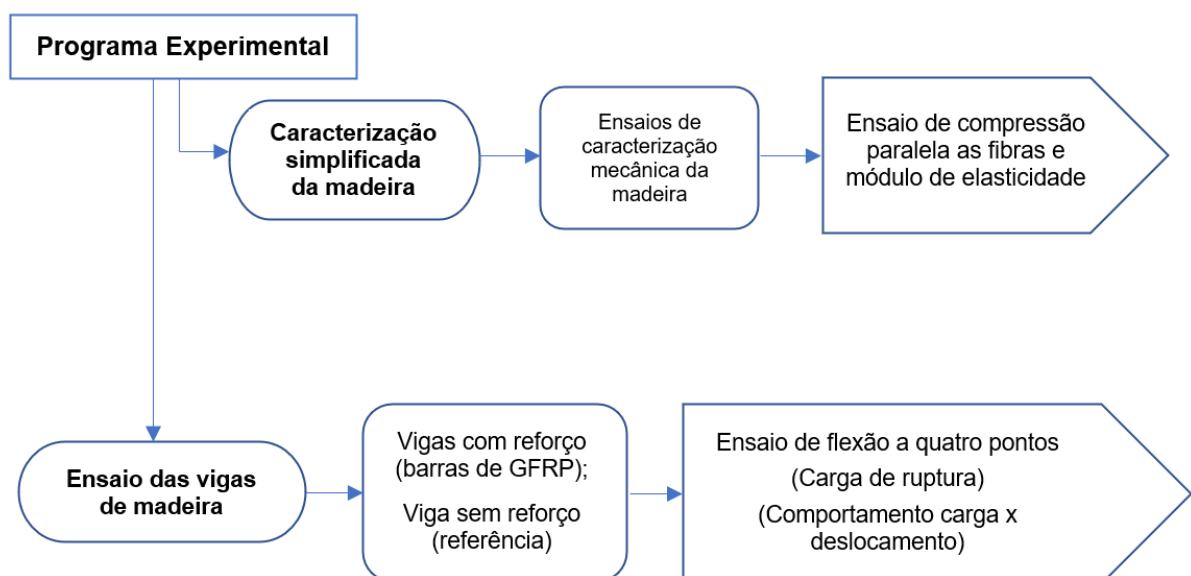
6) *Análise, discussão e comparação dos resultados obtidos*

Decorrente da execução do programa experimental, foram analisados, discutidos e comparados os resultados obtidos entre as vigas referência (sem reforço) e as vigas reforçadas. Essa etapa, segundo Castro (2006), é o núcleo central da pesquisa.

3.2 DESCRIÇÃO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

A Figura 10 ilustra o fluxograma referente aos procedimentos desenvolvidos pelo programa experimental no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

Figura 10 - Fluxograma do programa experimental



De acordo com a Figura 10, foi realizado na madeira o ensaio de resistência à compressão paralela as fibras, obtendo-se o seu módulo de elasticidade e a sua caracterização simplificada. Para as vigas foram realizados os ensaios de flexão à quatro pontos, determinação da carga de ruptura e do comportamento carga versus deslocamento e tensão versus deformação. Todos os procedimentos são detalhados a seguir.

3.2.1 Madeiras selecionadas

Conforme mencionado, as espécies de madeira selecionadas para este estudo foram o Cedrinho (*Erisma uncinatum*), uma dicotiledônea e o Pinus (*Pinus elliottii*), uma conífera.

A árvore da madeira Cedrinho é nativa do Brasil, encontrada nos estados do Amazonas, Acre, Amapá, Mato Grosso, Rondônia, Pará e na Amazônia. Mas também tem ocorrência na Venezuela, Suriname e Guianas. Este foi o principal motivo pela escolha da espécie Cedrinho. De nome científico “*Erisma uncinatum*”, também recebe outros nomes populares: bruteiro, cachimbo de jabuti, cedrilho, jaboti, jaboti-da-terra-firme, entre outros.

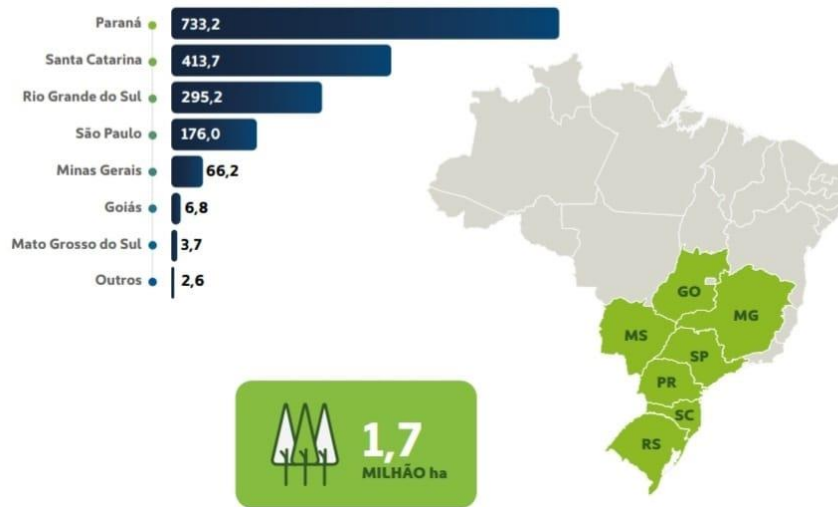
O Cedrinho apresenta tonalidades que variam entre o marrom e o marrom avermelhado. Esta espécie foi escolhida por ser uma madeira de reflorestamento, de média dureza, variando de moderadamente durável a durável em relação à resistência a deterioração. É resistente ao ataque de cupins, contudo apresenta baixa resistência ao ataque de organismos xilógrafos marinhos.

A plantação de árvore de Pinus no Brasil, espécie que abrange aproximadamente 100 espécies, vem sendo cultivada comercialmente desde a década de 1960, sendo uma das melhores fontes para a indústria da madeira, dentre outros. O Pinus é nativo do Sudeste dos Estados Unidos, hoje uma árvore de relevante importância para a economia de diversas regiões do Brasil gerando milhares de empregos diretos e indiretos em todo o país, tornando-se importante fonte de reflorestamento e fornecimento de madeira e celulose para diversas indústrias. Este foi o principal motivo pela escolha da espécie Pinus para a pesquisa.

A partir das décadas de 1960 e 1970, a árvore de *Pinus elliottii* se tornou uma das alternativas mais interessantes para os silvicultores brasileiros. Com grande presença nas florestas de São Paulo e do sul do país, adaptando-se muito bem ao clima ameno dessas regiões.

Dados do relatório setorial da ABIMCI (2022) mostram que as florestas plantadas com Pinus no Brasil somam cerca de 1,7 milhão de hectares, concentradas principalmente na região Sul do país, como ilustra a Figura 11, que apresenta a área plantada em 1.000 hectares.

Figura 11 - Distribuição geográfica dos plantios de Pinus no Brasil (2021)



Fonte: Extraído de ABIMCI (2022, p. 54).

Os Estados do Paraná e Santa Catarina respondem por aproximadamente 70% do total plantado com esse gênero, dadas as condições edafoclimáticas favoráveis da região, bem como pela demanda da indústria de celulose e de produtos de madeira sólida. O Estado do Rio Grande do Sul fica em terceiro lugar, possuindo 295,2 mil hectares de área plantada de Pinus (ABIMCI, 2022).

O Pinus apresenta cor branco-amarelado, cerne e alburno indistintos pela cor, tendo sido escolhido por ser uma madeira de reflorestamento, de baixa densidade, sendo que apesar de ser suscetível ao ataque de fungos, cupins, brocas-de-madeira e perfuradores marinhos, a prevenção para estes é de fácil tratamento.

3.2.2 Caracterização simplificada das madeiras

A caracterização das propriedades das madeiras (resistência e rigidez), em geral, é atribuída a lotes considerados homogêneos (classificação por lote). Um lote é considerado homogêneo quando o coeficiente de variação da resistência à flexão das suas peças, determinado de acordo com 8.2 da Parte 4 da ABNT NBR 7190 (2022) for inferior a 20 %.

Para a caracterização das peças de madeira utiliza-se o ensaio de resistência à compressão paralela as fibras, de acordo com a Parte 3 da ABNT NBR 7190 (2022). Para esta caracterização, o teor de umidade de referência, no momento do ensaio, deve ser mantido consistente com o condicionamento em uma temperatura de 20°C e 65% de umidade relativa.

Para a temperatura e umidade condicionadas de referência, a umidade de equilíbrio da madeira deve ser de aproximadamente 12%.

Ainda segundo o item 4.4 da Parte 3 da ABNT NBR 7190 (2022), a caracterização completa de rigidez das madeiras é feita por meio da determinação dos seguintes valores, que devem ser referidos à condição-padrão de umidade ($U = 12\%$):

[i] O valor médio do módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras: $E_{c0,med}$ deve ser determinado com pelo menos dois ensaios;

[ii] Admite-se que sejam estatisticamente equivalentes os valores médios dos módulos de elasticidade à compressão e à tração paralelas às fibras: $E_{c0,med} = E_{t0,med}$.

Neste trabalho a caracterização simplificada da madeira se deu pelo ensaio de resistência à compressão paralela as fibras. Esta caracterização teve como principal objetivo a classificação de resistência entre os dois tipos de madeira usados no experimento, por ser a base para a análise de melhoria no comportamento à flexão das vigas comparadas.

O enquadramento de peças de madeira nas classes de resistência especificadas nas Tabelas 2 e 3 da NBR 7190-1 (ABNT, 2022) deve ser feito a partir dos resultados experimentais, executados de acordo com a referida norma.

Segundo a NBR 7190-3 (ABNT, 2022), a resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}) é dada pela máxima tensão de compressão que pode atuar em um corpo de prova com seção transversal quadrada nominal de 5 cm de lado e comprimento de 15 cm, calculada conforme a Equação 18.

$$f_{c0} = \frac{F_{c0,max}}{A} \quad (18)$$

Onde:

$F_{c0,max}$ - é a máxima força de compressão aplicada ao corpo de prova durante o ensaio, expressa em Newtons (N);

A - é a área inicial da seção transversal comprimida, expressa em milímetros quadrados (mm^2);

f_{c0} - é a resistência à compressão paralela às fibras, expressa em Megapascals (MPa).

A rigidez da madeira na direção paralela às fibras é determinada por seu módulo de elasticidade, obtido do trecho linear do diagrama de tensão versus deformação específica para cada tipo de madeira, em MPa.

O módulo de elasticidade (E) é determinado a partir da inclinação da reta secante à curva de tensão versus deformação, definida pelos pontos $(\sigma_{10\%}; \varepsilon_{10\%})$ e $(\sigma_{50\%}; \varepsilon_{50\%})$, correspondentes respectivamente a 10 % e 50 % da resistência à compressão paralela às fibras, medida no ensaio, calculado conforme a Equação 19:

$$E_{c0} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\varepsilon_{50\%} - \varepsilon_{10\%}} \quad (19)$$

Onde:

$\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}$ - São as tensões de compressão correspondentes a 10 % e 50 % da resistência f_{c0} ;

$\varepsilon_{50\%} - \varepsilon_{10\%}$ - São as deformações específicas medidas no corpo de prova, correspondentes às tensões de $\sigma_{10\%}$ e $\sigma_{50\%}$.

A Tabela 3, que corresponde à Tabela 2 da NBR 7190-1 (ABNT, 2022, p.12), apresenta as classes de resistência adotadas para espécies nativas, que permite a classificação destas a partir dos valores obtidos pelo ensaio à compressão paralela as fibras na peça de madeira.

Tabela 3 - Classes de resistência de espécies de florestas nativas definidas em ensaios de corpos de prova isentos de defeitos

CLASSES	f_{c0k} (MPa)	$f_{v0,k}$ (MPa)	$E_{c0,med}$ (MPa)	Densidade a 12% (Kg/m ³)
D20	20	4	10 000	500
D30	30	5	12 000	625
D40	40	6	14 500	750
D50	50	7	16 500	850
D60	60	8	19 500	1 000

Nota 1 Os valores desta Tabela foram obtidos de acordo com a ABNT NBR 7190-3.

Nota 2 Valores referentes ao teor de umidade igual a 12%.

Nota 3 Os valores das classes de resistência para espécies nativas estão disponíveis na ABNT NBR 7190-3:2022, Tabela A.1.

Fonte: Extraída da ABNT 7190-1 (ABNT, 2022).

A Figura 12 mostra corpos de prova da madeira Cedrinho, confeccionados de acordo com a NBR 7190-1 (ABNT, 2022).

Figura 12 – Corpos de prova de Cedrinho



A Figura 13 mostra corpos de prova da madeira Pinus, confeccionados de acordo com ABNT NBR 7190 (2022).

Figura 13 – Corpos de prova de Pinus



A resistência à compressão paralela as fibras, foi determinada em ensaio de compressão uniforme, em uma máquina hidráulica universal da marca AMSLER, em corpos de prova com seção transversal quadrada de 5 centímetros de lado e comprimento de 15 centímetros.

3.2.3 Caracterização das peças estruturais de madeira

A caracterização de peças estruturais de madeira se dá pelo ensaio de resistência a flexão das vigas de madeira, que segundo a NBR 7190-4 (ABNT, 2022), prevê que o teor de umidade de referência, no momento do ensaio, deve ser consistente com o condicionamento em uma temperatura de 20 °C e 65 % de umidade relativa. Para a temperatura e umidade condicionadas de referência, a umidade de equilíbrio da madeira deve ser de aproximadamente 12 %. A temperatura de referência no momento do ensaio deve ser de 20 °C.

A taxa de carregamento deve ser aplicada de modo que ocorra a ruptura do elemento entre 1 min e 5 min. No momento do ensaio, o teor de umidade da madeira, a temperatura da madeira, e o tempo até a ruptura devem ser registrados.

Para avaliar o módulo de elasticidade na flexão (E_0), o deslocamento incremental (Δe) correspondente a uma força incremental (ΔF) deve ser selecionado no trecho da fase elástico-linear do gráfico carga versus deslocamento. O módulo de elasticidade na flexão (E_0) é calculado pela Equação 20:

$$E_0 = \frac{23}{108} \left(\frac{L}{h}\right)^3 \left(\frac{\Delta F}{\Delta e}\right) \frac{1}{b} \quad (20)$$

O intervalo de 10 % a 40 % da força máxima deve ser utilizado para determinar $\Delta F/\Delta e$. A resistência convencional à flexão (f_m) deve ser calculada a partir da Equação 21:

$$f_m = \frac{F_{rupt}L}{bh^2} \quad (21)$$

Onde:

F_{rupt} – É o valor da força de ruptura aplicada (força última);

L – É o vão livre entre apoios, igual a 18 h;

b – É a largura da seção transversal do corpo de prova;

h – É a altura da seção transversal do corpo de prova.

A Tabela 4, que corresponde à Tabela 3 da NBR 7190-1 (ABNT, 2022, p.12), apresenta as classes de resistência definidas em ensaios de peças estruturais, que possibilita a partir dos valores obtidos pelo ensaio de resistência a flexão na peça de madeira, sua classificação.

Tabela 4 - Classes de resistência definidas em ensaios de peças estruturais de madeira

		Coníferas											Folhosas								
Simbolo		C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50	D18	D24	D30	D35	D40	D50	D60	D70
Propriedades de resistência MPa																					
Flexão	$f_{b,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50	18	24	30	35	40	50	60	70
Tração paralela	$f_{t,0,k}$	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30	11	14	18	21	24	30	36	42
Tração perpendicular	$f_{t,90,k}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Compressão paralela	$f_{c,0,k}$	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	29	18	21	23	25	26	29	32	34
Compressão perpendicular	$f_{c,90,k}$	2	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2	7,5	7,8	8	8,1	8,3	9,3	11	13,5
Cisalhamento	$f_{v,k}$	3	3,2	3,4	3,6	3,8	4	4	4	4	4	4	4	3,4	4	4	4	4	4	4,5	5
Propriedades de rigidez GPa																					
Módulo de elasticidade a 0° médio	$E_{0,m}$	7	8	9	9,5	10	11	12	12	13	14	15	16	9,5	10	11	12	13	14	17	20
Módulo de elasticidade a 0° característico	$E_{0,05}$	4,7	5,4	6	6,4	6,7	7,4	7,7	8	8,7	9,4	10	11	8	8,5	9,2	10	11	12	14	16,8
Módulo de elasticidade a 90° médio	$E_{90,m}$	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,6	0,7	0,7	0,8	0,9	0,9	1,1	1,33
Modulo de elasticidade trasnversal médio	G_m	0,4	0,5	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9	1	0,6	0,6	0,7	0,8	0,8	0,9	1,1	1,25
Densidade Kg/m³																					
Densidade carcterística	ρ_k	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460	475	485	530	540	560	620	700	900
Densidade média	ρ_m	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550	570	580	640	650	660	750	840	1080
		Nota 1 Valores obtidos conforme a ABNT NBR 7190-4.																			
		Nota 2 Valores referentes ao teor de umidade igual a 12%																			

Fonte: Extraída da NBR 7190-1 (ABNT, 2022).

Esse ensaio é de fundamental importância na análise do comportamento estrutural das vigas de madeira, permitindo compreender sua resistência, rigidez e capacidade de suportar cargas aplicadas.

3.2.4 Barras de GFRP

No programa experimental foram utilizadas barras de GFRP doadas pela empresa STRATUS FRP, com diâmetro de 5.0 mm. Esta escolha permitiu adotar o percentual de 0,5% de armadura em relação a dimensão da viga de madeira; também com o uso deste diâmetro, foi possível o envolvimento completo da barra pelo adesivo, no entalhe da ranhura de 8.0 mm,

ficando o recobrimento da barra pelo adesivo dentro da espessura média recomendada por pesquisas anteriores de 2.0 a 3.0 mm. As barras de GFRP utilizadas estão apresentadas na Figura 14.

Figura 14 – Barras compostas de polímero reforçado com fibra de vidro (GFRP)



O percentual de 5% de armadura foi determinado com base em pesquisas anteriores e a partir das dimensões pré-estabelecidas para a viga de madeira, a fim de que o resultado do conjunto madeira mais barra de GFRP, utilizasse a capacidade total da madeira e o máximo da capacidade da barra, ou seja, quando solicitadas até a falha, as vigas de madeira com reforço romperiam na parte da madeira, sem romper a barra.

Quadro 1- Propriedades e características da barra GFRP STRATUS FRP 5.0 mm

Propriedades e características	
Classe de vidro	Vidro E-CR
Resina	Epóxy Éster Vinílica
Diâmetro da Barra	5 mm
Carga de Ruptura (média)	2697,22 Kgf
Módulo de Elasticidade (médio)	53,28 GPa

Fonte: Extraído e adaptado de Deus (2018).

As propriedades mecânicas das barras não foram ensaiadas em laboratório nesta pesquisa, sendo considerados os valores obtidos pela pesquisa de Deus (2018). No Quadro 1,

anterior, estão apresentadas as propriedades e características da barra de GFRP utilizada para esta pesquisa. retirados da pesquisa de Deus (2018).

3.2.5 Adesivo

Os adesivos mais comumente utilizados para a fixação de barras de GFRP a elementos de madeira são a resina epóxi de um ou dois componentes (poliuretano (PUR) e resina fenol-formaldeído).

A resina epóxi de dois componentes Tecbond FM Quartzolit, fornecida pelo fabricante Quartzolit Saint Gobain, foi escolhida para a utilização neste experimento por ser um produto de elevada aderência, resistência e fluidez, permitindo uma grande facilidade na moldagem dos corpos de prova.

As propriedades mecânicas do adesivo não foram testadas em laboratório nesta pesquisa, sendo considerados os valores fornecidos pelo fabricante.

Figura 15 – Embalagem comercial do adesivo Tecbond FM Quartzolit bicomponente



A Figura 15 (a) e (b) apresenta a embalagem do produto Tecbond FM Quartzolit, que é fornecido em conjuntos contendo duas embalagens de 1 kg cada, sendo que uma embalagem contém a base (componente A) e a outra, o endurecedor (componente B).

O Quadro 2, extraído do Boletim Técnico do produto Tecnobond MF Quartzolit, registra a descrição, os usos, a cor e as vantagens do adesivo utilizado na pesquisa.

Quadro 2 - Descrição, usos, cor e vantagens do adesivo Tecbond FM Quartzolit bicomponente

Descrição	Tecbond FM Quartzolit é um adesivo estrutural de média fluidez e pega normal, a base de epóxi, bicomponente, isento de solventes, composto por agregados selecionados e graduados. Apresenta fácil mistura e alto poder de aderência, com viscosidade ideal para a aplicação sobre superfícies com inclinações diversas.
Usos	- Colagem de concretos e materiais à base de cimento a superfícies de concreto, aço, alumínio, fibrocimento, mármore, madeira, cerâmica e vidro; - Para a colagem de concretos, microconcretos, grautes e argamassas lançados ou aplicados sobre o elemento estrutural de concreto.
Cor	Cinza
Vantagens	- Alto poder de aderência - Apresenta viscosidade ideal para aplicação sobre superfícies com diversas inclinações - Possui prazo de aplicação de, aproximadamente, 40 minutos

Fonte: Quartzolit Saint Gobain (2023).

No Quadro 3, extraído também do Boletim Técnico do produto Tecnobond MF Quartzolit, estão apresentadas as propriedades e características do adesivo selecionado para esta pesquisa.

Quadro 3 - Propriedades e características do adesivo Tecbond FM Quartzolit bicomponente

Propriedades e características	
Massa específica	1,70 Kg/dm ³
Rendimento	1,70 Kg/m ³ /mm de espessura
Tempo de manuseio a 25°C (Pot life)	40 minutos
Tempo em aberto a 25°C (Open time)	90 minutos
Cura inicial	24 horas
Cura final	7 dias
Temperatura de aplicação	5 a 35°C
Temperatura de serviço	-30 a 70°C
Resistência à compressão às 24h (NBR 5739)	25MPa
Resistência à compressão aos 7 dias (NBR 5739)	60MPa
Validade (embalagem fechada e sem uso)	12 meses

Fonte: Quartzolit Saint Gobain (2023).

3.2.6 Vigas de madeira

Para a realização dos ensaios de determinação da resistência à flexão, as vigas de madeira foram serradas nas dimensões pré-estabelecidas e entalhadas na sua face inferior, utilizando uma fresa de 8.0 mm conforme mostra a Figura 16, para a colagem da barra de

reforço (GFRP) descrita em 3.3.2, seguindo o método NSM, diretamente na madeira, ficando apenas o processo de colagem para ser realizado no laboratório.

Figura 16 – Fresa circular de 8.0 mm utilizada para a execução do entalhe nas vigas de madeira



Todas as vigas ensaiadas foram confeccionadas no tamanho de 45 mm x 90 mm x 1100 mm. A Figura 17 mostra o esquema da seção transversal das vigas ensaiadas.

Figura 17 – Seção transversal das vigas ensaiadas

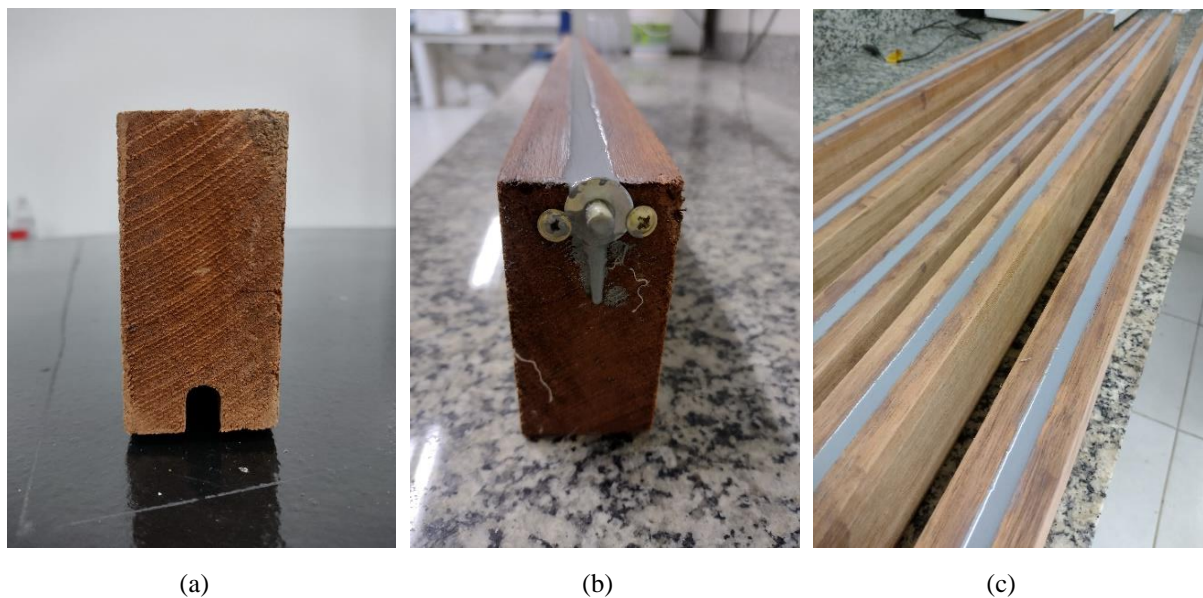


As barras de GFRP foram coladas na madeira por meio de adesivo estrutural do tipo epóxi, Tecbond MF marca Quartzolit, já descrito no item 3.3.3. Todos os espécimes preparados foram curados em ambiente seco de laboratório por pelo menos sete dias antes do ensaio.

A Figura 18 (a), (b) e (c) mostra a sequência de preparação das amostras para a realização do ensaio de flexão de quatro pontos, desde a preparação do entalhe na peça de

madeira até o elemento final composto por viga de madeira, reforço com a barra de GFRP, fixados pelo adesivo epóxi.

Figura 18 – Vigas de Cedrinho preparadas para ensaio – (a) detalhe do entalhe da ranhura; (b) detalhe do envolvimento da barra pelo adesivo; (c) vigas prontas para a realização do ensaio.

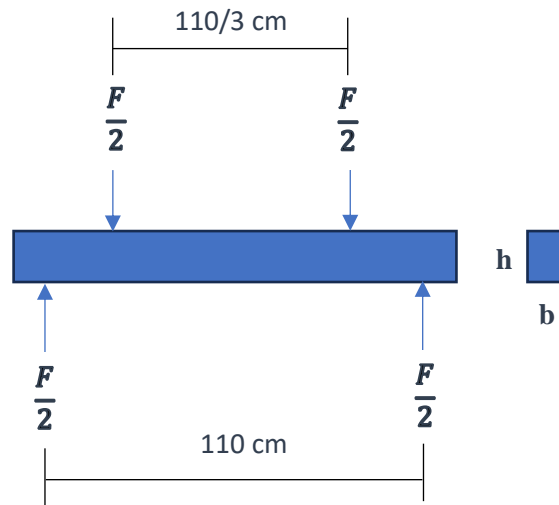


Para a realização deste ensaio, a carga é aplicada em quatro pontos de apoio no corpo de prova, destes, dois pontos estão localizados na região de suporte, enquanto outros dois são colocados na região central do corpo de prova, de forma simétrica em relação aos pontos de suporte, conforme Figura 19, a seguir.

A taxa de carregamento foi aplicada e mantida constante durante todo o processo de ensaio.

O ensaio de flexão de quatro pontos proporciona uma análise mais precisa da resistência à flexão e do comportamento do material em diferentes pontos. Ele também ajuda a reduzir os efeitos das deficiências ou irregularidades nos pontos de apoio, fornecendo resultados mais confiáveis.

Figura 19 – Esquema de montagem do ensaio de flexão de quadro pontos



Todos os ensaios foram realizados em uma máquina universal de ensaios da marca AMSLER com capacidade de 20 tf, sendo observados os modos de ruptura, a relação carga versus deslocamento, a capacidade de carga e a rigidez à flexão.

A amostra de corpos de prova foi composta de 20 vigas de madeira maciça, sendo 5 vigas de madeira do tipo Cedrinho sem reforço, 5 vigas de madeira do tipo Pinus sem reforço, para estabelecer os valores de referência, 05 vigas de madeira do tipo Cedrinho reforçadas a flexão com uma barra de GFRP e 05 vigas de madeira do tipo Pinus reforçadas a flexão com uma barra de GFRP.

As vigas foram divididas em quatro séries por tipo de madeira, conforme apresenta o Quadro 4:

- [i] A série VRefp com 5 vigas de madeira do tipo Pinus não reforçadas (viga referência);
- [ii] A série VPP com 5 vigas de madeira do tipo Pinus reforçadas a flexão com barras de GFRP coladas à madeira por adesivo epóxi, inserida em uma ranhura na face inferior da viga;
- [iii] A série VRefc contendo 5 vigas de madeira do tipo Cedrinho não reforçadas (viga referência);
- [iv] A série VPc com 5 vigas de madeira do tipo Cedrinho reforçadas a flexão com barras de GFRP coladas à madeira por adesivo epóxi, inserida em uma ranhura na face inferior da viga.

Quadro 4 - Descrição da composição de cada amostra

Código da viga	Nº de vigas	Reforços	
		Diâmetro da armadura de reforço (mm)	Relação de seção transversal barra/madeira (%)
VRefp1	05	-	-
VRefp2			
VRefp3			
VRefp4			
VRefp5			
Vpp1	05	5.0	0.5
Vpp2			
Vpp3			
Vpp4			
Vpp5			
VRefc1	05	-	-
VRefc2			
VRefc3			
VRefc4			
VRefc5			
VPc1	05	5.0	0.5
VPc2			
VPc3			
VPc4			
VPc5			
TOTAL	20		

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo está dividido em três seções. Inicialmente, são expostos os resultados dos ensaios experimentais de resistência à compressão paralela às fibras para o Cedrinho e igualmente para o Pinus.

A seguir, na segunda seção, são apresentados os resultados dos ensaios de resistência à flexão de quatro pontos nas vigas de madeira referência e com reforço, separadas de acordo com os diferentes tipos de madeira, bem como também são apresentados os resultados do comportamento carga versus deslocamento obtidos a partir desses ensaios para cada uma das madeiras utilizadas no experimento.

A terceira seção encerra este capítulo sistematizando e sintetizando todos os resultados experimentais obtidos e preparando para a leitura do capítulo final, que traz as conclusões resultantes deste trabalho.

Nesta terceira seção, as vigas que receberam o reforço com barras compostas de polímero reforçado com fibra de vidro (GFRP) foram comparadas com as vigas de referência para determinar o percentual de melhoria no seu comportamento em termos de resistência e rigidez.

Os resultados, além de comparados entre si, também foram comparados com outros resultados de pesquisas sobre o tema. As observações de outros estudos realizadas por distintos autores foram comparadas com as constatações providas pelo experimento executado nesta pesquisa. Por fim, é realizada uma análise do comportamento final das vigas das madeiras selecionadas para o estudo.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS MADEIRAS

Durante a execução de todos os ensaios, os valores de leitura da célula de carga e do medidor de deslocamento foram registrados em uma planilha. Esse procedimento foi adotado para permitir o acompanhamento das curvas carga versus deslocamento de cada tipo de madeira.

Como nem todos os resultados obtidos eram adequados para a realização das análises, as médias obtidas dos ensaios foram inicialmente filtradas com o intuito de identificar e eliminar valores atípicos, sendo os critérios deste tratamento descritos a seguir:

Critério 1: os dados numéricos coletados foram considerados suspeitos quando o valor absoluto da variável de resposta subtraído da média de suas repetições era maior que o desvio padrão.

Critério 2: uma vez identificados os valores suspeitos, foram calculadas novas médias e novos desvios padrões dos grupos sem considerar os valores suspeitos. Posteriormente, prosseguiu-se com a subtração da variável resposta suspeita pela nova médias calculadas, sendo classificado como valor espúrio o resultado cujo valor absoluto ultrapassasse duas vezes o novo desvio padrão. A análise destes valores está apresentada nos Apêndices C e D.

O ensaio de resistência à compressão paralela às fibras foi desenvolvido para cada uma das madeiras utilizadas no experimento, conforme apresentado a seguir:

4.1.1 Caracterização simplificada das madeiras - Ensaio de resistência à compressão paralela as fibras da madeira Cedrinho

Os corpos de prova da madeira Cedrinho foram preparados conforme prescrição de norma, e previamente deixados em câmara climatizada, após estes foram então submetidos ao ensaio. No momento de realização do ensaio a umidade média dos corpos de prova da madeira cedrinho foi de 13,3%. A Figura 20 mostra o corpo de prova de número 5 acoplado e pronto para a realização do ensaio, na máquina de teste universal da marca AMSLER, com capacidade de 20tf.

Figura 20 – Ensaio de resistência à compressão paralela as fibras



Na Figura 21 é possível observar o resultado do ensaio no corpo de prova. Para aferição dos dados foi utilizado relógio da marca Tramontina com precisão de 0.01 mm. O relógio foi retirado antes do momento de falha dos corpos de prova, para que não houvesse dano ao equipamento.

O ensaio foi realizado em uma amostra de 12 corpos de prova, conforme prescreve a NBR 7190-3 (ABNT, 2022), sendo que, os valores da carga de ruptura foram verificados para a amostra completa. Os valores progressivos de carga e deslocamento foram anotados para apenas 5 corpos de prova dentro da amostra total (12). O Apêndice A apresenta os valores obtidos nos ensaios de resistência a compressão paralela as fibras para as amostras da madeira Cedrinho e pinus. Estão apresentados no Apêndice C o tratamento dos resultados do ensaio de resistência a compressão paralela as fibras para a madeira cedrinho e pinus.

A partir dos resultados obtidos através da análise de dados, foi determinado o módulo de elasticidade.

Figura 21 – Corpo de prova de madeira após o ensaio de resistência à compressão paralela as fibras



Tabela 5 – Resultados do ensaio de resistência à compressão paralela as fibras – carga de ruptura

Corpo de Prova	Carga de ruptura (kN)
5	101,8
6	102,6
7	101,2
Desvio Padrão	0,7023769
Média (kN)	101,87
Coefficiente de variação	0,689506

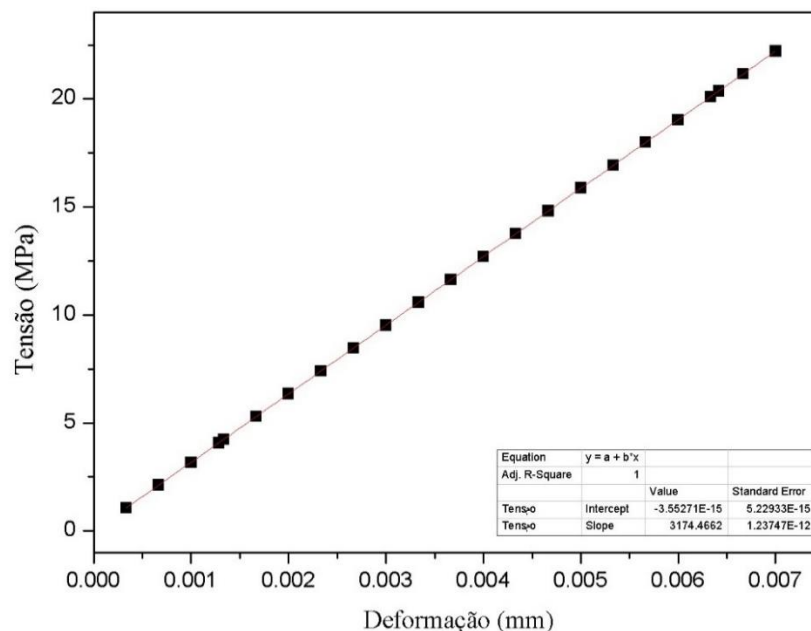
Tabela 6 – Resultados do ensaio de resistência à compressão paralela as fibras – carregamento e deslocamento

CORPOS DE PROVA					
5		6		7	
Deslocamento (mm)	Carga (kN)	Deslocamento (mm)	Carga (kN)	Deslocamento (mm)	Carga (kN)
0,2	11	0,2	12	0,1	4
0,3	15	0,3	17	0,2	7,4
0,4	19,6	0,4	20,2	0,3	11,4
0,5	25	0,5	25	0,4	17,2
0,6	31,4	0,6	29,4	0,5	22
0,7	37			0,6	28,6
0,8	41,4			0,7	35
0,9	48			0,8	39
1	54			0,9	44

Nas Tabelas 5 e 6 estão apresentados valores considerados de carga de ruptura, de carregamento e deslocamento atingidos nos ensaios de compressão paralela as fibras da madeira Cedrinho.

A partir dos valores encontrados, foi plotado o gráfico tensão versus deformação, apresentado na Figura 22.

Figura 22 – Tensão versus deformação resultante do ensaio de resistência à compressão paralela as fibras



Baseado nos resultados obtidos pelo ensaio de resistência à compressão paralela as fibras, usando o método de regressão linear simples, calculado através do Microsoft Excel, estão registrados na Tabela 7 os valores de carga de ruptura, tensão de ruptura e módulo de elasticidade médios, desvio padrão e coeficiente de variação para a madeira Cedrinho.

Tabela 7 – Resultados do ensaio de resistência à compressão paralela as fibras – Cedrinho

Carga de Ruptura (kN)	Tensão de Ruptura (Mpa)	Módulo de elasticidade (Mpa)	Desvio Padrão (kN)	Coefficiente de Variação (%)
101,8666667	40,74666667	3174,4662	0,702376917	0,689506136

Verificou-se que as propriedades da madeira Cedrinho apresentadas pelo IPT (1989) e obtidas neste estudo foram semelhantes, com exceção do módulo de elasticidade, o qual apresentou diferença superior a 60%.

Segundo Carrasco *et al.* (2016), a madeira está sujeita a variações de temperatura durante o processo de secagem, o que pode influenciar no valor resultante do módulo de elasticidade, principalmente, quando a temperatura ultrapassa 120 °C. Em relação a resistência à compressão, próxima dos 120 °C sofre uma diminuição. Verificou-se neste estudo que a resistência à compressão se manteve em relação à referência do IPT (1989) enquanto o módulo de elasticidade diminuiu em relação à esta mesma referência.

As variações apresentadas pelas propriedades de materiais oriundos de fontes naturais são inerentes ao seu processo de formação. De acordo com Zenid (2011) e Szucs *et al.* (2015), são aceitáveis variações de até 20% entre os valores nominais especificados para as madeiras.

Assim, pode-se considerar que os valores de densidade e resistência à compressão da madeira Cedrinho utilizado estão dentro dos valores esperados pelos pesquisadores e especificados na literatura.

Sendo o ensaio de resistência à compressão importante para a avaliação da resistência de um material, permitindo a seleção adequada do mesmo, estes resultados aplicados na Tabela 2 da NBR 7190-1 (ABNT, 2022, p.12), permitem concluir que a madeira de Cedrinho utilizada neste experimento é de **Classe de resistência D40**.

4.1.2 Caracterização simplificada das madeiras - Ensaio de resistência à compressão paralela as fibras da madeira Pinus

Da mesma forma, os corpos de prova da madeira Pinus também foram preparados conforme prescrição de norma, e deixados em câmara climatizada antes da realização do ensaio. No momento da realização do ensaio a umidade média dos corpos de prova da madeira Pinus foi de 14,08%.

Figura 23 – Ensaio de resistência à compressão paralela as fibras na madeira Pinus



A Figura 23 mostra o corpo de prova de número 12 de madeira Pinus, acoplado e pronto para a realização do ensaio, na máquina de teste universal da marca AMSLER, com capacidade de 20 tf, já a Figura 24, mostra o corpo de prova após o ensaio, onde é possível observar as deformações resultantes da aplicação de cargas sobre compressão direta.

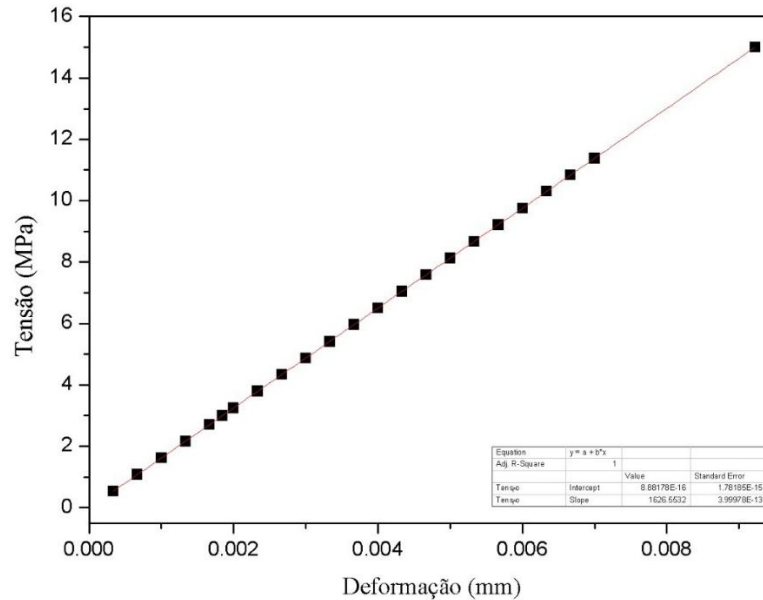
Figura 24 – Corpo de prova da madeira Pinus após o ensaio de resistência à compressão paralela as fibras



Seguindo as mesmas premissas dos ensaios realizados para a madeira Cedrinho, uma amostra de 12 corpos de prova de madeira pinus foi também submetida, conforme prescreve a NBR 7190-3 (ABNT, 2022), ao ensaio de resistência a compressão paralela as fibras para a obtenção dos valores da carga de ruptura. Os valores progressivos de carga e deslocamento foram também anotados para apenas 5 corpos de prova dentro da amostra total (12).

Considerados os valores encontrados nos ensaios, foi plotado o gráfico tensão versus deformação, apresentado na Figura 25 para a madeira Pinus.

Figura 25 – Tensão versus deformação resultante do ensaio de resistência à compressão paralela as fibras



A partir dos resultados considerados para o ensaio de resistência à compressão paralela as fibras, usando também o método de regressão linear simples, calculado através do Microsoft Excel, como já apresentado para os ensaios na madeira cedrinho, estão registrados na Tabela 10 os valores de carga de ruptura, tensão de ruptura e módulo de elasticidade médios, desvio padrão e coeficiente de variação para a madeira Pinus.

Tabela 10 – Resultados do ensaio de resistência à compressão paralela as fibras – Pinus

Carga de ruptura $F_{c0,max}$ (kN)	Tensão de ruptura f_{co} (MPa)	Módulo de elasticidade E (MPa)	Desvio padrão (kN)	Coefficiente de variação (%)
77,29	30,92	1658,88	12,59	16,29

Estes valores aplicados na Tabela 2 da NBR 7190-1 (2022, p.12), permitem concluir que a madeira de Pinus utilizada neste experimento é de **Classe de resistência D30**.

A partir destes resultados fica então comprovado o proposto, o uso de madeiras com diferentes classes de resistência, de modo a apresentar um ganho diferente em % de melhoria de resistência e rigidez, quando aplicado reforço na zona de tração com barras de GFRP.

4.2. RESISTÊNCIA À FLEXÃO DAS VIGAS DE MADEIRA

4.2.1 Viga referência de Cedrinho

Foram ensaiadas 5 vigas de madeira do tipo Cedrinho até a ruptura, as Figuras 26 (a) e (b) ilustram a sequência do ensaio.

Para que não houvesse dano ao equipamento, o relógio foi retirado antes do término do ensaio, o momento de retirada do relógio teve como critério os ruídos e estalos apresentados pela viga durante a aplicação das cargas.

Na Figura 26 (b) é possível observar que a viga de referência quando falha, rompe por tração das fibras, sendo um tipo de ruptura esperado para as solicitações à flexão, considerado frágil e que ocorre dentro da zona de tração.

Figura 26 – Sequência de ensaio de resistência à flexão de quatro pontos em vigas referência de Cedrinho. (a) início da aplicação de cargas; (b) instante de ruptura da viga.



O Apêndice B apresenta os valores obtidos nos ensaios de resistência à flexão de quatro pontos para todas as vigas ensaiadas da madeira Cedrinho e pinus, após o tratamento de valores espúrios. Estão apresentados no Apêndice D o tratamento de resultados dos ensaios de resistência a flexão de quatro pontos para todas as vigas ensaiadas da madeira cedrinho e pinus.

Na Tabela 11 são apresentados os valores considerados de carga de ruptura, e na Tabela 12 valores considerados de carregamento e deslocamento atingidos pelas vigas de referência da madeira Cedrinho nos ensaios de resistência à flexão de quatro pontos.

Tabela 11 - Resultados do ensaio de resistência à flexão de quatro pontos – carga de ruptura

CORPO DE PROVA	CARGA DE RUPTURA (kN)
VRefc2	17,1
VRefc3	17,7
VRefc4	14,4
VRefc5	17,9
Desvio Padrão	1,619413474
Média (kN)	16,775
Coefficiente de variação	9,653731589

Tabela 12 – Resultados do ensaio de resistência à flexão de quatro pontos – carregamento e deslocamento

(continua)

CORPOS DE PROVA							
Vrefc2		Vrefc3		Vrefc4		Vrefc5	
Deslocamento (mm)	Carga (kN)	Deslocamento (mm)	Carga (kN)	Deslocamento (mm)	Carga (kN)	Deslocamento (mm)	Carga (kN)
0,8	0,7	0,4	0,4	0,2	0,3	1	1
0,9	0,8	0,5	0,5	0,3	0,4	1,1	1,1
1	0,9	0,6	0,55	0,4	0,5	1,2	1,2
1,1	1	0,7	0,6	0,5	0,55	1,3	1,3
1,2	1,15	0,8	0,7	0,6	0,65	1,4	1,4
1,3	1,25	0,9	0,8	0,7	0,7	1,5	1,5
1,4	1,35	1	0,9	0,8	0,8	1,6	1,6
1,5	1,4	1,1	1,1	0,9	0,9	1,7	1,7
1,6	1,5	1,2	1,3	1	1	1,8	1,8
1,7	1,6	1,3	1,4	1,1	1,05	1,9	1,9
1,8	1,7	1,4	1,45	1,2	1,15	2	2
1,9	1,8	1,5	1,5	1,3	1,25	2,1	2,1
2	1,9	1,6	1,6	1,4	1,3	2,2	2,2
2,1	2	1,7	1,75	1,5	1,4	2,3	2,3
2,2	2,1	1,8	1,9	1,6	1,5	2,4	2,45
2,3	2,2	1,9	2	1,7	1,6	2,5	2,55
2,4	2,35	2	2,1	1,8	1,7	2,6	2,65
2,5	2,4	2,1	2,3	1,9	1,8	2,7	2,75
2,6	2,5	2,2	2,4	2	1,9	2,8	2,85
2,7	2,6	2,3	2,5	2,1	1,95	2,9	2,95
2,8	2,7	2,4	2,6	2,2	2,1	3	3,05
2,9	2,85	2,5	2,7	2,3	2,2	3,1	3,15
3	2,9	2,6	2,8	2,4	2,3	3,2	3,25
3,1	3	2,7	2,9	2,5	2,4	3,3	3,35
3,2	3,1	2,8	3	2,6	2,5	3,4	3,4
3,3	3,25	2,9	3,15	2,7	2,6	3,5	3,5
3,4	3,3	3	3,3	2,8	2,65	3,6	3,6
3,5	3,4	3,1	3,4	2,9	2,75	3,7	3,7
3,6	3,5	3,2	3,5	3	2,85	3,8	3,8
3,7	3,6	3,3	3,6	3,1	2,95	3,9	3,9
3,8	3,65	3,4	3,7	3,2	3,05	4	4
3,9	3,75	3,5	3,8	3,3	3,2	4,1	4,1
4	3,85	3,6	3,9	3,4	3,25	4,2	4,2
4,1	3,95	3,7	4	3,5	3,4	4,3	4,3
4,2	4,05	3,8	4,1	3,6	3,5	4,4	4,4
4,3	4,15	3,9	4,15	3,7	3,55	4,5	4,5
4,4	4,25	4	4,3	3,8	3,65	4,6	4,6

(continua)

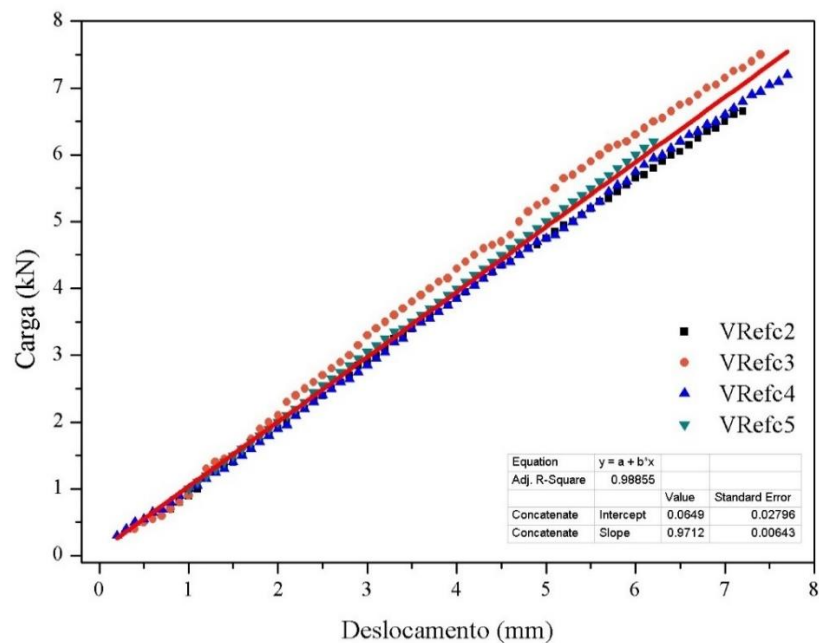
CORPOS DE PROVA							
Vrefc2		Vrefc3		Vrefc4		Vrefc5	
Deslocamento (mm)	Carga (kN)	Deslocamento (mm)	Carga (kN)	Deslocamento (mm)	Carga (kN)	Deslocamento (mm)	Carga (kN)
4,5	4,35	4,1	4,4	3,9	3,75	4,7	4,7
4,6	4,4	4,2	4,5	4	3,85	4,8	4,8
4,7	4,5	4,3	4,6	4,1	3,95	4,9	4,9
4,8	4,6	4,4	4,65	4,2	4,05	5	5
4,9	4,65	4,5	4,7	4,3	4,15	5,1	5,1
5	4,75	4,6	4,8	4,4	4,25	5,2	5,2
5,1	4,85	4,7	5	4,5	4,35	5,3	5,3
5,2	4,95	4,8	5,15	4,6	4,4	5,4	5,4
5,3	5	4,9	5,25	4,7	4,5	5,5	5,5
5,4	5,1	5	5,3	4,8	4,6	5,6	5,6
5,5	5,2	5,1	5,5	4,9	4,7	5,7	5,7
5,6	5,3	5,2	5,65	5	4,75	5,8	5,8
5,7	5,35	5,3	5,7	5,1	4,8	5,9	5,9
5,8	5,45	5,4	5,8	5,2	4,9	6	6
5,9	5,55	5,5	5,9	5,3	5	6,1	6,1
6	5,65	5,6	6	5,4	5,1	6,2	6,2
6,1	5,7	5,7	6,1	5,5	5,2		
6,2	5,8	5,8	6,15	5,6	5,3		
6,3	5,9	5,9	6,2	5,7	5,45		
6,4	6	6	6,3	5,8	5,55		
6,5	6,05	6,1	6,4	5,9	5,6		
6,6	6,15	6,2	6,5	6	5,75		
6,7	6,25	6,3	6,55	6,1	5,85		
6,8	6,35	6,4	6,65	6,2	5,95		
6,9	6,4	6,5	6,75	6,3	6		
7	6,5	6,6	6,8	6,4	6,1		
7,1	6,6	6,7	6,9	6,5	6,2		
7,2	6,65	6,8	7	6,6	6,3		
		6,9	7,05	6,7	6,35		
		7	7,15	6,8	6,45		
		7,1	7,25	6,9	6,5		
		7,2	7,3	7	6,6		
		7,3	7,4	7,1	6,7		
		7,4	7,5	7,2	6,8		
				7,3	6,9		

(conclusão)

CORPOS DE PROVA							
Vrefc2		Vrefc3		Vrefc4		Vrefc5	
Deslocamento (mm)	Carga (kN)	Deslocamento (mm)	Carga (kN)	Deslocamento (mm)	Carga (kN)	Deslocamento (mm)	Carga (kN)
				7,4	6,95		
				7,5	7,05		
				7,6	7,1		
				7,7	7,2		
				7,4	6,95		

A partir dos valores considerados, resulta o gráfico representativo da curva carga versus deslocamento apresentado na Figura 27.

Figura 27 – Carga versus deslocamento resultante do ensaio de resistência à flexão de quatro pontos nas vigas referência de Cedrinho



A análise da curva de carga versus deslocamento resultante do ensaio de resistência à flexão permite visualizar o comportamento do material. A região inicial da curva corresponde ao comportamento elástico, em que o material retorna à sua forma original após a remoção da carga. A interpretação da curva depende da análise dos valores de carga e deformação em diferentes pontos e da determinação das propriedades mecânicas do material.

Dando sequência ao programa experimental, a partir dos valores obtidos e dados retirados do gráfico de carga versus deslocamento, calculados a partir de regressão linear

simples, usando o Microsoft Excel, são apresentados na Tabela 13, valores médios para a carga de ruptura, tensão de ruptura e momento máximo da viga referência, módulo de deformação, desvio padrão e coeficiente de variação, representados pela reta na Figura 27.

Tabela 13 – Valores médios para vigas referência – Cedrinho

Carga de ruptura (kN)	16,775
Tensão de ruptura (MPa)	50,624143
Momento máximo (kNm)	3,0754
Módulo de deformação (MPa)	10570,31
Momento de inércia (kg.m²)	2,73375E-6
Flecha (cm)	0,363015
Rigidez (kNm²)	8,678197
Desvio padrão (kN)	1,6194
Coeficiente de variação (%)	9,65373

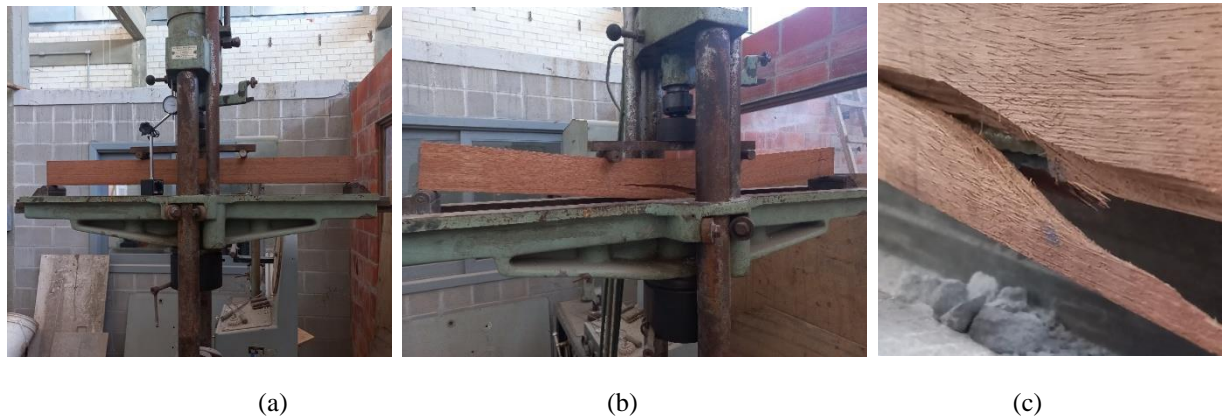
4.2.2 Viga de Cedrinho com reforço

Foram ensaiadas cinco vigas de madeira do tipo Cedrinho reforçadas à flexão, com uma barra de GFRP, até a ruptura, as Figuras 28 (a), (b) e (c), ilustram a sequência do ensaio.

Com o objetivo de melhorar a capacidade de resistência à flexão e a rigidez das vigas de referência, estas foram reforçadas com barra de GFRP na zona de tração, promovendo uma atuação de maneira composta entre a madeira e o reforço de GFRP ligados por meio de adesivo.

Na Figura 28 (c) aparece em detalhe o tipo de ruptura, novamente na zona de tração, rompendo por tração das fibras de maneira frágil. Observa-se que a ruptura se deu somente na madeira, ficando a barra de reforço intacta, apesar de apresentar uma falha também no adesivo.

Figura 28 – Sequência de ensaio de resistência à flexão de quatro pontos. (a) início da aplicação de cargas; (b) instante de ruptura da viga, (c) detalhe da ruptura.



Na Tabela 14 são apresentados valores considerados de carga de ruptura.

Tabela 14 - Resultados do ensaio de resistência à flexão de quatro pontos – carga de ruptura

CORPO DE PROVA	CARGA DE RUPTURA (kN)
1	18
4	14,9
5	19,8
Desvio Padrão	2,478574859
Média (kN)	17,56667
Coefficiente de variação	14,1095343

A Tabela 15 apresenta os valores considerados de carregamento e deslocamento atingidos pelas vigas reforçadas da madeira Cedrinho nos ensaios de resistência à flexão de quatro pontos.

Tabela 15 – Resultados do ensaio de resistência à flexão de quatro pontos – carregamento e deslocamento

(continua)

VPc1		VPc4		VPc5	
Deslocamento (mm)	Carga (kN)	Deslocamento (mm)	Carga (kN)	Deslocamento (mm)	Carga (kN)
0,3	0,3	0,4	0,5	0,3	0,5
0,4	0,4	0,5	0,6	0,4	0,6
0,5	0,45	0,6	0,7	0,5	0,65
0,6	0,55	0,7	0,8	0,6	0,7
0,7	0,65	0,8	0,9	0,7	0,8
0,8	0,75	0,9	1	0,8	0,9
0,9	0,9	1	1,1	0,9	1
1	1	1,1	1,2	1	1,05
1,1	1,1	1,2	1,3	1,1	1,1
1,2	1,2	1,3	1,4	1,2	1,2
1,3	1,3	1,4	1,5	1,3	1,35
1,4	1,4	1,5	1,6	1,4	1,45
1,5	1,5	1,6	1,7	1,5	1,5

(conclusão)

VPc1		VPc4		VPc5	
Deslocamento (mm)	Carga (kN)	Deslocamento (mm)	Carga (kN)	Deslocamento (mm)	Carga (kN)
1,6	1,6	1,7	1,8	1,6	1,65
1,7	1,7	1,8	1,9	1,7	1,7
1,8	1,8	1,9	2	1,8	1,75
1,9	1,9	2	2,1	1,9	1,8
2	2	2,1	2,2	2	1,95
		2,2	2,3	2,1	2,05
		2,3	2,4	2,2	2,15
		2,4	2,5	2,3	2,25
		2,5	2,6	2,4	2,35
		2,6	2,7	2,5	2,45
		2,7	2,8	2,6	2,55
		2,8	2,9	2,7	2,65
		2,9	3	2,8	2,75
		3	3,1	2,9	2,8
		3,1	3,2	3	2,9
		3,2	3,3	3,1	3
		3,3	3,4	3,2	3,15
		3,4	3,5	3,3	3,2
		3,5	3,6	3,4	3,3
		3,6	3,7	3,5	3,4
		3,7	3,8	3,6	3,5

A partir dos valores obtidos no ensaio resulta o gráfico carga versus deslocamento apresentado na Figura 29.

Os valores obtidos e dados retirados do gráfico de carga versus deslocamento representados pela reta na Figura 29, resultam nos valores médios para a carga de ruptura, tensão de ruptura e momento máximo referência, módulo de deformação, desvio padrão e coeficiente de variação, para viga de madeira de cedrinho com reforço, apresentados na tabela 16.

Figura 29 – Carga versus deslocamento resultante do ensaio de resistência a flexão nas vigas de Cedrinho com reforço

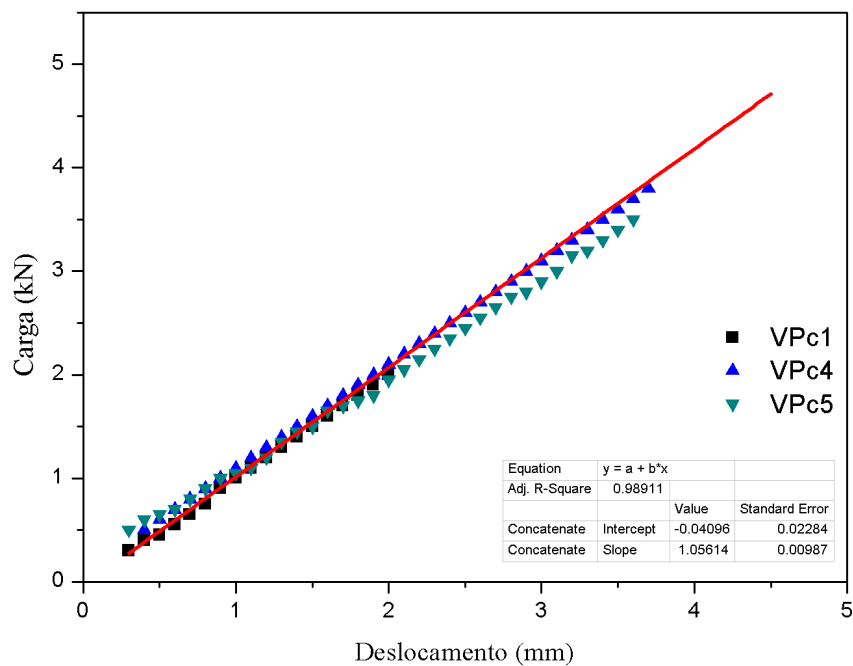


Tabela 16– Valores médios para vigas com reforço – Cedrinho

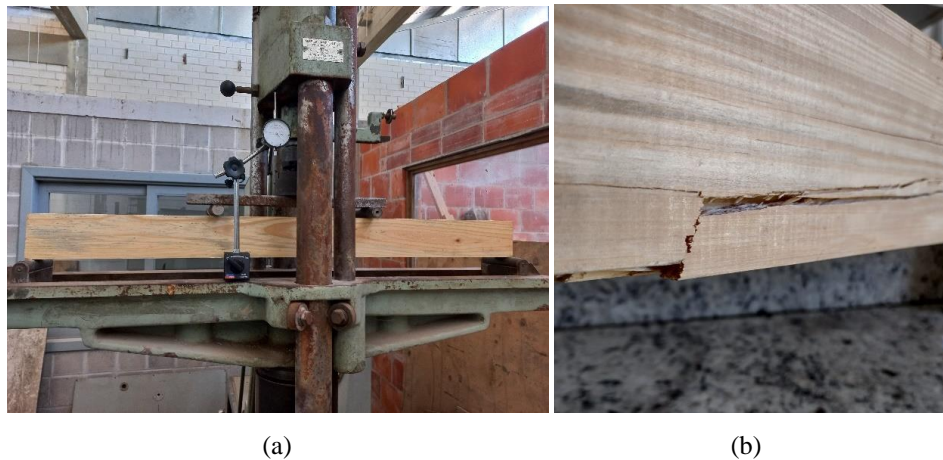
Carga de ruptura (kN)	17,56667
Tensão de ruptura (MPa)	53,01326
Momento máximo (kNm)	3,2205556
Módulo de deformação (MPa)	9675,9237
Momento de inércia (kg.m²)	1,08057E-5
Flecha (cm)	0,14020282
Rigidez (kNm²)	34,30245
Desvio padrão (kN)	2,47857
Coefficiente de variação (%)	14,1095343

4.2.3 Viga referência de Pinus

Foram ensaiadas 5 vigas de madeira do tipo Pinus até a ruptura. As Figuras 30 (a) e (b), ilustram a sequência do ensaio.

O tipo de ruptura é mostrado na Figura 30 (b). Como esperado rompeu por tração das fibras, na zona de tração, do tipo frágil.

Figura 30 – Sequência de ensaio de resistência à flexão de quatro pontos. (a) início da aplicação de cargas; (b) momento de ruptura da viga.



Na Tabela 17 são apresentados os valores considerados para carga de ruptura e, na Tabela 18 os valores de carregamento e deslocamento considerados para as vigas de referência da madeira Pinus nos ensaios de resistência à flexão de quatro pontos.

Tabela 17- Resultados do ensaio de resistência à flexão de quatro pontos – carga de ruptura

CORPO DE PROVA	CARGA DE RUPTURA (kN)
1	15,7
2	15
5	14,5
Desvio Padrão	0,602771377
Média (kN)	15,06666667
Coefficiente de variação	4,000694982

Tabela 18 – Resultados do ensaio de resistência à flexão de quatro pontos – carregamento e deslocamento

(continua)

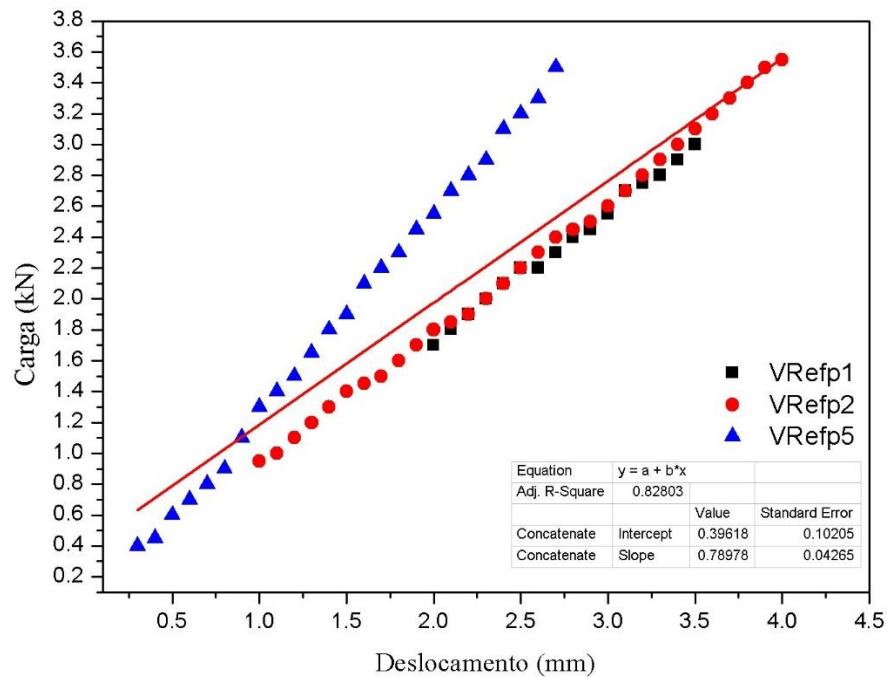
CORPO DE PROVA					
VRefp1		VRefp2		VRefp5	
Deslocamento (mm)	Carga (kN)	Deslocamento (mm)	Carga (kN)	Deslocamento (mm)	Carga (kN)
2	1,7	1	0,95	0,3	0,4
2,1	1,8	1,1	1	0,4	0,45
2,2	1,9	1,2	1,1	0,5	0,6
2,3	2	1,3	1,2	0,6	0,7
2,4	2,1	1,4	1,3	0,7	0,8
2,5	2,2	1,5	1,4	0,8	0,9
2,6	2,2	1,6	1,45	0,9	1,1
2,7	2,3	1,7	1,5	1	1,3
2,8	2,4	1,8	1,6	1,1	1,4
2,9	2,45	1,9	1,7	1,2	1,5
3	2,55	2	1,8	1,3	1,65
3,1	2,7	2,1	1,85	1,4	1,8

(conclusão)

CORPO DE PROVA					
VRefp1		VRefp2		VRefp5	
Deslocamento (mm)	Carga (kN)	Deslocamento (mm)	Carga (kN)	Carga (kN)	Deslocamento (mm)
3,2	2,75	2,2	1,9	1,5	1,9
3,3	2,8	2,3	2	1,6	2,1
3,4	2,9	2,4	2,1	1,7	2,2
3,5	3	2,5	2,2	1,8	2,3
		2,6	2,3	1,9	2,45
		2,7	2,4	2	2,55
		2,8	2,45	2,1	2,7
		2,9	2,5	2,2	2,8
		3	2,6	2,3	2,9
		3,1	2,7	2,4	3,1
		3,2	2,8	2,5	3,2
		3,3	2,9	2,6	3,3
		3,4	3	2,7	3,5
		3,5	3,1		
		3,6	3,2		
		3,7	3,3		
		3,8	3,4		
		3,9	3,5		
		4	3,55		

A partir dos valores obtidos, resulta o gráfico carga versus deslocamento apresentado na Figura 31.

Figura 31 – Carga versus deslocamento resultante do ensaio de resistência à flexão nas vigas referência de Pinus



A partir dos valores obtidos e dados retirados do gráfico de carga versus deslocamento representados pela reta na Figura 31, resultam nos valores médios para a carga de ruptura, tensão de ruptura e momento máximo referência, módulo de deformação, desvio padrão e coeficiente de variação, para viga referência da madeira Pinus, apresentados na tabela 19.

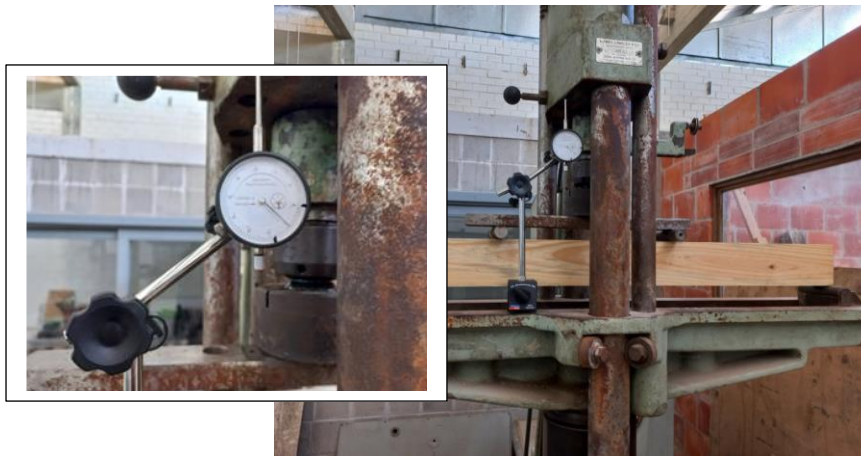
Tabela 19 – Valores médios para vigas referência – Pinus

Carga de ruptura (kN)	15,0666
Tensão de ruptura (MPa)	45,46868
Momento máximo (kNm)	2,7622
Módulo de deformação (MPa)	10494,85
Módulo de inércia (kg.m²)	2,73375E-6
Flecha (cm)	0,591231513
Rigidez (kNm²)	4,446589
Desvio padrão (kN)	0,60277
Coeficiente de variação (%)	4,00069

4.2.4 Viga de Pinus com reforço

Foram ensaiadas 5 vigas de madeira do tipo Pinus reforçadas com uma barra de GFRP até a ruptura. As Figuras 32 (a), (b) e (c), ilustram a sequência do ensaio.

Figura 32 – Sequência de ensaio de resistência à flexão de quatro pontos. (a) início da aplicação de cargas; (b) momento de ruptura da viga; (c) detalhe ruptura



(a)



(b)



(c)

A Figura 32 (c) mostra o tipo de ruptura sofrido, como esperado novamente na zona de tração, rompendo por tração das fibras. Observa-se que a ruptura se deu somente na madeira, a barra de reforço permanece intacta, mas descolada da madeira por falha no adesivo.

Da mesma maneira que foi feito com a viga de Cedrinho, a viga de referência da madeira Pinus, recebeu um reforço de uma barra de GFRP na zona de tração, com o objetivo de promover um melhoria na resistência à flexão e rigidez, formando uma seção unificada entre a madeira e o reforço de GFRP ligados por meio de adesivo.

Na Tabela 20 são apresentados os valores de carga de ruptura, e na Tabela 21 os valores de carregamento e deslocamento considerados para as vigas reforçadas da madeira Pinus nos ensaios de resistência à flexão de quatro pontos.

Tabela 20 - Resultados do ensaio de resistência à flexão de quatro pontos – carga de ruptura

CORPO DE PROVA	CARGA DE RUPTURA (kN)
1	21,3
2	24
4	21,9
5	23,3
Desvio Padrão	1,241974235
Média (kN)	22,625
Coefficiente de variação	5,489388883

Tabela 21 – Resultados do ensaio de resistência à flexão de quatro pontos – carregamento e deslocamento

(continua)

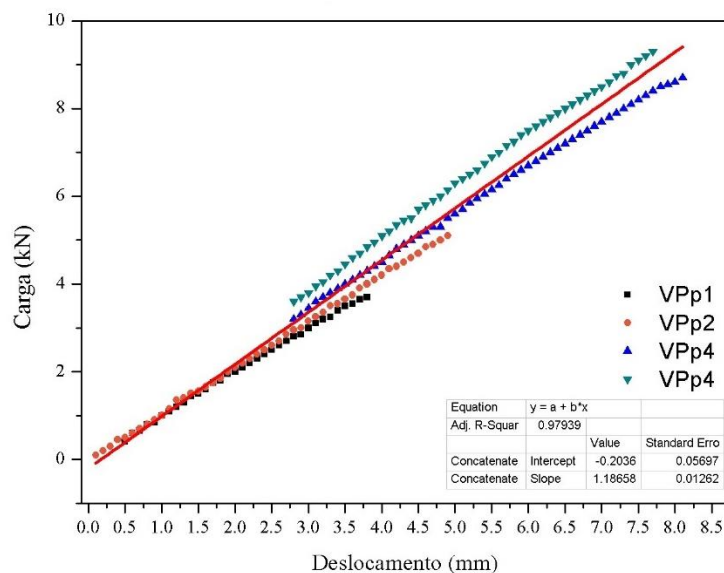
CORPO DE PROVA							
VPp1		VPp2		VPp4		VPp5	
Deslocamento (mm)	Carga (kN)	Deslocamento (mm)	Carga (kN)	Deslocamento (mm)	Carga (kN)	Deslocamento (mm)	Carga (kN)
0,5	0,4	0,1	0,1	2,8	3,2	2,8	3,6
0,6	0,6	0,2	0,2	2,9	3,3	2,9	3,7
0,7	0,65	0,3	0,3	3	3,45	3	3,8
0,8	0,8	0,4	0,45	3,1	3,6	3,1	3,95
0,9	0,85	0,5	0,5	3,2	3,7	3,2	4,05
1	1	0,6	0,6	3,3	3,8	3,3	4,2
1,1	1,1	0,7	0,7	3,4	3,9	3,4	4,3
1,2	1,2	0,8	0,8	3,5	4	3,5	4,45
1,3	1,3	0,9	0,9	3,6	4,1	3,6	4,6
1,4	1,45	1	1	3,7	4,2	3,7	4,7
1,5	1,5	1,1	1,15	3,8	4,3	3,8	4,85
1,6	1,6	1,2	1,35	3,9	4,4	3,9	4,95
1,7	1,75	1,3	1,4	4	4,5	4	5,1
1,8	1,8	1,4	1,5	4,1	4,65	4,1	5,2
1,9	1,95	1,5	1,55	4,2	4,8	4,2	5,35
2	2	1,6	1,65	4,3	4,9	4,3	5,45
2,1	2,1	1,7	1,75	4,4	5	4,4	5,5
2,2	2,2	1,8	1,85	4,5	5,1	4,5	5,7
2,3	2,3	1,9	2	4,6	5,2	4,6	5,8
2,4	2,4	2	2,1	4,7	5,3	4,7	5,9
2,5	2,5	2,1	2,2	4,8	5,3	4,8	6
2,6	2,6	2,2	2,3	4,9	5,5	4,9	6,15
2,7	2,7	2,3	2,4	5	5,6	5	6,3
2,8	2,8	2,4	2,5	5,1	5,7	5,1	6,4
2,9	2,85	2,5	2,6	5,2	5,85	5,2	6,5
3	3	2,6	2,7	5,3	5,95	5,3	6,6
3,1	3,1	2,7	2,85	5,4	6,05	5,4	6,75
3,2	3,2	2,8	2,95	5,5	6,15	5,5	6,9
3,3	3,25	2,9	3	5,6	6,25	5,6	7
3,4	3,4	3	3,15	5,7	6,4	5,7	7,15
3,5	3,5	3,1	3,25	5,8	6,5	5,8	7,25
3,6	3,55	3,2	3,35	5,9	6,6	5,9	7,4
3,7	3,65	3,3	3,5	6	6,7	6	7,5
3,8	3,7	3,4	3,55	6,1	6,8	6,1	7,6
		3,5	3,65	6,2	6,9	6,2	7,7
		3,6	3,75	6,3	7	6,3	7,8
		3,7	3,9	6,4	7,1	6,4	7,9
		3,8	4	6,5	7,2	6,5	8

(conclusão)

CORPO DE PROVA							
VPp1		VPp2		VPp4		VPp5	
Deslocamento (mm)	Carga (kN)	Deslocamento (mm)	Carga (kN)	Deslocamento (mm)	Carga (kN)	Deslocamento (mm)	Carga (kN)
		3,9	4,1	6,6	7,3	6,6	8,1
		4	4,2	6,7	7,4	6,7	8,2
		4,1	4,35	6,8	7,5	6,8	8,3
		4,2	4,4	6,9	7,6	6,9	8,4
		4,3	4,5	7	7,7	7	8,5
		4,4	4,6	7,1	7,8	7,1	8,6
		4,5	4,7	7,2	7,9	7,2	8,75
		4,6	4,85	7,3	8	7,3	8,8
		4,7	4,9	7,4	8,1	7,4	9
		4,8	5	7,5	8,2	7,5	9,1
		4,9	5,1	7,6	8,3	7,6	9,2
				7,7	8,4	7,7	9,3
				7,8	8,5		
				7,9	8,55		
				8	8,6		
				8,1	8,7		

A partir dos valores obtidos no ensaio resulta o gráfico carga versus deslocamento apresentado na Figura 33.

Figura 33 – Carga versus deslocamento resultante do ensaio de resistência à flexão nas vigas de Pinus com reforço



A partir dos valores obtidos e dados retirados do gráfico de carga versus deslocamento representados pela reta na Figura 33, resultam nos valores médios para a carga de ruptura, tensão de ruptura e momento máximo, módulo de deformação, desvio padrão e coeficiente de variação, para viga da madeira Pinus com reforço, apresentados na tabela 22.

Tabela 22 – Valores médios para vigas com reforço – Pinus

Carga de ruptura (kN)	22,625
Tensão de ruptura (MPa)	68,2785
Momento máximo (kNm)	4,1479
Módulo de deformação (MPa)	9292,11
Momento de inércia (kg.m²)	1,56227E-5
Flecha (cm)	0,199515
Rigidez (kNm²)	25,41120
Desvio padrão (kN)	1,24197
Coefficiente de variação (%)	5,48938

4.3 SÍNTESE E COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

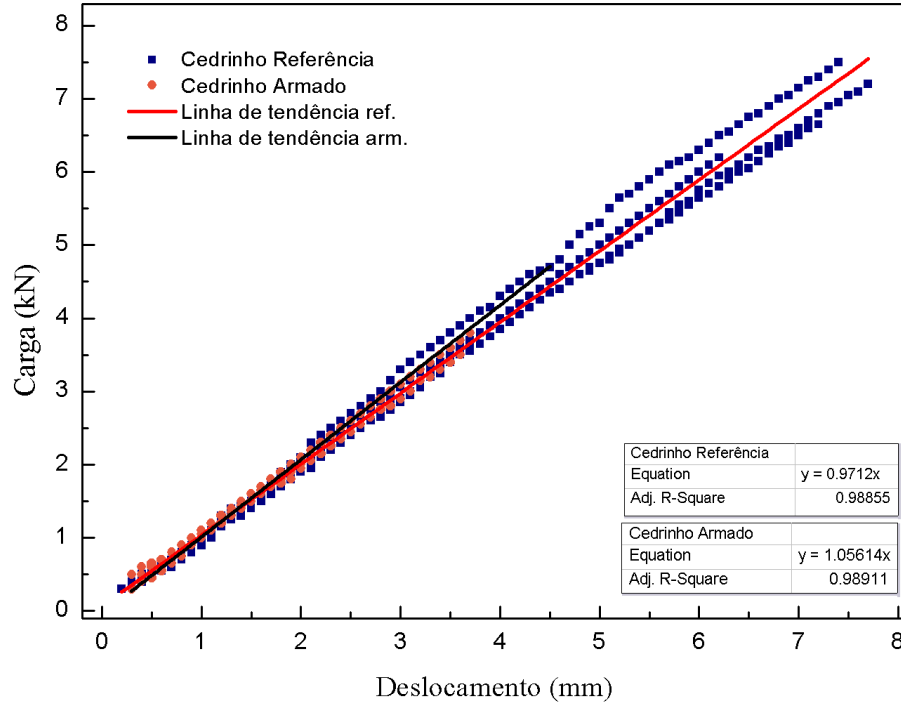
Considerada a questão de dimensionamento de vigas de madeira reforçadas com barras de GFRP, tem-se como principais fatores de limitação, os deslocamentos e aberturas de fissuras e trincas, resultantes da viga estrutural ter um comportamento melhor ou pior em relação a resistência à flexão. A seguir apresenta-se a síntese e comparação entre as vigas referência e reforçadas, para cada espécie de madeira estudada e entre as vigas de madeira reforçadas com barras de GFRP.

(a) Cedrinho

A partir dos resultados, se comparadas as vigas de referência com as vigas reforçadas na madeira Cedrinho, pode-se observar que as vigas reforçadas com barra de GFRP apresentam maior rigidez. Isso pode ser visualizado na Figura 34, a partir da inclinação da reta representativa dos valores médios para cada viga.

Neste experimento observa-se uma melhoria na rigidez e resistência à flexão da peça estrutural com reforço em comparação a viga referência. Partindo de um reforço percentual de 0,5% de GFRP (barra de 5.0 mm) em relação a área de madeira da peça, a resistência teve uma melhoria de 4,7% em média.

Figura 34 – Carga versus deslocamento - comparativo entre as vigas referência e vigas reforçadas com GFRP na madeira Cedrinho



Na Tabela 23 apresenta-se o comparativo entre a viga referência e a viga reforçada com barra de GFRP.

Tabela 23 – Comparativo entre viga referência e viga reforçada – Cedrinho

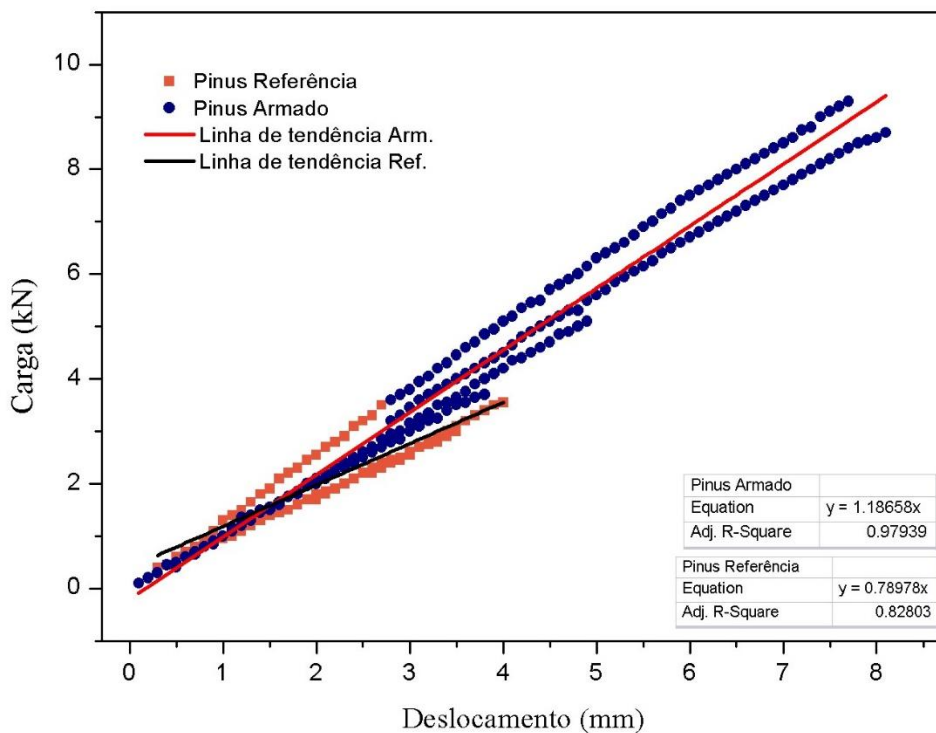
Amostra	VRefc	VPc
% armadura	-	0,5
Carga de ruptura (kN)	16,775	17,56667
Tensão de ruptura (MPa)	50,6241	53,01326
Momento máximo (kNm)	3,075	3,22055
Flecha (cm)	0,3630	0,140203
Rigidez (kNm ²)	8,6781	34,3024
% de aumento resistência	-	4,7

Buscando os conceitos de resistência e rigidez apresentados no Capítulo 2, item 2.3.1, a partir dos dados apresentados na Tabela 23, observa-se que para vigas de madeira do tipo Cedrinho, o reforço usado na zona de tração com barra de GFRP no percentual de 0,5%, aumentou a rigidez e a resistência à flexão da peça, ou seja, a viga reforçada se tornou menos flexível.

(b) Pinus

Fazendo a análise comparativa entre vigas de referência e vigas reforçadas na madeira Pinus, observa-se que as vigas reforçadas com barra de GFRP apresentam maior rigidez. Isso pode ser visualizado a partir da inclinação da reta representativa dos valores médios para cada viga, na Figura 35.

Figura 35 – Carga versus deslocamento - comparativo entre as vigas referência e vigas reforçadas com GFRP na madeira Pinus



Da mesma maneira que foi verificado para a madeira Cedrinho, tendo como base o gráfico comparativo entre a viga referência e a viga reforçada de madeira Pinus, observa-se também uma melhoria na rigidez e resistência à flexão da peça estrutural com reforço em comparação a viga referência. Também partindo de um mesmo reforço percentual de 0,5% de GFRP (barra de 5.0 mm) em relação a área de madeira, a resistência teve uma melhoria de 50,2% em média. A Tabela 24 apresenta o comparativo entre a viga referência e a viga reforçada da madeira pinus.

Tabela 24 – Comparativo entre viga referência e viga reforçada – Pinus

Amostra	VRefp	VPp
% armadura	-	0,5
Carga de ruptura (kN)	15,066	22,625
Tensão de ruptura (MPa)	45,4686	68,2784
Momento máximo (kNm)	2,7622	4,1479
Flecha (cm)	0,59123	0,199515
Rigidez (kNm²)	4,4465	25,4112
% de aumento resistência	-	50,2

Aqui observa-se que para vigas de madeira do tipo Pinus, o reforço usado na zona de tração com barra de GFRP no percentual de 0,5%, aumentou a capacidade de rigidez e sua resistência à flexão.

(c) Cedrinho versus Pinus

Ainda se comparadas a viga de madeira reforçada com barra de GFRP de Cedrinho com a viga de madeira reforçada com barra de GFRP de Pinus, a partir dos valores médios de carga de ruptura, tensão de ruptura e momento máximo, pode-se observar que a viga de Pinus não só teve valores mais altos como também apresentou um percentual maior de melhoria, conforme mostra a Tabela 25.

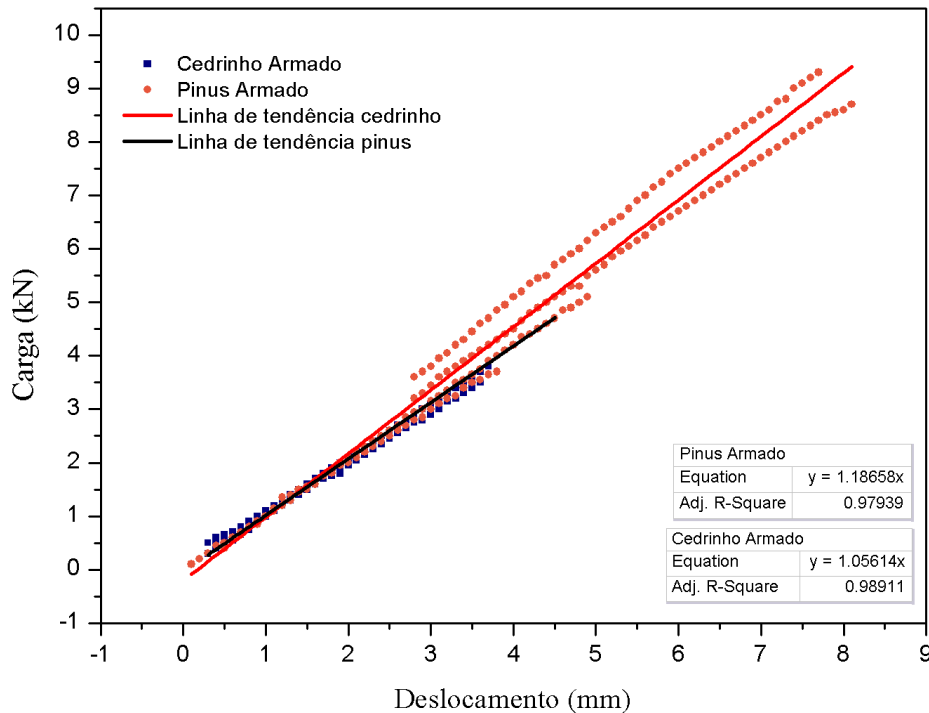
Tabela 25 – Comparativo entre as vigas reforçadas de Cedrinho e Pinus

Amostra	VPc	VPp
% armadura	0,5	0,5
Carga de ruptura (kN)	17,56667	22,625
Tensão de ruptura (MPa)	53,01326	68,2784
Momento máximo (kNm)	3,22055	4,1479
Flecha (cm)	0,140203	0,199515
Rigidez (kNm²)	34,3024	25,4112
% de aumento resistência	4,7	50,2

O fato de a viga de madeira de Pinus com reforço ter apresentado maior percentual de melhoria de resistência à flexão se deve justamente a condição de que uma madeira de menor classe de resistência, quando solicitada no conjunto madeira mais reforço com a barra de GFRP, demanda maior deformação, proporcionado pelo reforço com FRP, o qual possibilita o uso total da capacidade de resistência do conjunto.

A Figura 36 apresenta o comparativo entre os resultados obtidos para as vigas reforçadas de Cedrinho e Pinus.

Figura 36 – Carga versus deslocamento - comparativo entre as vigas reforçadas com GFRP na madeira Cedrinho e Pinus



Os resultados deste experimento vão de encontro com o que outros autores também encontraram em estudos referentes ao uso de vigas de madeira como elemento estrutural e o uso de reforço em vigas de madeira.

Lantos (1970) comprovou em suas pesquisas que vigas de madeira reforçadas com barras de aço na zona tracionada e comprimida, obtiveram ganhos de rigidez, e proporcionalmente, vigas de madeira de menor qualidade obtiveram maior ganho a partir de determinado percentual de reforço, se comparadas a vigas de melhor qualidade.

Gentile, Svecova e Rizkalla (2002), Corradi e Borri (2007) e Raftery e Whelan (2014) consideram em suas pesquisas o uso do reforço em vigas de madeira com materiais compósitos colados pela fusão barra/madeira por uma resina, através de ranhuras feitas na própria estrutura de madeira, concluindo ser a Técnica NSM a de melhor eficiência para o uso madeira mais barra de FRP. Ainda as pesquisas desenvolvidas por De Lorenzis, Scialpi e La Tegola (2005), Ahmad e Saleh (2010) e Raftery e Whelan (2014) apontavam que o uso do reforço com barras de FRP na zona de tração, resulta em uma melhoria na capacidade de carga, na rigidez à flexão e na ductilidade de deformação das vigas de madeira.

Gentile, Svecova e Rizkalla (2002) discorrem sobre a importância da reabilitação e do reparo de infraestruturas considerando o fator deterioração do material e limitações na

capacidade de suportar os atuais níveis de carga de solicitação de uma peça estrutural, e com este objetivo, desenvolveu um programa experimental para estudar o comportamento à flexão de vigas de madeira serrada de abeto de Douglas (Conífera nativa da América do Norte), tratadas com creosoto e reforçadas com barras de GFRP, todas testadas até a falha. As taxas percentuais de reforço ficaram entre 0,27 e 0,82%, obtendo uma melhoria na resistência a flexão de 18 a 46%, em comparação com vigas não reforçadas de referência. Os resultados mostraram que o uso da técnica experimental proposta também alterou o modo de falha, passando de falha frágil na zona de tração para falha de compressão. Os resultados da pesquisa indicaram que o uso de barras de GFRP próximas à superfície, acaba por sobrepujar o efeito de defeitos locais na madeira, aumentando a resistência à flexão dos membros. Neste experimento, quando comparados os resultados obtidos referentes a aplicação de carga e deslocamento, também é possível observar uma alteração no comportamento das madeiras. Em destaque para a madeira de Pinus, a técnica de reforço com barra de GFRP, melhorou a condição da peça estrutural, superando o fato de ser uma madeira de classe de resistência baixa, sujeita a defeitos.

Ahmad e Saleh (2010) apresentam em sua pesquisa, uma investigação do comportamento à flexão de vigas de madeira reforçadas com barras de GFRP, no experimento foram testadas vigas de madeira da espécie Yellow Meranti (nativa de Bornéu na Península Malaia, madeira considerada dura, madeira de lei), todas foram ensaiadas até a falha sob carregamento de quatro pontos. Os resultados mostraram que as vigas reforçadas tiveram um desempenho melhor do que a viga controle. A carga última aumentou entre 20 e 30% para as vigas reforçadas em comparação com a viga de controle. A rigidez aumentou entre 24 e 60% para as vigas reforçadas. A viga é categorizada como sub-reforçada, balanceada e super-reforçada se a porcentagem de armadura de GFRP for inferior a 0,32%, entre 0,32 e 0,35% e superior a 0,35%, respectivamente. Neste experimento, os pesquisadores observaram que o modo de falha foi governado pela resistência das vigas de madeira, e que não ocorreu nenhuma ruptura nas barras de GFRP. O uso do adesivo epóxi Sikadur® -30 apresentou bom desempenho como agente de ligação entre as barras e a madeira. O Quadro 5, apresenta os resultados em relação ao modo de falha de acordo com o percentual de armadura utilizado no reforço.

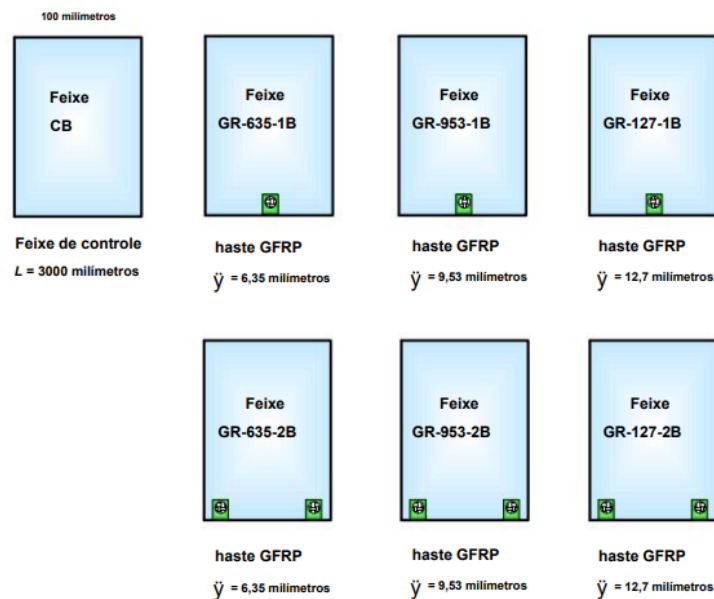
A Figura 37, por sua vez, ilustra os diferentes tipos de seção transversal da viga reforçada com hastes de GFRP, usada por Ahmad e Saleh (2010).

Quadro 5 – Modos de falha em vigas de madeira armadas à flexão com barras de GFRP

Modo de falha da área do feixe de GFRP		
CB		Falha na flexão com ruptura de tração simples (sub-reforçada)
GR 635-1B	0,16%	Falha na flexão com ruptura de tração simples (sub-reforçada)
GR 635-2B	0,32%	Esmagamento e ruptura de tração simples ocorreram simultaneamente (reforçado com equilíbrio)
GR 953-1B	0,35%	Esmagamento seguido de ruptura de tração simples (reforçada com equilíbrio)
GR 127-1B	0,63%	Esmagamento seguido de ruptura de tração simples (reforçado)
GR 953-2B	0,71%	Esmagamento seguido de ruptura de tração simples e, por último ruptura súbita por cisalhamento horizontal (super reforçado)
GR 127-2B	1,27%	Esmagamento seguido de ruptura de tração simples (reforçado)

Fonte: Adaptado de Ahmad e Saleh (2010).

Figura 37 - Seção transversal da viga reforçada com hastes de GFRP



Fonte: Retirado de Ahmad e Saleh (2010).

Observa-se que os modelos GR 953-1B e GR 127-1B, compreendem a faixa de 0,35 a 0,60% de armadura, sendo a falha do tipo esmagamento da madeira seguido de ruptura de tração simples. Esta faixa de 0,35 a 0,60% de armadura foi destacada por abranger o percentual de 0,5% utilizado neste estudo, o qual também apresentou tal comportamento no modo de ruptura, mediante uma melhoria na resistência e rigidez das peças reforçadas.

Raftery e Whelan (2014) desenvolveram um programa de teste experimental com a proposta de análise do reforço à flexão de vigas de madeira laminada colada (MLC) de baixo teor (baixa resistência) usando barras de GFRP. Foi explorado uma variação de configurações e arranjos de posicionamento e percentual de armaduras, sendo observado o desempenho de vigas de MLC não reforçadas, vigas de MLC reforçadas usando vários arranjos de ranhuras e diferentes tamanhos de barras de GFRP com reforço simples e duplo. Estes testes apontaram que o arranjo geométrico das ranhuras entalhadas é importante, sendo o melhor desempenho em ranhuras arredondadas e que o desempenho mecânico das vigas reforçadas, pode ser melhorado pela redução dos efeitos das concentrações de tensões. Não houve uma vantagem no uso de várias barras de menor diâmetro por ranhura para aumentar a área de superfície de ligação ser vantajoso ao reforçar as vigas. Madeiras laminadas de baixa resistência, sem o reforço, apresentaram um comportamento elástico linear com falhas de tração em comparação com o comportamento não linear das vigas reforçadas em sua face de tração. A partir de um percentual de 1,4% de armadura de reforço na zona de tração, usando ranhuras circulares, chegou-se em melhoria de 11,2% nos valores médios de rigidez da viga de madeira em comparação com as vigas de MLC não reforçadas.

Dessa análise é possível concluir que o dimensionamento de viga de madeira reforçadas com GFRP deve ser feito com o objetivo de se utilizar a totalidade da capacidade resistente da madeira e o máximo da capacidade resistente das armaduras de GFRP, condicionadas pelo fator flexibilidade do conjunto, buscando uma falha ainda sem aviso e abrupta, pelas características dos materiais, mas não de maneira a condenação da peça estrutural.

5 CONCLUSÕES

Neste capítulo são retomados hipóteses, objetivos e limitações para a apresentação das conclusões obtidas e, também, de possíveis sugestões para atividades futuras, visando uma continuidade e complementação à pesquisa.

De acordo com a revisão bibliográfica que foi realizada, é possível inferir que a madeira, em geral, tem pouca plasticidade. Sob carga de ruptura, suas deflexões continuam a aumentar linearmente até que o membro se rompa com a fibra de tração ou com a divisão da fibra de compressão. Neste ponto, o membro perde sua capacidade de carga e este tipo de falha ocorre sem aviso, portanto, de modo a perda total da peça estrutural.

Um programa experimental foi proposto neste estudo para a análise do comportamento à flexão em vigas de madeira reforçadas com barras de GFRP, pelo método NSM, em comparação a vigas referência sem reforço, com o objetivo de avaliar a possibilidade de melhoria no comportamento à flexão da peça estrutural, de modo que a falha passe a ocorrer de maneira a não condenação da peça estrutural.

Os resultados deste programa experimental foram apresentados e discutidos no capítulo 4, sendo válidos especificamente para este estudo e para as condições em que este foi desenvolvido, conforme já enunciado na seção 1.2.5.

Deste contexto as conclusões obtidas estão relatadas a seguir:

- O uso de reforço em vigas de madeira com barra de GFRP, posicionada na zona tracionada, colada à viga através de adesivo epóxi bi-componente, unida à madeira por uma ranhura entalhada centralizada na largura da viga ao longo do seu comprimento, pelo método de reforço NSM, resulta em uma melhoria na resistência em comparação a vigas referência sem reforço.
- O uso do mesmo percentual de reforço (0,50%), e mesmo material de reforço (barra de GFRP), resultou em um percentual positivo de melhoria de resistência e rigidez maior em vigas de classe de resistência mais baixa.
- Na madeira Cedrinho a melhoria na resistência foi em média de 4,7%, obtendo-se também uma melhora na rigidez da peça com reforço.
- Na madeira Pinus, a melhoria na resistência foi em média 50,2%, obtendo-se também uma melhora na rigidez da peça com reforço.
- Nos ensaios realizados por este programa experimental, ficou evidente que vigas de madeira de classe de resistência mais baixa (Pinus) reforçadas com barras de GFRP, apresentaram deslocamentos inferiores aos das vigas referência, o que leva a cargas

superiores até a ruptura. No caso de madeira de classe de resistência maior (Cedrinho) o mesmo ocorreu.

Sugestões para pesquisas futuras

Embora alguns aspectos sejam bem compreendidos em relação a estruturas de madeira, são necessárias ainda pesquisas adicionais relacionadas:

- Ao comportamento a longo prazo de vigas reforçadas com barras de GFRP, pela técnica NSM;
- Ao desenvolvimento de pesquisas sobre a definição das características da interface FRP-madeira;
- Ao uso de reforço com barras de GFRP em elementos de madeira defeituosos;
- Ao estudo das influências dos defeitos no dimensionamento das estruturas de madeira;
- Às questões relativas à rigidez mencionada neste estudo, requerem uma análise mais aprofundada da mecânica do elemento composto madeira-FRP;
- A maior compreensão e mais detalhada dos mecanismos de ruptura da madeira reforçada com FRP, principalmente ruptura frágil por tração da madeira, possibilitando o desenvolvimento de projetos mais precisos que otimizam a segurança e a acessibilidade.

REFERÊNCIAS

ACI 440.1R. **Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars**. American Concrete Institute: Detroit, (MI), 2006.

ACI 440.2R. **Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening**. American Concrete Institute: Detroit, (MI), 2008.

ACI 440.3R. **Guide Test Methods for Fiber Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures**. American Concrete Institute: Farmington Hills, (MI), 2004.

AHMAD, Yusof. Bending behavior of timber beams strengthened using fiber reinforced polymer bars and plates. 2010. Tese - Universiti Teknologi Malaysia, 2010.

AHMAD, Yusof; SALEH, Abd. Latif. Flexural strengthening of timber beams using glass fibre reinforced polymer. **Electronic Journal of Structural Engineering**, v. 10, p. 45-56, 2010.

ALAM, Parvez; ANSELL, Martin P.; SMEDLEY, Dave. Mechanical repair of timber beams fractured in flexure using bonded-in reinforcements. **Composites Part B: Engineering**, v. 40, n. 2, p. 95-106, 2009.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI COMMITTEE 440 R State-of-Report on Fiber Reinforced Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, 1996.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI COMMITTEE 440.1R Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MADEIRA PROCESSADA MECANICAMENTE. **Estudo setorial 2022**. São Paulo: ABIMCI, 2022. 172p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7190-1: **Critérios de dimensionamento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

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

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

BAKIS, Charles E. et al. Fiber-reinforced polymer composites for construction-state-of-the-art review. **Journal of composites for construction**, v. 6, n. 2, p. 73-87, 2002.

BEER, Ferdinand P.; JOHNSTON JÚNIOR, E. Russell. **Resistência dos materiais**. São Paulo: Pearson Makron Books, 3^a. 2006. 1255p.

BENMOKRANE, Brahim et al. Durability of glass fiber-reinforced polymer reinforcing bars in concrete environment. **Journal of Composites for Construction**, v. 6, n. 3, p. 143-153, 2002.

BORRI, Antonio; CORRADI, Marco. Strengthening of timber beams with high strength steel cords. **Composites Part B: Engineering**, v. 42, n. 6, p. 1480-1491, 2011.

BORRI, Antonio; CORRADI, Marco; GRAZINI, Andrea. A method for flexural reinforcement of old wood beams with CFRP materials. **Composites Part B: Engineering**, v. 36, n. 2, p. 143-153, 2005.

BRADY, James F.; HARTE, Annette M.; ARIMA, T. Prestressed FRP flexural strengthening of softwood glue-laminated timber beams. In: **10th World conference on timber engineering (WCTE)**. 2008. p. 2-5.

BROUGHTON, J. G.; HUTCHINSON, A. R. Adhesive systems for structural connections in timber. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 2001;21(3):177–86.

BROUGHTON, J. G.; HUTCHINSON, A. R. Review of relevant materials and their requirements for timber repair and restoration. **LICONS (low intrusion conservation systems for timber structures, CRAF-1999-71216, Task 2.2, 2003.**

BUCHANAN, Andrew H. Bending strength of lumber. **Journal of structural engineering**, v. 116, n. 5, p. 1213-1229, 1990.

BULLEIT, William M. Reinforcement of wood materials: A review. **Wood and fiber Science**, p. 391-397, 1984.

BULLEIT, William M.; SANDBERG, L. Bogue; WOODS, Greg J. Steel-reinforced glued laminated timber. **Journal of Structural Engineering**, v. 115, n. 2, p. 433-444, 1989.

CALIL JÚNIOR, Carlito; BRITO, Leandro Dussarrat. **Manual de projeto e construção de estruturas com peças roliças de madeira de reflorestamento**. São Carlos: EESP/USP, 2010. 332p.

CALLISTER JUNIOR, William D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

CAN/CSA. Design and construction of building components with fibre-reinforced polymers. **S806-02**, Canadial Standards Association, 2002.

CAN/CSA. Design and construction of building components with fibre-reinforced polymers. **S806-96**, Canadial Standards Association, 1996.

CARVALHO, A. de. Madeiras portuguesas: estrutura anatômica, propriedades, utilizações. **Lisboa: Instituto Florestal**, v. 1, p. 340, 1996.

CARRASCO, E.V.M., OLIVEIRA, A.L.C., MANTILLA, J.N.R. **Influência da temperatura na resistência e no módulo de elasticidade em madeira de híbridos de eucalipto**. *Ciência Florestal*, v. 26, n. 2, pp. 389–400, 2016.

CASTRO, Cláudio de Moura. *A prática da pesquisa*. 2ª. Edição. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2006. 190p.

CORRADI, Marco. et al. In-plane shear reinforcement of wood beam floors with FRP. **Composites Part B: Engineering**, v. 37, n. 4-5, p. 310-319, june/july, 2006.

CORRADI, Marco; BORRI, Antonio. Fir and chestnut timber beams reinforced with GFRP pultruded elements. **Composites Part B: Engineering**, v. 38, n. 2, p. 172-181, 2007.

CORREIA, João R. et al. Mechanical behaviour of pultruded glass fibre reinforced polymer composites at elevated temperature: Experiments and model assessment **Composite Structures**, Volume 98, April 2013, Pages 303-313.

CORREIA, João R.; ALMEIDA, Nuno M.; FIGUEIRA, João R. Recycling of FRP composites: reusing fine GFRP waste in concrete mixtures. **Journal of Cleaner Production**, Volume 19, Issue 15, October 2011, Pages 1745-1753.

CORREIA, João R.; BAI, Yu; KELLER, Thomas. A review of the fire behaviour of pultruded GFRP structural profiles for civil engineering applications. *Composite Structures*, Volume 127, 1 September 2015, Pages 267-287.

COUTO, Iara Andrade. **Análise teórica e experimental do comportamento da aderência entre o concreto e barras de fibra de vidro impregnada por polímero**. 2007. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

DAGHER et al. Effect of FRP reinforcement on low-grade eastern hemlock glulams. In: **Proceedings of the national conference on wood transportation structures**, Madison, WI, 1996.

DAGHER, H. J.; LINDYBERG, R. FRP-wood hybrids for bridges: a comparison of E-glass and carbon reinforcements. In: **Advanced Technology in Structural Engineering**. 2000. p. 1-8.

DE LORENZIS, Laura; SCIALPI, Vincenza; LA TEGOLA, Antonio. Analytical and experimental study on bonded-in CFRP bars in glulam timber. **Composites Part B: Engineering**, v. 36, n. 4, p. 279-289, 2005.

DE LORENZIS, Laura; TENG, Jin-Guang. Near-surface mounted FRP reinforcement: An emerging technique for strengthening structures. **Composites Part B: Engineering**, v. 38, n. 2, p. 119-143, 2007.

DZIUBA, T. The ultimate strength of wooden beams with tension reinforcement. **Holzforschung und Holzverwertung**, v. 37, n. 6, p. 115-119, 1985.

EESCJR. **Blog Uso da madeira na construção civil no mundo e no Brasil**. 17 de maio de 2022. Disponível em: <https://eescjr.com.br/blog/o-uso-da-madeira-na-construcao-civil-tudo-o-que-voce-precisa-saber-sobre-o-tema/> . Acesso em 21 ago. 2023.

FARIA, J. AMORIM; NEGRÃO, João. Projeto de estruturas de madeira. **Publindústria Edições Técnicas**, 2009.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON, BULLETIN 14: Design and use of externally bonded fibre reinforced polymer reinforcement (FRP EBR) for reinforced concrete structures. 2001.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON, FIB 9.3 TG: FRP as reinforcement in concrete. **Proposta de norma**, Sheffield, Inglaterra, 2003.

FIORELLI, Juliano; DIAS, Antonio Alves. Analysis of the strength and stiffness of timber beams reinforced with carbon fiber and glass fiber. **Materials research**, v. 6, p. 193-202, 2003.

GARCIA, Pilar de la Rosa; ESCAMILLA, Alfonso Cobo; GARCÍA, M. Nieves González. Bending reinforcement of timber beams with composite carbon fiber and basalt fiber materials. **Composites Part B: Engineering**, v. 55, p. 528-536, 2013.

GARDNER, G. P., A Reinforced Glued Laminated Timber System, 2nd Pacific Timber Engineering Conference, Volume 2, 1989.

GENTILE, Chris; SVECOVA, Dagmar; RIZKALLA, Sami H. Timber beams strengthened with GFRP bars: development and applications. **Journal of Composites for Construction**, v. 6, n. 1, p. 11-20, 2002.

GIL, Antônio Carlos. Como elaborar projetos de pesquisa. 4ª. Edição. São Paulo: Atlas, 2002. 175p.

HERNANDEZ, Roland. **Strength and stiffness of reinforced yellow-poplar glued-laminated beams**. US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1997.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2018. 753p.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Fichas de características das madeiras brasileiras**, 2 ed., São Paulo, IPT, 1989.

JOHNS, Kenneth C.; LACROIX, Simon. Composite reinforcement of timber in bending. **Canadian journal of civil engineering**, v. 27, n. 5, p. 899-906, 2000.

JOHANSSON, Helena; BLANKSVÄRD, Thomas; CAROLIN, Anders. Glulam members strengthened by carbon fibre reinforcement. **Materials and Structures**, v. 40, n. 1, p. 47-56, 2007.

KHELIFA, M.; CELZARD, Alain. Numerical analysis of flexural strengthening of timber beams reinforced with CFRP strips. **Composite structures**, v. 111, p. 393-400, 2014.

KLIGER, Robert; JOHANSSON, M.; CROCETTI, R. Strengthening timber with CFRP or steel plates—short and long-term performance. In: **Proceedings of world conference on timber engineering, Miyazaki, Japan**. 2008.

KOCAOZ, Samaranayake; SAMARANAYAKE, V. A.; NANNI, A. Tensile characterization of glass FRP bars. **Composites Part B: Engineering**, v. 36, n. 2, p. 127-134, 2005.

LANTOS, G. et al. The flexural behavior of steel reinforced laminated timber beams. **Wood Science**, v. 2, n. 3, p. 136-43, 1970.

LI, Meng et al. Preparation and characterization of cellulose nanofibers from de-pectinated sugar beet pulp. **Carbohydrate Polymers**, v. 102, p. 136-143, 2014.

LI, Yeou-Fong; XIE, Yao-Ming; TSAI, Ming-Jer. Enhancement of the flexural performance of retrofitted wood beams using CFRP composite sheets. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 1, p. 411-422, 2009.

LU, Weidong et al. Study on flexural behaviour of glulam beams reinforced by Near Surface Mounted (NSM) CFRP laminates. **Construction and Building Materials**, 2015, 91, 23–31.

MACHADO, A. de P. Reforço de estruturas de concreto armado com fibras de carbono. **São Paulo: Pini**, 2002.

MARTINS, Sérgio Filipe Mendes Ferreira. **Estruturas de madeira—inspeção e diagnóstico: aplicação em caso de estudo**. 2009. Tese de Doutorado.

MICALI, Roberto Mauricio. **Análise teórica de vigas pré-moldadas de concreto com armadura de aço e de polímero reforçado com fibra de vidro em meio altamente agressivo**. 2010. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

MICELLI, Francesco; SCIALPI, Vincenza; LA TEGOLA, Antonio. Flexural reinforcement of glulam timber beams and joints with carbon fiber-reinforced polymer rods. **Journal of Composites for Construction**, v. 9, n. 4, p. 337-347, 2005.

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.

NADIR, Yashida et al. Flexural stiffness and strength enhancement of horizontally glued laminated wood beams with GFRP and CFRP composite sheets. **Construction and Building Materials**, v. 112, p. 547-555, 2016.

NAHUZ, Augusto Rabelo. **Catálogo de madeiras brasileiras para a construção civil** / [coordenação Augusto Rabelo Nahuz]. São Paulo: IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 2013.

NETO, Almir Barros da Silva Santos; LÜBECK, André; LIMA, Rogério Cattelan A. de; HOPPE, Luciana Fernandes. Análise Teórica de Vigas de Madeira Armadas com Vergalhões de Polímero Reforçado com Fibra (PRF): Theoretical Analysis of Timber Beams Reinforced With Polymers Fiber Reinforced (FRP) Bars. **MIX Sustentável**, v. 9, n. 4, p. 87-97, 2023.

NOWAK, Tomasz P.; JASIEŃKO, Jerzy; CZEPIŻAK, Dariusz. Experimental tests and numerical analysis of historic bent timber elements reinforced with CFRP strips. **Construction and Building Materials**, v. 40, p. 197-206, 2013.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michele. Estruturas de madeira. **Rio de Janeiro**, v. 6, 2003.

PIZZO, Benedetto; SMEDLEY, Dave. Adhesives for on-site bonding: Characteristics, testing and prospects. **Construction and Building Materials**, v. 97, p. 67-77, 2015.

PLEVRIS, Nikolaos; TRIANTAFILLOU, Thanasis C. FRP-reinforced wood as structural material. **Journal of materials in Civil Engineering**, v. 4, n. 3, p. 300-317, 1992.

RAFTERY, Gary M.; HARTE, Annette M. Low-grade glued laminated timber reinforced with FRP plate. **Composites Part B: Engineering**, v. 42, n. 4, p. 724-735, 2011.

RAFTERY, Gary M.; HARTE, Annette M. Nonlinear numerical modelling of FRP reinforced glued laminated timber. **Composites Part B: Engineering**, v. 52, p. 40-50, 2013.

RAFTERY, Gary M.; HARTE, Annette M.; RODD, Peter D. Bond quality at the FRP–wood interface using wood-laminating adhesives. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 29, n. 2, p. 101-110, 2009.

RAFTERY, Gary M.; HARTE, Annette M.; RODD, Peter D. Bond quality at the FRP–wood interface using wood-laminating adhesives. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 29, n. 2, p. 101-110, 2009.

RAFTERY, Gary M.; HARTE, Annette M.; RODD, Peter D. Bonding of FRP materials to wood using thin epoxy gluelines. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 29, n. 5, p. 580-588, 2009.

RAFTERY, Gary M.; WHELAN, Conor. 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.

RIBEIRO, Alfredo S. et al. Study of strengthening solutions for glued-laminated wood beams of maritime pine wood. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 8, p. 2738-2745, 2009.

RIBEIRO, Sidnea Eliane Campos. Análise da confiabilidade de vigas de concreto armado com plástico reforçado por fibras. 2009.

RICARDO, Octávio Gaspar S. **Teoria das estruturas**. São Paulo: McGraw Hill do Brasil, 1978. 670p.

SCHOBER, Kay-Uwe et al. FRP reinforcement of timber structures. **Construction and building materials**, v. 97, p. 106-118, 2015.

SCHOBER, Kay-Uwe; RAUTENSTRAUCH, K. Post-strengthening of timber structures with CFRP's. **Materials and Structures**, v. 40, n. 1, p. 27-35, 2007.

SMEDLEY, D.; CRUZ, H.; PAULA, R. Quality control on site. **Core Document of COST Action E34, Bonding of timber**, Vienna: University of Natural Resources and Applied Life Sciences, 2008.

SORIANO, Humberto Lima. **Análise de estruturas** - Formulação matricial e implementação computacional. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2005. 346p.

SVECOVA, D.; EDEN, R. J. Flexural and shear strengthening of timber beams using glass fibre reinforced polymer bars—an experimental investigation. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 31, n. 1, p. 45-55, 2004.

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

THELANDERSSON, Sven; LARSEN, Hans J. (Ed.). **Timber engineering**. John Wiley & Sons, 2003.

TIGHIOUART, B.; BENMOKRANE, B.; GRAO, D. Investigation of bond in concrete with fiber reinforced polymer (FRP) bar. **Construction Building and Materials**, v. 12, n. 8, p. 453-462, 1998.

UOMOTO, T. et al. **Use of Fiber Reinforced Polymer Composites as reinforcing Material for Concrete**. Journal of Materials in Civil Engineering, vol. 14, n. 3. Maio, junho 2002.

VIDE, Mariana Figueiredo Martins de Castro. Estado da arte em sistemas de reforço de estruturas de madeira baseados em aço ou de FRPs. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, 2016.

ZENID, J.G., **Madeira na construção civil**. Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo, 2011.

APÊNDICE A – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO PARALELA AS FIBRAS

A.1 AMOSTRA DE CEDRINHO

Tabela 26 – Carga de ruptura média da resistência a compressão do cedrinho

CORPO DE PROVA	CARGA DE RUPTURA (kN)
1	105,10
2	108,00
3	103,20
4	111,60
5	101,80
6	102,60
7	101,20
8	97,40
9	105,80
10	99,40
11	116,00
12	109,40

Tabela 27 – Resultados da resistência a compressão da amostra de cedrinho

CORPOS DE PROVA									
5		6		7		8		12	
Deslocamento mm	Carga kN	Deslocamento mm	Carga kN	Deslocamento mm	Carga kN	Deslocamento mm	Carga kN	Deslocamento mm	Carga kN
0,2	11	0,2	12	0,1	4	0,1	3	0,1	3
0,3	15	0,3	17	0,2	7,4	0,2	4,4	0,2	4
0,4	19,6	0,4	20,2	0,3	11,4	0,3	5,6	0,3	5
0,5	25	0,5	25	0,4	17,2	0,4	7	0,4	7
0,6	31,4	0,6	29,4	0,5	22	0,5	9,4	0,5	8
0,7	37			0,6	28,6	0,6	12,8	0,6	11
0,8	41,4			0,7	35	0,7	17	0,7	14
0,9	48			0,8	39	0,8	23,4	0,8	17
1	54			0,9	44	0,9	28	0,9	19
						1	36,8	1	21
						1,1	43	1,1	28
						1,2	51	1,2	32,6
						1,3	60	1,3	38

A.2 AMOSTRA DE PINUS

Tabela 28 – Carga de ruptura média da resistência a compressão do pinus

CORPO DE PROVA	CARGA DE RUPTURA (kN)
1	77,30
2	80,80
3	78,00
4	72,80
5	95,80
6	72,00
7	71,60
8	83,20
9	72,20
10	52,80
11	98,80
12	72,20

Tabela 29 – Resultados da resistência a compressão da amostra de pinus

(continua)

CORPOS DE PROVA									
4		6		8		9		11	
Deslocamento mm	Carga kN	Deslocamento mm	Carga kN	Deslocamento mm	Carga kN	Deslocamento mm	Carga kN	Deslocamento mm	Carga kN
0,20	8,00	0,10	1,20	0,10	1,80	0,10	9,20	0,20	5,60
0,30	9,00	0,20	2,20	0,20	2,60	0,20	13,60	0,30	7,80
0,40	12,00	0,30	4,40	0,30	3,60	0,30	18,00	0,40	9,40
0,50	14,00	0,40	7,80	0,40	4,00	0,40	22,00	0,50	11,80
0,60	16,00	0,50	11,40	0,50	4,20	0,50	25,00	0,60	13,80
0,70	18,40	0,60	14,80	0,60	5,00	0,60	27,80	0,70	15,80
0,80	20,00	0,70	18,60	0,70	6,60	0,70	31,00	0,80	18,80
0,90	22,80	0,80	22,20	0,80	8,40	0,80	34,60	0,90	22,00
1,00	25,60	0,90	25,20	0,90	11,40	0,90	36,00	1,00	25,00
1,10	28,40	1,00	29,20	1,00	14,80	1,00	37,60	1,10	28,40
1,20	30,40	1,10	32,20	1,10	19,20	1,10	38,60	1,20	31,40
1,30	32,80	1,20	35,30	1,20	24,20	1,20	40,60	1,30	34,60
1,40	35,40			1,30	29,00	1,30	43,40	1,40	38,40
1,50	38,20			1,40	34,80	1,40	45,00	1,50	41,00
1,60	40,80			1,50	39,20	1,50	47,00	1,60	44,80
1,70	43,00			1,60	44,00	1,60	49,00	1,70	48,60
1,80	45,60			1,70	51,00	1,70	50,60	1,80	51,60

(conclusão)

CORPOS DE PROVA									
4		6		8		9		11	
Deslocamento mm	Carga kN	Deslocamento mm	Carga kN	Deslocamento mm	Carga kN	Deslocamento mm	Carga kN	Deslocamento mm	Carga kN
1,90	47,00			1,80	52,80	1,80	52,40	1,90	47,00
2,00	49,60			1,90	55,60	1,90	54,00	2,00	49,60
2,10	52,00			2,00	61,60	2,00	57,20	2,10	52,00
2,20	55,40			2,10	63,00	2,10	58,40	2,20	55,40
				2,20	64,00	2,20	59,00		
				2,30	67,00	2,30	60,00		
				2,40	70,80	2,40	61,40		
				2,50	72,00	2,50	63,20		
				2,60	72,80	2,60	65,00		
						2,70	70,00		

APÊNDICE B – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA A FLEXÃO

B.1 VIGA REFERÊNCIA DE CEDRINHO

Tabela 30 – Carga de ruptura média de resistência a flexão do cedrinho

CORPO DE PROVA	CARGA DE RUPTURA (kN)
VPc1	18,0
VPc2	14,6
VPc3	20,3
VPc4	14,9
VPc5	19,8

Tabela 31 – Resultados da resistência a flexão da amostra de cedrinho

(continua)

CORPOS DE PROVA									
VRefc1		VRefc2		VRefc3		VRefc4		VRefc5	
Deslocamento mm	Carga kN	Deslocamento mm	Carga kN	Deslocamento mm	Carga kN	Deslocamento mm	Carga kN	Deslocamento mm	Carga kN
0,5	0,5	0,8	0,7	0,4	0,4	0,2	0,3	1	1
0,6	0,6	0,9	0,8	0,5	0,5	0,3	0,4	1,1	1,1
0,7	0,7	1	0,9	0,6	0,55	0,4	0,5	1,2	1,2
0,8	0,8	1,1	1	0,7	0,6	0,5	0,55	1,3	1,3
0,9	0,7	1,2	1,15	0,8	0,7	0,6	0,65	1,4	1,4
1	0,8	1,3	1,25	0,9	0,8	0,7	0,7	1,5	1,5
1,1	0,9	1,4	1,35	1	0,9	0,8	0,8	1,6	1,6
1,2	0,95	1,5	1,4	1,1	1,1	0,9	0,9	1,7	1,7
1,3	1,05	1,6	1,5	1,2	1,3	1	1	1,8	1,8
1,4	1,2	1,7	1,6	1,3	1,4	1,1	1,05	1,9	1,9
1,5	1,3	1,8	1,7	1,4	1,45	1,2	1,15	2	2
1,6	1,35	1,9	1,8	1,5	1,5	1,3	1,25	2,1	2,1
1,7	1,45	2	1,9	1,6	1,6	1,4	1,3	2,2	2,2
1,8	1,5	2,1	2	1,7	1,75	1,5	1,4	2,3	2,3
1,9	1,6	2,2	2,1	1,8	1,9	1,6	1,5	2,4	2,45
2	1,65	2,3	2,2	1,9	2	1,7	1,6	2,5	2,55
2,1	1,75	2,4	2,35	2	2,1	1,8	1,7	2,6	2,65
2,2	1,8	2,5	2,4	2,1	2,3	1,9	1,8	2,7	2,75
2,4	2	2,7	2,6	2,3	2,5	2,1	1,95	2,9	2,95
2,5	2,1	2,8	2,7	2,4	2,6	2,2	2,1	3	3,05
2,6	2,2	2,9	2,85	2,5	2,7	2,3	2,2	3,1	3,15

(continua)

CORPOS DE PROVA									
VRefc1		VRefc2		VRefc3		VRefc4		VRefc5	
Deslocamento mm	Carga kN	Deslocamento mm	Carga kN	Deslocamento mm	Carga kN	Deslocamento mm	Carga kN	Deslocamento mm	Carga kN
2,7	2,25	3	2,9	2,6	2,8	2,4	2,3	3,2	3,25
2,8	2,35	3,1	3	2,7	2,9	2,5	2,4	3,3	3,35
2,9	2,4	3,2	3,1	2,8	3	2,6	2,5	3,4	3,4
3	2,5	3,3	3,25	2,9	3,15	2,7	2,6	3,5	3,5
3,1	2,6	3,4	3,3	3	3,3	2,8	2,65	3,6	3,6
3,2	2,65	3,5	3,4	3,1	3,4	2,9	2,75	3,7	3,7
3,3	2,75	3,6	3,5	3,2	3,5	3	2,85	3,8	3,8
3,4	2,85	3,7	3,6	3,3	3,6	3,1	2,95	3,9	3,9
3,5	2,95	3,8	3,65	3,4	3,7	3,2	3,05	4	4
3,6	3	3,9	3,75	3,5	3,8	3,3	3,2	4,1	4,1
3,7	3,1	4	3,85	3,6	3,9	3,4	3,25	4,2	4,2
3,8	3,2	4,1	3,95	3,7	4	3,5	3,4	4,3	4,3
3,9	3,25	4,2	4,05	3,8	4,1	3,6	3,5	4,4	4,4
4	3,4	4,3	4,15	3,9	4,15	3,7	3,55	4,5	4,5
4,1	3,45	4,4	4,25	4	4,3	3,8	3,65	4,6	4,6
4,2	3,5	4,5	4,35	4,1	4,4	3,9	3,75	4,7	4,7
4,3	3,6	4,6	4,4	4,2	4,5	4	3,85	4,8	4,8
4,4	3,7	4,7	4,5	4,3	4,6	4,1	3,95	4,9	4,9
4,5	3,8	4,8	4,6	4,4	4,65	4,2	4,05	5	5
4,6	3,85	4,9	4,65	4,5	4,7	4,3	4,15	5,1	5,1
4,7	4	5	4,75	4,6	4,8	4,4	4,25	5,2	5,2
4,8	4,05	5,1	4,85	4,7	5	4,5	4,35	5,3	5,3
4,9	4,1	5,2	4,95	4,8	5,15	4,6	4,4	5,4	5,4
5	4,2	5,3	5	4,9	5,25	4,7	4,5	5,5	5,5
5,1	4,3	5,4	5,1	5	5,3	4,8	4,6	5,6	5,6
5,2	4,35	5,5	5,2	5,1	5,5	4,9	4,7	5,7	5,7
5,3	4,4	5,6	5,3	5,2	5,65	5	4,75	5,8	5,8
5,4	4,55	5,7	5,35	5,3	5,7	5,1	4,8	5,9	5,9
5,5	4,6	5,8	5,45	5,4	5,8	5,2	4,9	6	6
5,6	4,7	5,9	5,55	5,5	5,9	5,3	5	6,1	6,1
5,7	4,85	6	5,65	5,6	6	5,4	5,1	6,2	6,2
5,8	4,85	6,1	5,7	5,7	6,1	5,5	5,2		
5,9	4,95	6,2	5,8	5,8	6,15	5,6	5,3		
6	5,05	6,3	5,9	5,9	6,2	5,7	5,45		
6,1	5,1	6,4	6	6	6,3	5,8	5,55		
6,2	5,2	6,5	6,05	6,1	6,4	5,9	5,6		

(conclusão)

CORPOS DE PROVA									
VRefc1		VRefc2		VRefc3		VRefc4		VRefc5	
Deslocamento mm	Carga kN	Deslocamento mm	Carga kN	Deslocamento mm	Carga kN	Deslocamento mm	Carga kN	Deslocamento mm	Carga kN
6,3	5,25	6,6	6,15	6,2	6,5	6	5,75		
6,4	5,35	6,7	6,25	6,3	6,55	6,1	5,85		
6,5	5,4	6,8	6,35	6,4	6,65	6,2	5,95		
6,6	5,5	6,9	6,4	6,5	6,75	6,3	6		
6,7	5,6	7	6,5	6,6	6,8	6,4	6,1		
		7,1	6,6	6,7	6,9	6,5	6,2		

B.2 VIGA DE CEDRINHO COM REFORÇO

Tabela 32 – Carga de ruptura média da resistência a flexão do cedrinho com reforço

CORPO DE PROVA	CARGA DE RUPTURA (kN)
VPc1	18,0
VPc2	14,6
VPc3	20,3
VPc4	14,9
VPc5	19,8

Tabela 33 – Resultados da resistência a flexão da amostra de cedrinho com reforço

(continua)

CORPO DE PROVA									
VPc1		VPc2		VPc3		VPc4		VPc5	
Deslocamento mm	Carga kN	Deslocamento mm	Carga kN	Deslocamento mm	Carga kN	Deslocamento mm	Carga kN	Deslocamento mm	Carga kN
0,3	0,3	0,5	0,5	0,8	1	0,4	0,5	0,3	0,5
0,4	0,4	0,6	0,6	0,9	1,15	0,5	0,6	0,4	0,6
0,5	0,45	0,7	0,7	1	1,25	0,6	0,7	0,5	0,65
0,6	0,55	0,8	0,8	1,1	1,35	0,7	0,8	0,6	0,7
0,7	0,65	0,9	1	1,2	1,4	0,8	0,9	0,7	0,8
0,8	0,75	1	1	1,3	1,5	0,9	1	0,8	0,9
0,9	0,9	1,1	1,2	1,4	1,6	1	1,1	0,9	1
1	1	1,2	1,2	1,5	1,7	1,1	1,2	1	1,05
1,1	1,1	1,3	1,3	1,6	1,8	1,2	1,3	1,1	1,1
1,2	1,2	1,4	1,4	1,7	1,9	1,3	1,4	1,2	1,2
1,3	1,3	1,5	1,5	1,8	2	1,4	1,5	1,3	1,35
1,4	1,4	1,6	1,6	1,9	2,1	1,5	1,6	1,4	1,45
1,5	1,5	1,7	1,7	2	2,2	1,6	1,7	1,5	1,5

(conclusão)

CORPO DE PROVA									
VPc1		VPc2		VPc3		VPc4		VPc5	
Deslocamento mm	Carga kN	Deslocamento mm	Carga kN	Deslocamento mm	Carga kN	Deslocamento mm	Carga kN	Deslocamento mm	Carga kN
1,6	1,6	1,8	1,8	2,1	2,3	1,7	1,8	1,6	1,65
1,7	1,7	1,9	1,9	2,2	2,4	1,8	1,9	1,7	1,7
1,8	1,8	2	2	2,3	2,5	1,9	2	1,8	1,75
1,9	1,9	2,1	2,1	2,4	2,6	2	2,1	1,9	1,8
2	2	2,2	2,2	2,5	2,7	2,1	2,2	2	1,95
		2,3	2,35	2,6	2,8	2,2	2,3	2,1	2,05
		2,4	2,4	2,7	2,9	2,3	2,4	2,2	2,15
		2,5	2,5	2,8	3	2,4	2,5	2,3	2,25
		2,6	2,7	2,9	3,1	2,5	2,6	2,4	2,35
		2,7	2,8	3	3,2	2,6	2,7	2,5	2,45
		2,8	2,9	3,1	3,3	2,7	2,8	2,6	2,55
		2,9	3	3,2	3,4	2,8	2,9	2,7	2,65
		3	3,1	3,3	3,5	2,9	3	2,8	2,75
		3,1	3,3	3,4	3,6	3	3,1	2,9	2,8
		3,2	3,4	3,5	3,7	3,1	3,2	3	2,9
		3,3	3,5	3,6	3,8	3,2	3,3	3,1	3
		3,4	3,7	3,7	3,9	3,3	3,4	3,2	3,15
		3,5	3,8	3,8	4	3,4	3,5	3,3	3,2
		3,6	3,9			3,5	3,6	3,4	3,3
		3,7	4			3,6	3,7	3,5	3,4
		3,8	4,1			3,7	3,8	3,6	3,5
		3,9	4,4						
		4	4,5						
		4,1	4,6						
		4,2	4,7						
		4,3	4,8						
		4,4	4,9						
		4,5	5						

B.3 VIGA REFERÊNCIA DE PINUS

Tabela 34 – Carga de ruptura média da resistência a flexão do pinus

CORPOS DE PROVA	CARGA DE RUPTURA (KN)
VRefp1	15,7
VRefp2	15
VRefp3	17
VRefp4	13,5
VRefp5	14,5

Tabela 35 – Resultados da resistência a flexão da amostra de pinus

(continua)

CORPOS DE PROVA									
VRefp1		VRefp2		VRefp3		VRefp4		VRefp5	
Deslocamento	Carga	Deslocamento	Carga	Deslocamento	Carga	Deslocamento	Carga	Deslocamento	Carga
mm	KN	mm	KN	mm	KN	mm	KN	mm	KN
2	1,7	1	0,95	0,5	0,6	0,5	0,4	0,3	0,4
2,1	1,8	1,1	1	0,6	0,7	0,6	0,55	0,4	0,45
2,2	1,9	1,2	1,1	0,7	0,8	0,7	0,6	0,5	0,6
2,3	2	1,3	1,2	0,8	0,9	0,8	0,7	0,6	0,7
2,4	2,1	1,4	1,3	0,9	1,05	0,9	0,75	0,7	0,8
2,5	2,2	1,5	1,4	1	1,2	1	0,8	0,8	0,9
2,6	2,2	1,6	1,45	1,1	1,3	1,1	0,9	0,9	1,1
2,7	2,3	1,7	1,5	1,2	1,4	1,2	1	1	1,3
2,8	2,4	1,8	1,6	1,3	1,5	1,3	1,1	1,1	1,4
2,9	2,45	1,9	1,7	1,4	1,65	1,4	1,2	1,2	1,5
3	2,55	2	1,8	1,5	1,7	1,5	1,3	1,3	1,65
3,1	2,7	2,1	1,85	1,6	1,9	1,6	1,4	1,4	1,8
3,2	2,75	2,2	1,9	1,7	1,95	1,7	1,5	1,5	1,9
3,3	2,8	2,3	2	1,8	2,1	1,8	1,6	1,6	2,1
3,4	2,9	2,4	2,1	1,9	2,2	1,9	1,7	1,7	2,2
3,5	3	2,5	2,2	2	2,35	2	1,8	1,8	2,3
		2,6	2,3	2,1	2,45	2,1	1,9	1,9	2,45
		2,7	2,4	2,2	2,6	2,2	2	2	2,55
		2,8	2,45	2,3	2,7	2,3	2,1	2,1	2,7
		2,9	2,5	2,4	2,85	2,4	2,2	2,2	2,8
		3	2,6	2,5	3	2,5	2,25	2,3	2,9
		3,1	2,7	2,6	3,1	2,6	2,3	2,4	3,1
		3,2	2,8	2,7	3,2	2,7	2,4	2,5	3,2

(conclusão)

CORPOS DE PROVA									
VRefp1		VRefp2		VRefp3		VRefp4		VRefp5	
Deslocamento mm	Carga KN	Deslocamento mm	Carga KN	Deslocamento mm	Carga KN	Deslocamento mm	Carga KN	Deslocamento mm	Carga KN
		3,3	2,9	2,8	3,4	2,8	2,45	2,6	3,3
		3,4	3	2,9	3,5	2,9	2,6	2,7	3,5
		3,5	3,1	3	3,6	3	2,7		
		3,6	3,2	3,1	3,7	3,1	2,75		
		3,7	3,3	3,2	3,85	3,2	2,8		
		3,8	3,4			3,3	2,9		
		3,9	3,5			3,4	3		
		4	3,55			3,5	3,1		
						3,6	3,2		
						3,7	3,25		
						3,8	3,35		

B.4 VIGA DE PINUS COM REFORÇO

Tabela 36 – Carga de ruptura média da resistência a flexão do pinus com reforço

CORPO DE PROVA	CARGA DE RUPTURA (kN)
VPp1	21,30
VPp2	24,00
VPp3	16,00
VPp4	21,90
VPp5	23,30

Tabela 37 – Resultados da resistência a flexão da amostra de pinus com reforço

(continua)

CORPOS DE PROVA									
VPp1		VPp2		VPp3		VPp4		VPp5	
Deslocamento mm	Carga kN	Deslocamento mm	Carga kN	Deslocamento mm	Carga kN	Deslocamento mm	Carga kN	Deslocamento mm	Carga kN
0,5	0,4	0,1	0,1	0,3	0,15	0,1	0	0,1	0,15
0,6	0,6	0,2	0,2	0,4	0,2	0,2	0,1	0,2	0,25
0,7	0,65	0,3	0,3	0,5	0,35	0,3	0,2	0,3	0,4
0,8	0,8	0,4	0,45	0,6	0,45	0,4	0,25	0,4	0,55
0,9	0,85	0,5	0,5	0,7	0,55	0,5	0,3	0,5	0,75
1	1	0,6	0,6	0,8	0,65	0,6	0,45	0,6	0,8
1,1	1,1	0,7	0,7	0,9	0,75	0,7	0,55	0,7	0,95

(continua)

CORPOS DE PROVA									
VPp1		VPp2		VPp3		VPp4		VPp5	
Deslocamento mm	Carga kN	Deslocamento mm	Carga kN	Deslocamento mm	Carga kN	Deslocamento mm	Carga kN	Deslocamento mm	Carga kN
1,2	1,2	0,8	0,8	1	0,85	0,8	0,65	0,8	1,05
1,3	1,3	0,9	0,9	1,1	1	0,9	0,8	0,9	1,2
1,4	1,45	1	1	1,2	1,05	1	0,9	1	1,3
1,5	1,5	1,1	1,15	1,3	1,15	1,1	1	1,1	1,4
1,6	1,6	1,2	1,35	1,4	1,3	1,2	1,2	1,2	1,5
1,7	1,75	1,3	1,4	1,5	1,35	1,3	1,35	1,3	1,65
1,8	1,8	1,4	1,5	1,6	1,45	1,4	1,5	1,4	1,8
1,9	1,95	1,5	1,55	1,7	1,5	1,5	1,6	1,5	1,9
2	2	1,6	1,65	1,8	1,65	1,6	1,7	1,6	2
2,1	2,1	1,7	1,75	1,9	1,7	1,7	1,85	1,7	2,15
2,2	2,2	1,8	1,85	2	1,8	1,8	2	1,8	2,3
2,3	2,3	1,9	2	2,1	1,95	1,9	2,1	1,9	2,4
2,4	2,4	2	2,1	2,2	2	2	2,25	2	2,5
2,5	2,5	2,1	2,2	2,3	2,1	2,1	2,35	2,1	2,65
2,6	2,6	2,2	2,3	2,4	2,25	2,2	2,5	2,2	2,8
2,7	2,7	2,3	2,4	2,5	2,35	2,3	2,6	2,3	2,9
2,8	2,8	2,4	2,5	2,6	2,5	2,4	2,7	2,4	3
2,9	2,85	2,5	2,6	2,7	2,55	2,5	2,85	2,5	3,15
3	3	2,6	2,7	2,8	2,7	2,6	3	2,6	3,3
3,1	3,1	2,7	2,85	2,9	2,8	2,7	3,1	2,7	3,45
3,2	3,2	2,8	2,95	3	2,9	2,8	3,2	2,8	3,6
3,3	3,25	2,9	3	3,1	3	2,9	3,3	2,9	3,7
3,4	3,4	3	3,15	3,2	3,15	3	3,45	3	3,8
3,5	3,5	3,1	3,25	3,3	3,3	3,1	3,6	3,1	3,95
3,6	3,55	3,2	3,35	3,4	3,35	3,2	3,7	3,2	4,05
3,7	3,65	3,3	3,5	3,5	3,4	3,3	3,8	3,3	4,2
3,8	3,7	3,4	3,55	3,6	3,5	3,4	3,9	3,4	4,3
		3,5	3,65	3,7	3,6	3,5	4	3,5	4,45
		3,6	3,75	3,8	3,75	3,6	4,1	3,6	4,6
		3,7	3,9	3,9	3,8	3,7	4,2	3,7	4,7
		3,8	4	4	3,9	3,8	4,3	3,8	4,85
		3,9	4,1	4,1	4	3,9	4,4	3,9	4,95
		4	4,2	4,2	4,1	4	4,5	4	5,1
		4,1	4,35	4,3	4,2	4,1	4,65	4,1	5,2
		4,2	4,4	4,4	4,3	4,2	4,8	4,2	5,35
		4,3	4,5	4,5	4,4	4,3	4,9	4,3	5,45

(continua)

CORPOS DE PROVA									
VPp1		VPp2		VPp3		VPp4		VPp5	
Deslocamento mm	Carga kN	Deslocamento mm	Carga kN	Deslocamento mm	Carga kN	Deslocamento mm	Carga kN	Deslocamento mm	Carga kN
		4,4	4,6	4,6	4,5	4,4	5	4,4	5,5
		4,5	4,7	4,7	4,55	4,5	5,1	4,5	5,7
		4,6	4,85	4,8	4,65	4,6	5,2	4,6	5,8
		4,7	4,9	4,9	4,75	4,7	5,3	4,7	5,9
		4,8	5	5	4,85	4,8	5,3	4,8	6
		4,9	5,1	5,1	4,9	4,9	5,5	4,9	6,15
				5,2	5	5	5,6	5	6,3
				5,3	5,1	5,1	5,7	5,1	6,4
				5,4	5,2	5,2	5,85	5,2	6,5
				5,5	5,25	5,3	5,95	5,3	6,6
				5,6	5,3	5,4	6,05	5,4	6,75
				5,7	5,45	5,5	6,15	5,5	6,9
				5,8	5,5	5,6	6,25	5,6	7
				5,9	5,6	5,7	6,4	5,7	7,15
				6	5,7	5,8	6,5	5,8	7,25
				6,1	5,8	5,9	6,6	5,9	7,4
				6,2	5,9	6	6,7	6	7,5
				6,3	5,95	6,1	6,8	6,1	7,6
				6,4	6,1	6,2	6,9	6,2	7,7
				6,5	6,15	6,3	7	6,3	7,8
				6,6	6,2	6,4	7,1	6,4	7,9
				6,7	6,25	6,5	7,2	6,5	8
				6,8	6,4	6,6	7,3	6,6	8,1
				6,9	6,5	6,7	7,4	6,7	8,2
				7	6,55	6,8	7,5	6,8	8,3
				7,1	6,65	6,9	7,6	6,9	8,4
				7,2	6,7	7	7,7	7	8,5
				7,3	6,75	7,1	7,8	7,1	8,6
				7,4	6,9	7,2	7,9	7,2	8,75
				7,5	7	7,3	8	7,3	8,8
				7,6	7,1	7,4	8,1	7,4	9
				7,7	7,2	7,5	8,2	7,5	9,1
						7,6	8,3	7,6	9,2
						7,7	8,4	7,7	9,3
						7,8	8,5		
						7,9	8,55		

(conclusão)

CORPOS DE PROVA									
VPp1		VPp2		VPp3		VPp4		VPp5	
Deslocamento mm	Carga kN	Deslocamento mm	Carga kN	Deslocamento mm	Carga kN	Deslocamento mm	Carga kN	Deslocamento mm	Carga kN
						8	8,6		
						8,1	8,7		

**APÊNDICE C – TRATAMENTO DE RESULTADOS DOS ENSAIOS DE
RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO PARALELA AS FIBRAS**

C.1 AMOSTRA DE CEDRINHO

Tabela 38 – Resultado do tratamento de dados dos ensaios de resistência a compressão do cedrinho

RESULTADOS CARGA MÉDIA DE RUPTURA (kN)		
CORPO DE PROVA	VALORES COLETADOS	VALOR ANALISADO
5	101,8	101,8
6	102,6	102,6
7	101,2	101,2
8	97,4	Espúrio
12	109,4	Espúrio

C.2 AMOSTRA DE PINUS

Tabela 39 – Resultado do tratamento de dados dos ensaios de resistência a compressão do pinus

RESULTADOS CARGA MÉDIA DE RUPTURA (kN)		
CORPO DE PROVA	VALORES COLETADOS	VALOR ANALISADO
4	72,8	72,8
6	72	72
8	83,2	83,2
9	72,2	72,2
11	98,8	Espúrio

APÊNDICE D – TRATAMENTO DE RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO DE QUATRO PONTOS

D.1 AMOSTRA DE CEDRINHO

Tabela 40 – Resultado do tratamento de dados dos ensaios de resistência a flexão do cedrinho

RESULTADOS CARGA MÉDIA DE RUPTURA (kN)		
CORPO DE PROVA	VALORES COLETADOS	VALOR ANALISADO
VRefc1	13,9	Espúrio
VRefc2	17,1	17,1
VRefc3	17,7	17,7
VRefc4	14,4	14,4
VRefc5	17,9	17,9

D.2 AMOSTRA DE CEDRINHO COM REFORÇO

Tabela 41 – Resultado do tratamento de dados dos ensaios de resistência a flexão do cedrinho com reforço

RESULTADOS CARGA MÉDIA DE RUPTURA (kN)		
CORPO DE PROVA	VALORES COLETADOS	VALOR ANALISADO
VPc1	18	18
VPc2	14,6	Espúrio
VPc3	20,3	Espúrio
VPc4	14,9	14,9
VPc5	19,8	19,8

D.3 AMOSTRA DE PINUS

Tabela 42 – Resultado do tratamento de dados dos ensaios de resistência a flexão do pinus

RESULTADOS CARGA MÉDIA DE RUPTURA (kN)		
CORPO DE PROVA	VALORES COLETADOS	VALOR ANALISADO
VRefp1	15,7	15,7
VRefp2	15	15
VRefp3	17	17
VRefp4	13,5	Espúrio
VRefp5	14,5	Espúrio

D.4 AMOSTRA DE PINUS COM REFORÇO

Tabela 43 – Resultado do tratamento de dados dos ensaios de resistência a flexão do pinus com reforço

RESULTADOS CARGA MÉDIA DE RUPTURA (kN)		
CORPO DE PROVA	VALORES COLETADOS	VALOR ANALISADO
VPp1	21,3	21,3
VPp2	24	24
VPp3	16	Espúrio
VPp4	21,9	21,9
VPp5	23,3	23,3