



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

CIBELE MOTA MENEZES

**ESTUDO DA LIGAÇÃO DE NÓS DE TRELIÇA DE MADEIRA
COM FIBRA DE CARBONO**

Salvador
2024

CIBELE MOTA MENEZES

**ESTUDO DA LIGAÇÃO DE NÓS DE TRELIÇA DE MADEIRA
COM FIBRA DE CARBONO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre de M. Wahrhaftig
Coorientador: Prof. Dr. Ricardo Fernandes Carvalho
Agência Financiadora: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Salvador
2024

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Bernadete
Sinay Neves, Escola Politécnica - UFBA.

M543 Menezes, Cibele Mota.

Estudo da ligação de nós de treliça de madeira com fibra de carbono / Cibele Mota Menezes. – Salvador, 2024.

87f.: il. color.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre de M. Wahrhaftig.

Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, 2024.

1. Fibra de carbono. 2. Madeira. 3. Treliça – construção civil. 4. Resina epóxi. I. Wahrhaftig, Alexandre de M. II. Universidade Federal da Bahia. III. Título.

CDD: 624.184

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

CIBELE MOTA MENEZES

APRESENTADA AO PROGRAMA EM ENGENHARIA CIVIL, DA UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA, EM 19 DE FEVEREIRO DE 2024.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente



ALEXANDRE DE MACEDO WAHRHAFTIG
Data: 22/04/2024 08:43:51-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.(a) Dr.(a) **Alexandre de Macêdo Wahrhaftig**
Orientador - PPEC – UFBA

Documento assinado digitalmente



RICARDO FERNANDES CARVALHO
Data: 19/04/2024 17:17:11-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.(a) Dr.(a) **Ricardo Fernandes Carvalho**
Coorientador - DCE – UFBA

Documento assinado digitalmente



ADRIANO SILVA FORTES
Data: 22/04/2024 08:14:04-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.(a) Dr.(a) **Adriano Silva Fortes - DCA – UFBA**

Documento assinado digitalmente



JULIANO FIORELLI
Data: 15/04/2024 09:12:44-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.(a) Dr.(a) **Juliano Fiorelli - PGrCEM – USP**

*Dedico este trabalho ao meu amado pai
José Carlos de Campos Menezes e à minha
amada mãe Edina Mota Menezes (ambos
In Memoriam).*

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, à Deus, por ter me permitido vivenciar o Mestrado, e desde o início nunca ter me desamparado. Por toda força que me manteve de pé, mesmo com as dificuldades, me dando sempre a certeza de que não importa a situação, estará sempre ao meu lado, segurando a minha mão.

À Nossa Senhora, Maria, minha Mãezinha, que sempre está comigo na minha vida, na minha caminhada, intercedendo por mim e me dando direcionamento, passando na frente de todos os obstáculos e me carregando no colo.

Aos meus pais, Edina Mota Menezes e José Carlos de Campos Menezes (In memoriam), que sempre me deram muita força na minha vida pessoal e trajetória profissional, por todo amor, compreensão, segurança, apoio e abrigo, que sempre tive e até hoje tenho, pois não importa onde estejam, sei que estão cuidando de mim, torcendo por mim e me amando a todo instante. Vocês sempre foram e serão a razão de tudo. Palavras não cabem aqui para falar sobre o amor e a gratidão que eu sinto por vocês.

Ao meu esposo, Ravid Nascimento Santos de Almeida, por todo amor, atenção, cuidado e apoio durante todo esse processo. Sua presença e companhia torna a caminhada mais leve, os meus dias mais felizes. Você sempre me dá a certeza de que não estou sozinha. Eu te amo do tamanho do Universo!

Ao Professor Dr. Alexandre de Macêdo Wahrhaftig, por toda orientação, atenção, motivação desde o início, e pela amizade construída ao longo de todos esses anos trabalhando juntos. Sou grata por todo apoio e parceria nessa caminhada, pois reconheço o quanto foi e é importante na minha formação. Obrigada pela paciência e compreensão em todas as etapas.

Ao Professor Dr. Adriano Silva Fortes, que sugeriu um tema tão interessante para trabalhar, e nos momentos em que precisei conversar e falar, me escutou. Suas palavras de conforto estão até hoje no meu coração. Obrigada pela atenção e disponibilidade sempre.

Ao Professor Dr. Sandro Fábio César que pude conhecer mais de perto nessa caminhada, cada aula e palavra me ajudaram a sobreviver em um dos períodos mais difíceis do curso. Tudo que aprendi fez com que eu vivesse e concluísse esse Mestrado de uma forma saudável e equilibrada. Pelo apoio no meu Mestrado também.

Ao Laboratório de Madeiras (LABMAD) da Escola Politécnica da UFBA, ao funcionário Deni da carpintaria, e à Filipe Luigi e Lucas Costa, que foram muito importantes no apoio e na orientação com a realização de ensaios.

Às Professoras Doutoras Dayana Bastos Costa e Rita Dione Araújo Cunha, por todo ensinamento, atenção e palavras de apoio nos momentos difíceis, cada uma com seu jeito inspirador me motiva sempre no lado pessoal e profissional.

Aos Professores Dr. Ricardo Fernandes Carvalho, pela atenção e apoio, e Dr. Juliano Fiorelli, que se mostrou muito gentil na banca, contribuindo com o trabalho, e me motivando.

À meu amigo Abraham Omoro, por sempre ter me escutado nos momentos de aflição, pelas risadas compartilhadas, por deixar a trajetória muito mais interessante com a nossa amizade, por sempre estar comigo. Obrigada por tudo que representa pra mim, uma inspiração de ser humano, amigo pra toda hora, profissional dedicado e sempre disposto a fazer o bem.

À minha amiga Graciele Gonçalves, sempre atenciosa, parceira, e responsável por muita alegria nessa caminhada. Amiga de muitos anos e para a vida toda. Deus continue te abençoando sempre mais e mais.

Ao meu amigo Rodrigo Oliveira da Silva Conceição, que se fez tão presente nas inúmeras vezes em que precisei, me auxiliando na confecção dos protótipos e nos ensaios experimentais, mas principalmente pela amizade sincera e verdadeira construída ao longo desse tempo. Sou grata por todas as palavras de fé, atenção e por toda companhia com muita risada.

Às minhas irmãs, Claudia Mota Menezes e Cleide Mota Menezes, que sempre me apoiaram na minha vida pessoal e trajetória profissional. Sou grata por toda ajuda nos momentos em que eu precisei durante esta fase, com materiais, cedendo a casa para a montagem dos protótipos, com as orações e palavras positivas. Eu amo muito vocês!

Ao meu cunhado Vagno Brandão, que me forneceu material para execução do ensaio, e me ajudou quando precisei. Muito obrigada, que Deus o abençoe!

Agradeço à minha amiga Vanessa Pacheco, que me deu e me dá muito apoio, principalmente quando conviveu comigo durante todo o primeiro semestre do Mestrado, o que me ajudou a encarar a saudade do meu pai. Obrigada pelo incentivo diário e por se mostrar sempre disponível nos momentos que precisei.

Agradeço aos amigos que fiz, com palavras positivas, se fizeram muito importantes em muitos momentos. Amei entrar no mestrado com uma turma especial.

À todos que, de alguma forma, me transmitiram palavras positivas, se fizeram presente nessa etapa e me ajudaram com orações, torcida e afeto.

Ao Programa de pós-graduação em engenharia civil (PPEC) da Escola Politécnica da UFBA por fomentar a pesquisa.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de mestrado.

*“Quando penso que cheguei ao meu limite,
descubro que tenho forças para ir além”.*
Ayrton Senna

MENEZES, Cibele Mota. **Estudo da ligação de nós de treliça de madeira com fibra de carbono**. Orientador: Alexandre de M. Wahrhaftig. 2024. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2024.

RESUMO

A construção civil é uma área da Engenharia que está em constante evolução para auxiliar na resolução de problemas, sendo um desses a corrosão das estruturas metálicas em locais com alta salinidade, o que demandou o desenvolvimento de novos materiais e métodos de construção. Nesse sentido, este estudo surgiu da necessidade de encontrar uma técnica alternativa para realizar a ligação entre os elementos de treliça de madeira quando expostos a ambientes marítimos e zonas industriais, uma vez que os tradicionais conectores metálicos estão suscetíveis a corrosão nesses meios, o que levaria a uma redução da confiabilidade da estrutura. Assim, esse trabalho foi desenvolvido com o objetivo de analisar — com base na revisão da literatura, na realização de ensaios experimentais e por meio de simulação computacional — a viabilidade da utilização de tecido de fibra de carbono e resina epóxi para ligação dos nós de treliça de madeira, em substituição a conectores metálicos. Para tanto, foram executados ensaios com protótipos triangulares de madeira da espécie *Eucalyptus cloeziana* com as extremidades dos elementos colados com fibra de carbono e resina epóxi. Os corpos de prova foram submetidos a esforços axiais de uma prensa hidráulica com capacidade de 15 toneladas, em que os valores de deslocamento do nó superior da estrutura triangular foram registrados em cada etapa dos testes. A partir disso, foi possível calcular o parâmetro de rigidez rotacional ($K\theta$), que foi utilizado na análise computacional através do Método dos Elementos Finitos (MEF). Na simulação computacional, a rigidez rotacional ($K\theta$) encontrada foi adotada para simular a utilização da fibra de carbono com resina epóxi nas ligações da treliça. Como resultado, foi observado que as tensões de resistência à compressão e à tração e o deslocamento máximo do vão estavam dentro dos requisitos exigidos pela NBR 7190 (2022). Assim, a aplicação da técnica proposta de ligação dos nós de uma treliça de madeira com fibra de carbono e resina epóxi mostrou-se viável e segura por atender aos estados limites exigidos pela Norma, e pode ser uma alternativa contra a corrosão externa do ambiente, para redução do peso da estrutura e melhor relação de custo-benefício na elaboração de projetos de Engenharia Civil.

Palavras-chave: Fibra de carbono. Ligações. Madeira. Rigidez. Treliça.

ABSTRACT

Civil construction is an area of Engineering that is constantly evolving to help solve problems, one of which is the corrosion of metal structures in places with high salinity, which required the development of new materials and construction methods. In this sense, this study arose from the need to find an alternative technique to make the connection between wooden truss elements when exposed to maritime environments and industrial areas, since traditional metallic connectors are susceptible to corrosion in these environments, which would lead to a reduction in the reliability of the structure. Therefore, this work was developed with the objective of analyzing — based on a literature review, carrying out experimental tests and through computer simulation — the feasibility of using carbon fiber fabric and epoxy resin to connect the truss nodes. made of wood, replacing metal connectors. To this end, tests were carried out with triangular wooden prototypes of the species *Eucalyptus cloeziana* with the ends of the elements glued with carbon fiber and epoxy resin. The specimens were subjected to axial forces from a hydraulic press with a capacity of 15 tons, in which the displacement values of the upper node of the triangular structure were recorded at each stage of the tests. From this, it was possible to calculate the rotational stiffness parameter ($K\theta$), which was used in the computational analysis using the Finite Element Method (FEM). In the computer simulation, the rotational stiffness ($K\theta$) found was adopted to simulate the use of carbon fiber with epoxy resin in the truss connections. As a result, it was observed that the compressive and tensile strength stresses and the maximum displacement of the span were within the requirements required by NBR 7190 (2022). Thus, the application of the proposed technique for connecting the nodes of a wooden truss with carbon fiber and epoxy resin proved to be viable and safe as it meets the limit states required by the Standard, and can be an alternative against external environmental corrosion, to reduce the weight of the structure and improve the cost-benefit ratio in the development of Civil Engineering projects.

Keywords: Carbon Fiber. Connections. Wood. Stiffness. Truss.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Peça de madeira serrada x Peça de madeira roliça | 20 |
| Figura 2 - Enrijecimento da viga em função da taxa de reforço aplicado | 34 |
| Figura 3 – Deslocamento máximo na placa em função da taxa de reforço aplicada (TRA); ... | 34 |
| Figura 4 - Armazenamento das Toras de Madeira. | 38 |
| Figura 5 - Corpo de prova: dimensões em metros..... | 41 |
| Figura 6 - Peças de madeira cortadas e lixadas antes da montagem. | 41 |
| Figura 7 - Materiais para a confecção do protótipo triangular. | 42 |
| Figura 8 - Montagem do Nó Superior com a fibra de carbono..... | 43 |
| Figura 9 - Montagem do Nó Direito Inferior com a fibra de carbono..... | 44 |
| Figura 10 - Montagem do Nó Esquerdo Inferior com a fibra de carbono. | 44 |
| Figura 11 - Auxílio da caixa de papelão para confecção do protótipo M1. | 45 |
| Figura 12 – Auxílio da fita crepe para a estabilidade do protótipo M1 durante a colagem dos nós inferiores | 45 |
| Figura 13 - Aspecto obtido do protótipo M1 com ligações de fibra de carbono e resina epóxi. | 45 |
| Figura 14 - Ensaio da estrutura triangular M1 de madeira com a fibra de carbono. | 46 |
| Figura 15 - Corpo de prova após ensaio experimental. | 47 |
| Figura 16 - Materiais para a confecção dos protótipos triangulares complementares..... | 48 |
| Figura 17 - Aspecto obtido do protótipo M2 com ligações de fibra de carbono e resina epóxi. | 48 |
| Figura 18 - Aspecto obtido do protótipo M3 com ligações de fibra de carbono e resina epóxi. | 49 |
| Figura 19 - Aspecto obtido do protótipo M4 com ligações de fibra de carbono e resina epóxi. | 50 |
| Figura 20 - Estrutura triangular na prensa hidráulica demonstrando a nova configuração dos ensaios complementares. | 51 |
| Figura 21 - Corpo de prova M2 antes do ensaio experimental..... | 52 |
| Figura 22 - Corpo de prova M3 antes do ensaio experimental..... | 52 |
| Figura 23 - Corpo de prova M4 antes do ensaio experimental..... | 53 |
| Figura 24 - Corpo de prova M2 após ensaio experimental..... | 54 |
| Figura 25 - Corpo de prova M3 após ensaio experimental..... | 55 |
| Figura 26 - Corpo de prova M4 após ensaio experimental..... | 56 |

| | |
|--|----|
| Figura 27 - Representação das relações geométricas presentes durante a aplicação da carga no Protótipo (dimensões lineares em metros)..... | 57 |
| Figura 28 - Relações força-deslocamento do Primeiro Ensaio..... | 60 |
| Figura 29 - Relações momento-ângulo de rotação da Etapa 1. | 60 |
| Figura 30 - Relações momento-ângulo de rotação da Etapa 2. | 60 |
| Figura 31 - Relações força-deslocamento de M2. | 62 |
| Figura 32 - Relações momento-ângulo de rotação de M2..... | 62 |
| Figura 33 - Relações força-deslocamento de M3. | 62 |
| Figura 34 - Relações momento-ângulo de rotação de M3..... | 63 |
| Figura 35 - Relações força-deslocamento de M4. | 63 |
| Figura 36 - Relações momento-ângulo de rotação de M4..... | 63 |
| Figura 37 – Gráfico Deslocamento x Força dos Protótipos..... | 64 |
| Figura 38 - Elemento de viga individual com 6 graus de liberdade. | 66 |
| Figura 39 - Treliça adotada para modelagem (medidas em metros). | 68 |
| Figura 40 - Área de influência para cada nó da treliça central (medidas em metros). | 68 |
| Figura 41 - Modelo da Treliça extraído do SAP 2000 (2023)..... | 73 |
| Figura 42 - Aplicação das propriedades e seções das peças..... | 73 |
| Figura 43 - Aplicação das cargas na treliça (em kN). | 74 |
| Figura 44 - Estrutura rotulada..... | 74 |
| Figura 45 - Deslocamento máximo central da treliça (deslocamento em milímetros)..... | 75 |
| Figura 46 - Tensões de compressão e de tração em MPa. | 75 |
| Figura 47 - Aplicação da rigidez de rotação nos elementos da treliça representando o uso da fibra de carbono. | 76 |
| Figura 48 - Treliça deformada com deslocamento central (deslocamento em milímetros). | 76 |
| Figura 49 - Esforços normais na treliça em MPa. | 77 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|--|----|
| Quadro 1 - Propriedades da Resina Epóxi bicomponente. | 30 |
| Quadro 2 – Comparação qualitativa entre Polímeros Reforçados com Fibra (FRP). | 30 |
| Quadro 3 – Características das diferentes fibras usadas como reforço | 31 |
| Quadro 4 - Propriedades do tecido bidirecional de fibra de carbono. | 31 |
| Quadro 5 – Características de dois tipos de fibra de carbono | 32 |
| Quadro 6 – Resultados para os testes de amostras de fibras de carbono..... | 32 |
| Quadro 7 – Características dos componentes | 39 |
| Quadro 8 – Propriedades do sistema curado | 39 |
| Quadro 9 - Informações técnicas do Tecido bidirecional..... | 40 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Propriedades físicas e mecânicas dos Eucaliptos. | 24 |
| Tabela 2 - Valores característicos de resistência ($f_{w,k}$) de Eucaliptos. | 24 |
| Tabela 3 - Propriedades mecânicas de diferentes espécies de Eucalipto. | 25 |
| Tabela 4 - Valores característicos de resistência à tração de diferentes espécies de Eucaliptos. | 25 |
| Tabela 5 - Pesquisas com diferentes adesivos e diferentes espécies de Eucalipto. | 26 |
| Tabela 6 - Deslocamentos do nó superior. | 59 |
| Tabela 7 - Valores calculados para a Etapa 1. | 59 |
| Tabela 8 - Valores calculados para a Etapa 2. | 59 |
| Tabela 9 - Deslocamentos dos Nós superiores de M2, M3 e M4. | 61 |
| Tabela 10 - Valores calculados para M2. | 61 |
| Tabela 11 - Valores calculados para M3. | 62 |
| Tabela 12 - Valores calculados para M4. | 63 |
| Tabela 13 - Valores de rigidez para cada etapa do primeiro ensaio. | 64 |
| Tabela 14 - Valores de rigidez da ligação para cada ensaio em kN.m/rad. | 65 |
| Tabela 15 - Cálculo da carga de cada nó da treliça central. | 69 |
| Tabela 16 - Valores característicos da espécie da madeira de <i>Eucalyptus</i> | 69 |
| Tabela 17 - Classes de resistência das dicotiledôneas. | 69 |
| Tabela 18 - Tabela de definição de classes de carregamento e valores de K_{mod1} | 71 |
| Tabela 19 - Tabela de valores de K_{mod2} | 71 |
| Tabela 20 – Resultados da Simulação Computacional das Técnicas | 79 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|------|--|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| CFRP | <i>Carbon Fiber Reinforced Polymer</i> (Polímeros reforçados com fibra de carbono) |
| EPI | Isocianato de polímero de emulsão |
| FF | Fenol-formaldeído |
| FRP | <i>Fiber Reinforced Polymer</i> (Polímeros reforçados com fibras) |
| GFRP | <i>Glass Fiber Reinforced Polymer</i> (Polímeros reforçados com fibra de vidro) |
| LVL | Madeira laminada colada |
| MLC | Madeira lamelada colada |
| MUF | Melamina-uréia-formaldeído |
| MF | Melamina-formaldeído |
| PVA | Acetato de polivinila |
| RF | Resorcinol-formaldeído |
| SS | Silicato de Sódio |
| TF | Tanino-formaldeído |
| UF | Ureia-formaldeído |
| UFBA | Universidade Federal da Bahia |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 17 |
| 1.1 OBJETIVOS | 18 |
| 1.1.1 <i>Objetivo geral</i> | 18 |
| 1.1.2 <i>Objetivos específicos</i> | 18 |
| 1.2 JUSTIFICATIVA..... | 19 |
| 1.3 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA | 21 |
| 1.4 ESTRUTURA DA PESQUISA..... | 21 |
| 1.5 PERSPECTIVAS | 22 |
| 1.5.1 <i>Originalidade da Pesquisa</i> | 22 |
| 1.5.2 <i>Contribuições da Pesquisa</i> | 22 |
| 2 REVISÃO DA LITERATURA | 23 |
| 2.1 A MADEIRA DE EUCALIPTO | 23 |
| 2.2 ADESIVOS E A MADEIRA DE EUCALIPTO | 26 |
| 2.2.1 <i>A Resina Epóxi</i> | 30 |
| 2.3 TIPOS DE FIBRAS..... | 30 |
| 2.3.1 <i>A Fibra de Carbono</i> | 31 |
| 2.4 APLICAÇÕES DA FIBRA DE CARBONO COM A MADEIRA | 33 |
| 2.5 CONCLUSÕES DA REVISÃO DA LITERATURA | 37 |
| 3 MATERIAIS E MÉTODOS | 38 |
| 3.1 MATERIAIS | 38 |
| 3.1.1 <i>A Madeira</i> | 38 |
| 3.1.2 <i>O Adesivo</i> | 39 |
| 3.1.3 <i>A Fibra</i> | 40 |
| 3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL | 40 |
| 3.2.1 <i>Montagem do Protótipo</i> | 41 |
| 3.2.2 <i>Primeiro Ensaio Experimental</i> | 46 |
| 3.2.2.1 <i>Análises após o Primeiro Ensaio Experimental</i> | 47 |
| 3.2.3 <i>Ensaios Experimentais Complementares</i> | 47 |
| 3.2.3.1 <i>Análises antes dos Ensaios Complementares</i> | 51 |
| 3.2.3.2 <i>Análises após os Ensaios Complementares</i> | 54 |
| 3.2.4 <i>Análise dos Resultados</i> | 56 |
| 3.2.4.1 <i>Resultados do Primeiro Ensaio</i> | 59 |
| 3.2.4.2 <i>Resultados dos ensaios Complementares</i> | 61 |
| 3.2.4.3 <i>Tratamento dos Dados</i> | 64 |
| 4 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL..... | 65 |
| 4.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS | 70 |

| | |
|--|-----------|
| 4.1.1 Cálculo das Resistências de Projeto | 70 |
| 4.1.2 Módulo de Elasticidade..... | 73 |
| 4.1.3 Dimensionamento da estrutura rotulada | 73 |
| 4.1.4 Dimensionamento da Estrutura com a Fibra..... | 75 |
| 4.1.5 Verificação da Flexão Simples..... | 77 |
| 4.1.6 Verificação da Flexocompressão e Flexotração..... | 78 |
| 4.1.7 Comparação dos Resultados da Simulação Computacional | 79 |
| 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 80 |
| 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 81 |
| REFERÊNCIAS | 82 |
| ANEXO A - FICHA TÉCNICA DO TECIDO DE FIBRA DE CARBONO | 87 |

1 INTRODUÇÃO

A madeira é um material da construção civil que se destaca por ser de fonte renovável e por apresentar propriedades mecânicas que possibilita seu uso, como capacidade de resistência e baixa densidade, além de ser um material de grande apelo estético, com características de durabilidade e trabalhabilidade. A energia embutida em sua produção é menor do que a do aço e do concreto. Atualmente, no cenário da construção civil, grandes empresas se preocupam em desenvolver construções sustentáveis, com a utilização de madeiras de reflorestamento, visando impactar no meio ambiente de forma positiva. A espécie de *Eucalyptus cloeziana* é nativa da Austrália, e o seu cultivo em outros países acontece por meio das sementes (mudas). Por conta da sua aparência estética é bastante adotada em estruturas de telhado, em caibros, vigas, tesouras e na confecção de móveis.

As construções, de modo geral, podem estar susceptíveis a danos devido às falhas de projeto, em decorrência do aumento da carga por causa da mudança de uso do empreendimento ou ao desgaste com o uso da própria edificação. Nessa perspectiva, pode ser constatada a influência de fatores ambientais na aceleração do desgaste nos materiais de construção. Conforme os estudos de Nappi et. al. (2013) a utilização de peças metálicas nas ligações de treliças de madeira pode ser bastante problemática em ambientes com atmosfera úmida, a exemplo de locais próximos ao mar. Isso ocorre porque a corrosão do metal propicia a abertura de fissuras na madeira, facilitando a entrada de umidade no material. Assim, ressalta-se a importância de propor alternativas construtivas para a madeira nessas condições ambientais, como, por exemplo, a utilização da fibra de carbono.

A fibra de carbono é um material que agrega diversos benefícios quando comparado aos seus congêneres, tendo encontrado boa aceitação na indústria civil. Esse é um material muito utilizado em reparo de estruturas de concreto armado, que vem ganhando espaço em muitas outras aplicações, por conta da sua alta resistência à tração, estabilidade térmica e química, além de possuir uma baixa massa específica e uma alta capacidade de resistir a elevadas cargas por conta do seu elevado módulo de elasticidade. Nesse sentido, pesquisas relacionadas ao uso dessa fibra estão em ascensão nos últimos anos, pois informações sobre o seu desempenho se tornaram indispensáveis para o mercado da construção, devido à importância construtiva do material.

O estudo de Fortes (2002) sobre vigas de concreto armado reforçadas com fibras de carbono foi um dos impulsionadores no Brasil para a disseminação do uso da fibra de carbono para reforço nessas estruturas, juntamente com o de Fiorelli (2002) que pesquisava o

comportamento da fibra de carbono em estruturas de madeira, e afirmava que a utilização das fibras de carbono para recuperação e reforço estrutural era um campo extenso e tecnologicamente vasto, que proporcionaria economia de tempo e de materiais na construção civil. Esses estudos foram importantíssimos para a ampliação de um novo campo de estudo na ciência, para divulgação e maior utilização de polímeros reforçados com fibras de carbono em estruturas no mercado da construção civil brasileira.

No projeto de estruturas treliçadas, o tipo de ligação entre os componentes desempenha um papel fundamental na determinação da resistência da estrutura como um todo. Os nós das ligações são pontos críticos nas treliças, onde as barras se encontram e transferem as cargas. A eficácia das ligações afetam diretamente a resistência, rigidez e estabilidade da estrutura. Portanto, é necessário avaliar cuidadosamente a capacidade das ligações em resistir e distribuir esses esforços adequadamente, a fim de evitar falhas e garantir a segurança e o desempenho da treliça.

De acordo com Nadir et al. (2016), os compósitos de polímeros reforçados com fibra possuem uma elevada resistência em relação ao seu peso, capacidade de adaptação, são imunes à corrosão, e, quando comparado às barras e placas de aço convencionais, podem apresentar custos de manutenção reduzidos a longo prazo. Além disso, a relação entre resistência e peso faz com que a fibra de carbono tenha vantagem nesse aspecto em relação ao aço. Nesse sentido, a partir de análises teóricas, surge a hipótese de que os nós de uma treliça de madeira podem ser interessantes e eficientes com a fibra de carbono, além de uma possível alternativa interessante para ambientes caracterizados por uma elevada zona de umidade.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo principal do presente trabalho é realizar um estudo teórico e experimental para analisar a viabilidade de utilizar a fibra de carbono com a resina epóxi na união de nós de treliças de madeira.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do estudo foram:

- Mostrar uma alternativa de técnica construtiva para ligações de treliças;

- Destacar os potenciais benefícios da técnica da ligação dos nós de treliças de fibra de carbono com a resina epóxi;
- Obter os parâmetros de rigidez de rotação por meio de um procedimento experimental e utilizá-los para simular o comportamento de uma treliça real com os mesmos parâmetros de rigidez do protótipo;
- Analisar os valores de deslocamento do nó superior de uma treliça real após a simulação, a fim de demonstrar a viabilidade da utilização da técnica proposta para estruturas triangulares de telhados reais.

1.2 JUSTIFICATIVA

O Brasil é um país de grande extensão territorial, com mais de 7 mil quilômetros de extensão em linha contínua de costa litorânea. Isso significa que há uma preocupação no que diz respeito a técnicas construtivas capazes de resistir aos efeitos do aerossol marinho, já que é um ambiente extremamente agressivo, e é importante dar mais atenção à qualidade dos materiais empregados. Níveis elevados de umidade, efeitos da condensação natural, aliados ao movimento das ondas na praia, geram no ar uma névoa de gotículas de água com alta concentração de sais, que ao serem transportadas pelo vento podem se alojar em diversas superfícies. Uma grave consequência disso é a corrosão.

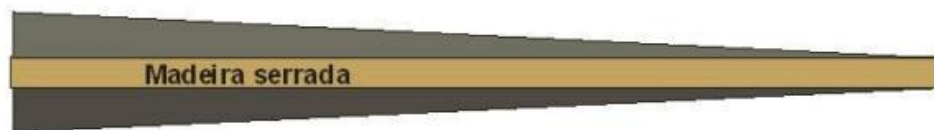
De acordo com Meier (1995) as fibras de carbono devido a sua resistência aos álcalis e podem ser uma alternativa para reforço estrutural. Por isso, estas fibras podem ser uma alternativa para construções de telhados em regiões próximas de marés e zonas industriais, que sofrem com o elevada agressividade ambiental. Em 1995, Meier já abordava que a fibra apresentava facilidade de manuseio em canteiros de obras, devido a sua leveza, e o potencial de reduzir custos com mão de obra. Entretanto, o autor ressaltava que, mesmo com potencial de redução de custo ao longo do tempo, o que torna o seu uso mais viável, a fibra de carbono não iria substituir o aço, o concreto ou a madeira, materiais clássicos da construção civil, mas que iria completá-los. Essa tendência que Meier abordou, de reduzir custos ao longo do tempo, pode-se confirmar atualmente por meio das obras de reparo com fibra de carbono mais rápidas e eficientes, e com o frequente uso desse material nas edificações.

As diversas vantagens que a madeira oferece impulsiona a busca por alternativas leves e de fácil execução para estruturas treliçadas. O progresso tecnológico e os estudos em ligações de madeira têm como objetivo aprimorar o desempenho estrutural e oferecer soluções cada vez mais eficientes para as necessidades atuais da construção.

Brito e Calil Jr. (2010) afirmam que as peças de madeiras roliças são originadas de árvores das áreas de reflorestamento, e que, mesmo sendo uma monocultura, o reflorestamento de eucalipto promove um importante benefício ambiental. Os autores abordam que “o potencial de sequestro de CO₂ é considerado, pela maioria dos pesquisadores, um dos principais, senão o principal, critério na avaliação do benefício eco-ambiental de uma planta.”. O fato exposto torna a madeira reflorestada um material de destaque do ponto de vista sustentável na indústria da construção.

De acordo com Calil (2007), conforme citado por Brito (2010), para garantir a planicidade desejada das peças no processo corte da madeira serrada é gerado cerca de 60% a 70% de resíduos da peça original, para a transformação da madeira serrada, o que reduz a resistência e a rigidez da peça devido à diminuição das seções transversais. A escolha pelo uso da madeira de eucalipto roliça é defendida por alguns autores, como Fiorelli et al. (2008) e Cunha et al. (2014), por exemplo. A Figura 1 representa um comparativo entre a peça de madeira serrada e a peça de madeira roliça.

Figura 1 - Peça de madeira serrada x Peça de madeira roliça



(a) vista da seção longitudinal



(b) vista da seção transversal

Fonte: CALIL (2007 *apud* Brito, 2010).

Segundo Cunha et al. (2014), a adoção do eucalipto roliço pode auxiliar no fortalecimento da sustentabilidade na construção, por ser um material renovável, auxiliando na preservação das florestas naturais, além de proporcionar obras mais leves, mais limpas e, dependendo do tipo de vedação, mais rápidas. Os autores acrescentam que o eucalipto demanda menos energia na sua produção do que materiais como o aço, o alumínio e o concreto. Além

disso, Cunha et al. (2014) ressaltam a importância do eucalipto do ponto de vista sustentável e social, pois o cultivo da madeira roliça e serrada permitem a ampliação de empregos nos diversos setores da produção.

O Brasil, diferente dos países desenvolvidos, não utiliza em grande escala estruturas de madeira. Desse modo, o estudo e implementação de elementos de ligações para esse tipo de estrutura é de grande necessidade, para o incentivo do uso por meio da disseminação do conhecimento.

1.3 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

A pesquisa será fundamentalmente de natureza experimental, buscando avaliar por meio de análise de estudos científicos, ensaios experimentais, e simulação computacional, a viabilidade do uso do tecido de fibra de carbono bidirecional com a resina epóxi bicomponente em ligações treliçadas de madeira da espécie de *Eucalyptus cloeziana*.

A escolha pelo Eucalipto aconteceu com o intuito de motivar o uso de madeira de floresta plantada, para que seja cada vez sempre uma tendência de mercado. A fibra de carbono foi aderida por se destacar em relação às suas propriedades mecânicas entre as outras fibras disponíveis no mercado, e por ser imune à corrosão, para condições com elevada agressividade ambiental. A resina epóxi bicomponente foi aderida pelo seu alto desempenho com a fibra de carbono, como consta na revisão da literatura, e por ser de fácil acesso no mercado.

Dessa forma, o projeto consiste no desenvolvimento de um método de confecção de nós de treliça de madeira de eucalipto com fibra de carbono e resina epóxi, onde será analisada a eficiência da ligação por meio da deslocabilidade do nó superior de um protótipo triangular, que irá fornecer o parâmetro de rigidez de rotação para a simulação computacional de uma treliça real, com as mesmas condições de rigidez do protótipo em suas ligações.

1.4 ESTRUTURA DA PESQUISA

A dissertação foi dividida em: Introdução, Revisão da Literatura, Materiais e Métodos, Discussão e a Análise dos Resultados, Considerações Finais e Referências.

- Na Introdução consta os objetivos (gerais e específicos), a justificativa, a delimitação, a estrutura da pesquisa, os resultados esperados e as perspectivas.
- A Revisão da Literatura se concentra em refletir sobre a madeira de eucalipto na construção civil, como suas aplicações e benefícios. Expõe também sobre os

adesivos utilizados com a madeira, com aprofundamento na resina epóxi, sobre os tipos de fibras disponíveis no mercado, dando enfoque para a fibra de carbono, e apresenta estudos que demonstram as aplicações da fibra de carbono com a madeira.

- O capítulo de Materiais e Métodos apresenta as características e propriedades dos materiais utilizados no estudo, juntamente com o procedimento experimental, que inclui o desenvolvimento do protótipo, o ensaio experimental e a simulação computacional.
- A Discussão e Análise dos Resultados engloba o tratamento dos dados encontrados na etapa de ensaio experimental e simulação computacional.
- O último capítulo apresenta as considerações finais e as sugestões para os trabalhos futuros.

1.5 PERSPECTIVAS

1.5.1 Originalidade da Pesquisa

Na Literatura há muitas pesquisas em torno do reforço de estruturas de madeiras com fibra de carbono e resina epóxi, entretanto, nenhuma se concentra na deslocabilidade do nó de uma estrutura triangular com fibra de carbono e resina epóxi. O emprego de *Polímero Reforçado com Fibra de Carbono* (CFRP) nas ligações de treliças de madeira de floresta plantada é um desafio que está sendo estudado de forma inédita.

1.5.2 Contribuições da Pesquisa

- Esta pesquisa buscou desenvolver uma nova técnica de ligação de treliça de madeira com fibra de carbono, a fim de propor uma alternativa construtiva, principalmente para ambientes com elevada agressividade ambiental.
- Considerou aspectos ambientais, utilizando como uma das matérias primas, a madeira da espécie de *Eucalyptus cloeziana*, proveniente de floresta plantada.
- Amplia novos horizontes para estudos em torno de ligações de treliça de madeira com usos de polímeros reforçados com fibras (FRP).

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 A MADEIRA DE EUCALIPTO

A madeira de eucalipto é extremamente versátil na indústria madeireira e é um recurso natural valioso. De acordo com Amer et al. (2022), o eucalipto é caracterizado pelo seu rápido crescimento, o que faz com que seja cultivado em diversas regiões do mundo para suprir a demanda crescente por madeira.

Segundo Cunha et al. (2014), os primeiros plantios de eucalipto no Brasil iniciaram no início do século XX, mas só passou a ser utilizado na construção civil em 1960. Cunha et al. (2014) afirmam que a produção do eucalipto em florestas plantadas ocorreu devido ao aumento da conscientização em relação à exploração dos recursos naturais de florestas nativas no Brasil, e a adoção desse material confere aos projetos de construções características de sustentabilidade. Em virtude desses fatos, esta prática está se expandindo no mercado da construção.

De acordo com Cunha et al. (2014), as pesquisas relacionadas a caracterização física e mecânica das espécies do gênero de Eucalipto no Brasil, permitiram a utilização do material para fins estruturais, com o conhecimento da sua capacidade resistente mecânica.

O estudo de Coelho et al. (2016) avaliou economicamente o uso da madeira de eucalipto para diferentes finalidades, em uma região de Minas Gerais, e os autores concluíram que das alternativas de investimento analisadas (carvão vegetal, energia/lenha, construção civil e serraria), a produção de madeira para construção civil foi a que apresentou melhor retorno econômico, seguida pela produção de madeira em tora para serraria. E, no geral, os autores afirmaram que a produção de madeira oriunda da prática de reflorestamentos com eucalipto na região era uma alternativa viável, que possibilitava a diversificação da renda, juntamente com a melhoria da qualidade de vida dos produtores rurais. Esse estudo demonstra o potencial da prática de reflorestamento como, além de sustentável, com retorno social e econômico.

A aplicação das espécies do gênero de eucalipto é ampla, para telhados, móveis, madeira engenheirada, em painéis *wood frame*, sistema que utiliza a madeira como material principal para a estrutura da edificação, conforme o trabalho de Santos et al. (2020) e para ESWood, conforme aponta Chen et al. (2019), um material compósito produzido a partir de fibras de eucalipto e resina termofixa, por meio de um processo de prensagem e cura.

Segundo Marini et al. (2022a), o gênero Eucalipto também prospera em regiões mistas com espécies de árvores e plantas distintas, devido sua natureza mais predominante. O estudo

de Marini et al. (2022a) analisou alguns elementos anatômicos de 10 diferentes espécies de eucalipto para estimar as propriedades mecânicas de acordo com parâmetros anatômicos e físicos, a exemplo da altura dos raios e da densidade aparente, com a utilização dos modelos de regressão. Os resultados do estudo estão demonstrados na Tabela 1, e foi observado que as propriedades físicas e mecânicas da madeira de *E. cloeziana* permaneceram próximas aos valores estabelecidos para essa espécie por outros pesquisadores e dos valores presentes na norma brasileira NBR 7190 (ABNT, 1997). A Tabela 2 apresenta os valores característicos de resistência dessas espécies de eucaliptos.

Tabela 1 – Propriedades físicas e mecânicas dos Eucaliptos.

| Espécie do Eucalipto | ρ_{ap} (12%) kg/m³ | RR (%) | RT (%) | f_{c0} (MPa) | f_{v0} (MPa) | E_{c0} (MPa) |
|-----------------------------|--|-------------------|-------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| <i>Cloeziana</i> | 0,86 | 4,98 | 9,06 | 52,58 | 17,64 | 14,254 |
| <i>Camaldulensis</i> | 0,87 | 7,46 | 13,78 | 50,25 | 15,78 | 16,504 |
| <i>Grandis</i> | 0,67 | 6,25 | 9,16 | 40,00 | 11,60 | 12,697 |
| <i>Urophylla</i> | 0,74 | 5,93 | 9,22 | 46,00 | 13,90 | 13,391 |
| <i>Paniculata</i> | 1,09 | 8,51 | 10,39 | 74,00 | 20,50 | 22,886 |
| <i>Alba</i> | 0,71 | 8,11 | 12,12 | 47,00 | 15,90 | 13,409 |
| <i>Tereticornis</i> | 0,90 | 8,54 | 12,08 | 58,00 | 16,20 | 17,285 |
| <i>Microcorys</i> | 0,93 | 6,98 | 9,26 | 55,00 | 17,00 | 17,438 |
| <i>Propinqua</i> | 0,96 | 8,32 | 11,09 | 53,00 | 16,40 | 15,598 |
| <i>Saligna</i> | 0,73 | 7,21 | 10,83 | 47,00 | 13,50 | 14,260 |

Legenda:

ρ_{ap} – Densidade Aparente;

RR – Retração Radial;

RT – Retração Tangencial;

$f_{c0,k}$ – Resistência à compressão paralela ao grão;

$f_{v0,k}$ – Tensão de cisalhamento paralela ao grão;

E_{c0} – Módulo de elasticidade na compressão paralela ao grão.

Fonte: Marini et al. (2022a).

Tabela 2 - Valores característicos de resistência ($f_{w,k}$) de Eucaliptos.

| Espécie do Eucalipto | $f_{c0,k}$ (MPa) | $f_{v0,k}$ (MPa) |
|-----------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| <i>Grandis</i> | 23,21 | 6,94 |
| <i>Alba</i> | 31,71 | 12,93 |
| <i>Cloeziana</i> | 32,09 | 11,81 |
| <i>Saligna</i> | 32,84 | 4,59 |
| <i>Camaldulensis</i> | 37,60 | 13,84 |
| <i>Microcorys</i> | 39,29 | 11,68 |
| <i>Urophylla</i> | 42,11 | 8,94 |
| <i>Propinqua</i> | 44,21 | 11,54 |
| <i>Paniculata</i> | 45,07 | 16,81 |
| <i>Tereticornis</i> | 47,06 | 9,92 |

Legenda:

$f_{c0,k}$ - Valor característico da compressão paralela ao grão;

$f_{v0,k}$ - Valor característico da tensão de cisalhamento paralela ao grão;

Fonte: Marini et al. (2022a).

Em outro estudo, Marini et al. (2022b) investigou as propriedades físicas e mecânicas de diferentes espécies do gênero *Eucalyptus* em função de suas características anatômicas e da densidade aparente, utilizando também o modelo de regressão, a fim de estimar, além da densidade, a resistência à tração paralela às fibras, a resistência à tração perpendicular às fibras e o módulo de elasticidade na tração paralela às fibras. Os resultados das propriedades mecânicas são apresentados na Tabela 3 e os valores característicos de resistência à tração de diferentes espécies de eucaliptos na Tabela 4.

Tabela 3 - Propriedades mecânicas de diferentes espécies de Eucalipto.

| Espécie do Eucalipto | F_{T0} (MPa) | F_{T90} (MPa) | E_{T0} (MPa) |
|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| <i>E. Cloeziana</i> | 89,83 | 3,40 | 14459 |
| <i>E. Camaldulensis</i> | 77,75 | 4,85 | 17803 |
| <i>E. Grandis</i> | 70,00 | 3,00 | 14576 |
| <i>E. Urophylla</i> | 84,00 | 4,20 | 15380 |
| <i>E. Paniculata</i> | 147,00 | 5,50 | 23719 |
| <i>E. Alba</i> | 69,00 | 3,60 | 13888 |
| <i>E. Tereticornis</i> | 116,00 | 4,60 | 17509 |
| <i>E. Microcorys</i> | 120,00 | 4,60 | 19327 |
| <i>E. Propinqua</i> | 92,00 | 4,40 | 16045 |
| <i>E. Saligna</i> | 85,00 | 4,10 | 15981 |

Legenda:

f_{c0,k} – Resistência à tração paralela às fibras;

f_{v0,k} - Resistência à tração perpendicular às fibras;

E_{T0} – Módulo de elasticidade na tração paralela às fibras.

Fonte: Marini et al. (2022b).

Tabela 4 - Valores característicos de resistência à tração de diferentes espécies de Eucaliptos.

| Espécie do Eucalipto | F_{T0,k} (MPa) | F_{T90,k} (MPa) |
|-----------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| <i>E. Grandis</i> | 41,86 | 1,74 |
| <i>E. Alba</i> | 56,11 | 2,43 |
| <i>E. Cloeziana</i> | 60,13 | 2,08 |
| <i>E. Camaldulensis</i> | 68,18 | 3,63 |
| <i>E. Microcorys</i> | 82,43 | 3,29 |
| <i>E. Urophylla</i> | 54,00 | 3,66 |
| <i>E. Paniculata</i> | 120,55 | 3,35 |
| <i>E. Tereticornis</i> | 71,06 | 3,73 |
| <i>E. Propinqua</i> | 64,75 | 3,67 |
| <i>E. Saligna</i> | 28,88 | 2,86 |

Legenda:

F_{T0,k} - Resistência à tração paralela às fibras;

F_{T90,k} - Resistência à tração perpendicular às fibras.

Fonte: Marini et al. (2022b).

Segundo Marini et al. (2022b) determinar as propriedades físico-mecânicas da madeira viabiliza a utilização adequada desse recurso biológico em projetos de natureza estrutural.

Dessa forma, o conhecimento dessas propriedades também contribui para um dimensionamento a favor da segurança e do bom desempenho da estrutura.

2.2 ADESIVOS E A MADEIRA DE EUCALIPTO

De acordo com Bianche et al. (2017), o processo de adesão representa um fenômeno físico-químico que engloba um mecanismo de interação entre superfícies sólidas, a aderente e a adesiva. Os autores afirmam que a substância adesiva apresenta a capacidade de manter outros materiais unidos em sua superfície, e, além de aderir dois substratos, o adesivo também exerce a capacidade de fluir e preencher lacunas presentes entre as junções a serem coladas, resultando na redução da distância entre elas.

Na Literatura, há estudos que se preocupam com a análise aprofundada da eficiência da aderência do eucalipto com diferentes adesivos/resinas. A resistência da linha de cola é de fundamental importância para o bom desempenho da estrutura colada. Há alguns estudos sobre desempenho da adesão com diferentes espécies de eucalipto e de adesivos, principalmente para aplicação em madeiras engenheiradas, conforme demonstra a Tabela 5 a seguir:

Tabela 5 - Pesquisas com diferentes adesivos e diferentes espécies de Eucalipto.

| Espécie | Adesivo | Autores |
|--|--|--------------------------------|
| <i>Eucalyptus grandis</i> | Resorcinol-formaldeído (RF). | Albino et al. (2010) |
| | Resina epóxi. | Mohamad, Accordi e Roca (2011) |
| | Poliuretano monocomponente. | Pröller et al. (2018) |
| | Isocianato de polímero em emulsão bi-componente (EPI) e poliuretano monocomponente. | Vega et al. (2020) |
| | Acetato de Polivinila (PVA) e EPI. | Iejavs et al. (2022) |
| <i>Eucalyptus grandis e Eucalyptus urophylla</i> | Resorcinol-formaldeído (RF) e Poliuretano bicomponente à base de óleo de mamona. | De Oliveira et al. (2020) |
| <i>Eucalyptus sp.</i> | Resorcinol-formaldeído (RF), poliuretano bicomponente à base de óleo de mamona, silicato de sódio, Acetato de polivinila (PVA) e silicato modificado. | Bianche et al. (2016) |
| | Resorcinol-formaldeído (RF). | Petrauski et al. (2016) |
| | Fenol-formaldeído (FF), melamina-formaldeído (MF), resorcinol-formaldeído (RF), silicato de sódio, acetato de polivinila (PVA) e poliuretano à base de mamona. | Bianche et al. (2017) |
| <i>Eucalyptus spp.</i> | Poliuretano monocomponente. | Bourscheid et al. (2019) |

| | | |
|-------------------------------|---|--|
| | Acetato de polivinila (PVA), silicato de sódio (SS), resorcinol-formaldeído (RF); poliuretano de bioteor à base de mamona e silicato modificado. | Bianche et al. (2022) |
| <i>Eucalyptus cloeziana</i> | Melamina-ureia-formaldeído (MUF), Acetato de polivinila (PVA), resorcinol-formaldeído (RF), tanino-formaldeído (TF); ureia-formaldeído (UF) e poliuretano à base de mamona. | Segundinho et al. (2017) |
| <i>Eucalyptus globulus L.</i> | Poliuretano monocomponente. | González-Prieto, Casas Mirás e Torres (2022) |

Fonte: Autora.

O estudo de Albino et al. (2010) avaliou a resistência de juntas coladas obtidas a partir de posições radiais e longitudinais em relação ao tronco da madeira de *Eucalyptus grandis* de 18 anos, e concluiu que a adesão da cola à madeira variou significativamente em diferentes posições. Isto demonstra que, dependendo da região do tronco da madeira, a aderência pode variar.

O estudo de Bianche et al. (2016) avaliou a resistência ao cisalhamento na linha de cola das espécies de *Eucalyptus sp.* e *Pinus sp.* com diferentes adesivos e diferentes gramaturas, e concluíram que o tipo de adesivo e a condição que o corpo de prova tinha sido submetido influenciaram na resistência ao cisalhamento e no percentual de falhas da madeira. É importante ressaltar que um maior percentual de falha na madeira significa uma melhor qualidade na resistência da linha de cola da madeira com o adesivo, e demonstra que essa adesão na região de colagem é maior do que a própria resistência da madeira.

Bianche et al. (2016) concluíram que, para ambas as espécies, os adesivos resorcinol-formaldeído e mamona bicomponente forneceram uma melhor resistência ao cisalhamento na linha de cola na condição seca e úmida, assim como maior percentual de falha na madeira, entretanto os adesivos de silicato de sódio, silicato modificado e PVA não apresentaram bom desempenho nas duas condições. Segundo os autores, a baixa viscosidade do silicato não é muito favorável, pois a superpenetração do adesivo nos poros da madeira ocasiona uma linha de cola fina demais, podendo não ser suficiente para uma adesão eficaz. Além disso, é importante destacar que nos estudos foi evidenciada uma baixa resistência à umidade dos adesivos de silicato e de PVA. Nesse sentido, é importante evidenciar que estes adesivos não seriam indicados para a presente pesquisa, visto que o trabalho busca um adesivo que seja adequado para regiões com elevada umidade.

Da análise de alguns estudos da Tabela 5, pode-se concluir que uma maior taxa de aplicação do adesivo também não significa uma maior adesão, pois uma maior espessura da

linha de cola pode resultar em uma distância entre as superfícies da madeira, não resultando em uma firme adesão, onde os corpos trabalham como um único elemento (Bianche et al., 2016).

Petrauski et al. (2016) avaliaram o comportamento das juntas coladas em um pórtico submetidas a esforços inferiores à sua capacidade de resistência. Os autores buscaram obter parâmetros de resistência mecânica e rigidez da madeira a serem utilizados no projeto da estrutura desenvolvida e afirmaram que o diferencial da pesquisa é justamente o fato de que as juntas de madeira do pórtico foram todas coladas. Eles observaram que as rupturas ocorreram ao redor das ligações, e por isso não deve ser atribuída à alguma falha na colagem, mas podem estar ligadas à capacidade de resistência das chapas de madeira nessas regiões. Além disso, concluíram que as deformações não atingiram os limites estabelecidos pela norma, e que houve uma proximidade entre o valor do deslocamento teórico do método desenvolvido e da média do valor experimental, comprovando a eficiência da metodologia teórica desenvolvida para verificação da estrutura com juntas coladas.

O estudo de Petrauski et al. (2016) demonstra um avanço no que tange às ligações coladas de madeira, e dá subsídio para outros estudos em torno desse tema, mostrando a viabilidade dessas estruturas. Apesar do tipo do adesivo e da espécie de madeira serem diferentes da presente pesquisa, o estudo dos autores abre novas perspectivas para o uso de ligações coladas em diferentes estruturas de madeira das espécies de eucalipto.

A análise dos estudos mostra que diferentes espécies possuem bom desempenho com diferentes resinas, mas quando se trata de aplicações com a fibra de carbono, a resina epóxi é uma das opções e oferece bons resultados na sua aplicação. Nesse sentido, o estudo de Mohamad, Accordi e Roca (2011) de avaliação do desempenho e de análise comparativa entre *Eucalyptus grandis* in natura e autoclavada (tratada com CCA, Arseniato de Cobre Cromatado, um produto utilizado para proteger a madeira contra a deterioração que pode ser causada por fungos e microorganismos) com a fibra de carbono e a de vidro, por meio de ensaios em corpos de prova, eles constataram que a fibra de vidro não tem uma aderência tão eficiente com a resina epóxi em relação a fibra de carbono, o que interfere negativamente no seu desempenho. A grande adoção da resina epóxi para a utilização da fibra de carbono pode ser confirmada no tópico 2.3, onde a maior parte dos estudos evidenciam isto, o que reforça a escolha por este adesivo nesta pesquisa.

Conforme estudos de Pizzo e Smedley (2015), mostram que existem diferenças marcantes na preparação da superfície de madeira quando feita no ambiente de obra ou de fábrica, onde a ligação é constantemente realizada sob pressão controlada. Nesse sentido, deve-se levar em conta que o controle de umidade, temperatura e pressão de colagem em um local

de obra é muito complicado, conforme os fabricantes recomendam, e estes são fatores que interferem em uma adesão eficiente. Por isso, os autores abordam que os adesivos mais recomendados para aplicações em obras são aqueles que possuem boas propriedades de umectação do substrato, alta resistência coesiva interna, propriedades de adesão final que estão relacionadas a uma variedade de mecanismos de adesão, e citam que os adesivos epóxis são os mais adotados para estas situações de colagem de madeira estrutural in loco.

Segundo Pizzo e Smedley (2015), os sistemas epóxis bicomponentes apresentam boa resistência à tração e ao cisalhamento, alta resistência a seco e úmido e bom desempenho contra a umidade e alguns produtos químicos.

Segundo Schober e Rautenstrauch (2006) analisaram experimentalmente e numericamente o desempenho dos adesivos estruturais em reforço de vigas antigas de madeira maciça, com idade superior a 100 anos, removidas de um antigo imóvel residencial, sob cargas de flexão. Eles notaram um ganho de ductilidade nas vigas reforçadas com CFRP em relação às não reforçadas. A motivação do estudo se deu pela falta de conhecimento para aplicação em situações que exigem muita confiabilidade para uso de adesivos estruturais à base de epóxi, a exemplo da recuperação de estruturas históricas de madeira, pois, apesar da larga utilização para reparos desses adesivos, há pouco estudo em torno do desempenho desse produto nesses contextos. O autor aborda sobre a preocupação com as ligações coladas em canteiros de obras, pois é necessário um controle bem feito durante o processo de colagem, já que o bom desempenho das ligações depende diretamente disso.

De acordo com Jankowski et al. (2010), as ligações cola-madeira tendem a falhar mais do que as ligações cola-fibra de carbono, e estas influenciam em um reforço madeira-fibra de carbono. Entretanto, diante da dificuldade de impregnação das tiras de CFRP, os autores reforçam que a superfície da tira para colagem precisa estar muito bem preparada antes da colagem, pois ela tem um papel muito importante para um bom desempenho do reforço.

Dessa forma, vale destacar que para uma adesão eficiente é importante conhecer bem as propriedades dos adesivos e analisar o desempenho com as espécies já estudadas, a fim de encontrar a resina ideal para determinada aplicação, pois elas influenciam diretamente no desempenho das juntas coladas. Além disso, observa-se uma lacuna na literatura de estudos sobre o desempenho de ligações de estruturas treliças com a aplicação da resina epóxi e da fibra de carbono, na espécie de *Eucalyptus cloeziana*.

2.2.1 A Resina Epóxi

Fiorelli (2002) reforça que a propriedade mais singular das resinas epóxi consiste na habilidade para se transformar em um sólido termorrígido, a partir do estado líquido. O estudo realizado por Fortes (2000) mostrou a importante relação de aumento da resistência com o tempo de aplicação do adesivo epoxídico, sendo esse um parâmetro fundamental para definir o momento adequado para o início do serviço de uma peça reforçada. Segundo o autor, de uma forma geral, pode-se colocar a peça para operar a partir de vinte e quatro horas após a colagem do adesivo epóxi com a fibra, contudo o tempo ideal depende de alguns fatores como temperatura ambiente, por exemplo.

Segundo Callister e Rethwisch (2018), os epóxis são amplamente utilizados para aplicações aeroespaciais, demonstram propriedades mecânicas superiores e uma maior resistência à umidade quando comparados às resinas poliésteres e vinílicas.

O manual do fabricante da Sika (2017) fornece algumas propriedades da resina epoxídica bi-componente (Sikadur330), apresentadas no Quadro 1:

Quadro 1 - Propriedades da Resina Epóxi bicomponente.

| Resina Epóxi bicomponente Sikadur330 | |
|--|-----------|
| Densidade | 1,30 kg/l |
| Resistência à tração (após 7 dias de cura) | 30 MPa |
| Módulo de elasticidade na tração (após 7 dias de cura) | 4,5 GPa |
| Módulo de flexão (após 7 dias de cura) | 3,8 GPa |

Fonte: Manual do fabricante, Sika (2017).

2.3 TIPOS DE FIBRAS

Meier (1995), em seu estudo comparativo sobre fibras, revela o potencial dos diferentes tipos e evidencia a fibra de carbono como a que se destaca no conjunto em relação a fibra de vidro e de aramida, já que consegue atender de maneira mais do que satisfatória a todas as condições por ele analisadas. Isso demonstra que a fibra de carbono é a mais interessante para se adotar em qualquer circunstância, pois, apesar do seu custo ser mais alto, o seu grande desempenho, além da sua economia com mão de obra e tempo de instalação, compensa todo o investimento, ver Quadro 2.

Quadro 2 – Comparação qualitativa entre Polímeros Reforçados com Fibra (FRP).

| Critério | Compósitos/Polímeros com Fibra (FRP) | | |
|--------------------------|--------------------------------------|------------|-----------|
| | Carbono | Aramida | Vidro - E |
| Resistência à tração | Muito boa | Muito boa | Muito boa |
| Resistência à compressão | Muito boa | Inadequada | Boa |

| | | | |
|-----------------------------|-----------|-----------|------------|
| Módulo de elasticidade | Muito bom | Bom | Adequado |
| Comportamento à longo prazo | Muito bom | Bom | Adequado |
| Comportamento à fadiga | Excelente | Bom | Adequado |
| Densidade volumétrica | Boa | Excelente | Adequada |
| Resistência à alcalinidade | Muito boa | Boa | Inadequada |
| Custo | Adequado | Adequado | Muito bom |

Fonte: Meier (1995).

Callister e Rethwisch (2018) apresentam as características das diferentes fibras usadas como reforço, conforme mostra o Quadro 3 a seguir:

Quadro 3 – Características das diferentes fibras usadas como reforço

| Material | Massa Específica | Limite de Resistência à tração [GPa (10 ⁶ psi)] | Resistência Específica (GPa) | Módulo de Elasticidade [GPa (10 ⁶ psi)] | Módulo Específico (GPa) |
|----------------------|------------------|--|------------------------------|--|-------------------------|
| Óxido de alumínio | 3,95 | 1,38 (0,2) | 0,35 | 379 (55) | 96 |
| Aramida (Kevlar 49) | 1,44 | 3,6-4,1 (0,525-0,600) | 2,5-2,85 | 131 (19) | 91 |
| Carbono | 1,78-2,15 | 1,5-4,8 (0,22-0,70) | 0,70-2,70 | 228-724 (32-100) | 106-407 |
| Vidro - E | 2,58 | 3,45 (0,5) | 1,34 | 72,5 (10,5) | 28,1 |
| Boro | 2,57 | 3,6 (0,52) | 1,40 | 400 (60) | 156 |
| Carbeto de silício | 3,0 | 3,9 (0,57) | 1,30 | 400 (60) | 133 |
| UHMWPE (Spectra 900) | 0,97 | 2,6 (0,38) | 2,68 | 117 (17) | 121 |

Fonte: Callister e Rethwisch (2018).

Pode-se observar que as fibras de carbono tem elevado módulo de elasticidade, além de possuir elevado módulo específico e elevada resistência específica.

2.3.1 A Fibra de Carbono

Na Literatura é encontrada algumas propriedades de tecidos bidirecionais da fibra de carbono. O Estudo de Jayaprakash et al. (2007) fornece algumas propriedades do tecido bidirecional utilizado do fabricante Sika, ver Quadro 4.

Quadro 4 - Propriedades do tecido bidirecional de fibra de carbono.

| Tecido bidirecional de fibra de carbono | |
|---|----------------------|
| Orientação da fibra | 0/90 (bidirectional) |
| Espessura | 0,09 mm |
| Resistência à tração | 3.800 MPa |
| Módulo de Elasticidade | 230 GPa |

Fonte: Jayaprakash et al. (2007).

No trabalho de Gómez et al. (2016), as características dos dois tecidos bidirecionais de fibra de carbono que eles utilizaram são apresentadas, conforme demonstra o Quadro 5.

Quadro 5 – Características de dois tipos de fibra de carbono

| Tipo de Fibra | Layout | Espessura | Resistência à tração (MPa) | Módulo de Elasticidade (GPa) |
|----------------------|--------------|-----------|----------------------------|------------------------------|
| 160 g/m ² | Bidirecional | 0,04 | 4.757 | 208,590 |
| 210 g/m ² | Bidirecional | 0,06 | 4.589 | 197,875 |

Fonte: Gómez et al. (2016).

De acordo com Pamar et al. (2015), o material precursor mais comum é a PAN (poliacrilonitrila), pois fornece as melhores propriedades da fibra de carbono. Segundo os autores, a fibra de carbono é classificada de acordo com o módulo em que suas propriedades se enquadram: Alto resistência (HS), módulo intermediário (IM), alto módulo (HM) e módulo ultra alto (UHM).

Pamar et al. (2015) afirmam que, das fibras disponíveis no mercado, a fibra de carbono apresenta a maior rigidez entre todas, aliado a uma elevada resistência em tração e compressão, à corrosão, fadiga e fluência. Por outro lado, os autores afirmam que a mesma possui baixa resistência à impacto, comparando com outras fibras. Reforçam também que, por possuir baixa densidade e facilidade de processamento, torna-a muito atraente. Enfim, pode-se concluir que a fibra é uma excelente alternativa de material devido às suas propriedades mecânicas.

Pamar et al. (2015) realizaram um estudo investigativo das propriedades mecânicas do tecido bidirecional da fibra de carbono, de caráter experimental, e obtiveram algumas propriedades de tração e flexão de tecidos bidirecionais, orientados em diferentes ângulos, conforme apresenta o Quadro 6.

Quadro 6 – Resultados para os testes de amostras de fibras de carbono

| Tração | | | | | | |
|-------------------|-----------------------------|--|---------------|--|--------------------------------------|--|
| Orientação | Máxima Carga de Ruptura (N) | Resistência máxima à tração (N/mm ²) | Extensão (mm) | Carregamento no ponto de alto rendimento (N) | Módulo de Young (N/mm ²) | |
| 90° | 6.950 | 365,3 | 7,85 | 3.398 | 22.184,30 | |
| 30° | 2.685 | 125,20 | 16,40 | 995,96 | 16.923,35 | |
| 45° | 3.452 | 175,30 | 13,25 | 1.112,10 | 4.623 | |
| Flexão | | | | | | |
| Orientação | Máxima Carga de Ruptura (N) | Resistência máxima à flexão (N/mm ²) | Deflexão (mm) | Carregamento no ponto de alto rendimento (N) | Módulo de Young (N/mm ²) | Resistência à flexão (3 pontos) (N/mm ²) |
| 90° | 493,5 | 12,23 | 8,483 | 55,83 | 5.550,2 | 358,05 |
| 30° | 204,3 | 5,87 | 9,843 | 25,32 | 2.456,2 | 175,71 |
| 45° | 255,4 | 6,12 | 14,25 | 20,17 | 2.935,2 | 165,32 |

Fonte: Pamar et al. (2015).

Os resultados obtidos no ensaio de Pamar et al. (2015) mostram a grande influência que a orientação das fibras dos compósitos poliméricos exerce nas suas propriedades mecânicas. Observou-se também que os melhores resultados de resistência à flexão e tração foram obtidos com a orientação das fibras à 90°, em comparação com as outras orientações. Para a resistência à tração, a orientação menos indicada é a de 30°, com a menor resistência máxima e carga de ruptura máxima inferior às outras orientações.

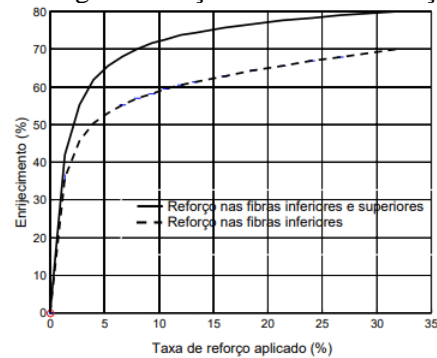
De acordo com Callister e Rethwisch (2018), a fibra de carbono em temperatura ambiente, não sofre com a umidade nem é afetada por diversos tipos de solventes, ácidos e bases. Os autores afirmam que a sua fabricação depende dos materiais orgânicos precursores (rayon, piche e poliacrilonitrila, que é a PAN) e que estes influenciam nas características finais da fibra.

2.4 APLICAÇÕES DA FIBRA DE CARBONO COM A MADEIRA

Fiorelli e Dias (2002) discorrem acerca da utilização de fibra de vidro e de fibra de carbono em reforço de estruturas de madeira das espécies Pinus e Peroba Rosa. Eles realizaram uma análise teórica e experimental das madeiras reforçadas com as fibras e constataram que o aumento de resistência e de rigidez é proporcional ao aumento do número de camadas de fibra. Com propriedades mecânicas inferiores às do tecido de fibra de carbono, foi necessário utilizar três camadas de fibra de vidro, para alcançar o mesmo desempenho de uma camada de fibra de carbono, em reforço de vigas. Além disso, foi constatado, também, que o adesivo epóxi apresentou melhor desempenho em comparação a outros adesivos na laminação ou fixação das fibras na madeira. Assim, os resultados obtidos no estudo indicaram o aumento da resistência, da rigidez e dos deslocamentos das vigas de madeira reforçadas.

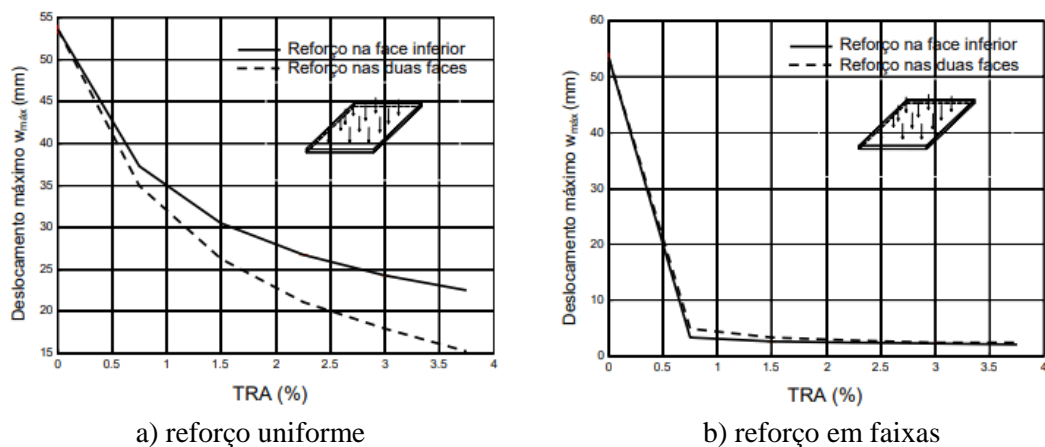
Cunha e Souza Jr. (2004) estudaram o comportamento de estruturas de vigas de madeira maciça e placas compósitas de madeira do tipo compensado reforçadas com fibras de carbono, a fim de identificar a curva de enrijecimento em função do reforço aplicado neste compósito de camadas, com diferentes propriedades mecânicas e concluíram que o aumento de rigidez da estrutura é proporcional a taxa de reforço de fibras e, quando se tem a mesma taxa de reforço, a espessura do reforço é mais importante do que a largura, pois nos seus estudos, a rigidez aumentou muito mais quando o reforço foi feito em faixas nas placas, do que quando distribuído em toda a superfície, ver Figura 2 e Figura 3.

Figura 2 - Enrijecimento da viga em função da taxa de reforço aplicado



Fonte: Cunha e Souza Jr. (2004, p. 76).

Figura 3 – Deslocamento máximo na placa em função da taxa de reforço aplicada (TRA);



Fonte: Cunha e Souza Jr. (2004, p. 79).

Um dos trabalhos precursores no Brasil com o eucalipto e a fibra de carbono foi o de Mohamad, Accordi e Roca (2011), com a associação de compósitos para recuperação e reforço de sistemas construtivos de madeira. Estes autores realizaram uma análise comparativa, com ensaios de tração direta usando corpos de prova de madeira sem reforço, in natura, autoclavada, e corpos de prova de madeira reforçados com tecidos de fibra de vidro e de carbono unidirecional, com resina epóxi bicomponente, e observaram um melhor desempenho para corpos-de-prova reforçados com a fibra de carbono, no que diz respeito à tensão de ruptura, pois alcançaram um ganho de 90% de resistência, em relação aos que não possuíam, já os corpos de prova com fibra de vidro tiveram 50% de aumento da resistência.

Mohamad, Accordi e Roca (2011), utilizando a resina epóxi com a espécie de *Eucalyptus grandis* in natura e autoclavada, demonstraram a viabilidade da utilização da resina para reforço de fibra de carbono nessa madeira com essas condições, o que reforça a ideia de que espécies de Eucalipto podem ser bem receptivas a esse compósito.

De La Rosa García et al. (2013) afirmam que a capacidade de carga de uma viga pode ser aumentada dependendo do material que será reforçado, do tipo de fibra utilizada, da forma que o reforço é distribuído na estrutura, do volume dos polímeros reforçados com fibra, e do estado da superfície de ligação entre a madeira e o *Polímero Reforçado com Fibras* (FRP), ao longo de todo o teste, até a fratura.

De La Rosa García et al. (2013), nas análises dos sistemas de reforço de materiais compósitos, mostram, por meio da realização de ensaios experimentais em vigas sem reforço e reforçadas com fibra de basalto e com fibra de carbono, com diferentes gramaturas em forma de U, e o auxílio de uma matriz de resina epóxi formando o material compósito, que as vigas que possuíam reforço atingiam maiores cargas de fratura e maior rigidez em relação às que não tinham reforço. Estes autores encontraram resultados muito bons com os tecidos bidirecionais de fibra de carbono, atingindo elevadas tensões, e afirmam que o tecido de fibra de carbono, quando se trata de tensões, é melhor otimizado em relação aos tecidos de fibra de basalto.

Sendo a fibra um material com elevada capacidade de resistência à tração, estudos evidenciam uma tendência da fibra de carbono ser um material indicado também, para técnicas de fortalecimento de madeiras deterioradas e com defeitos para recuperação de estruturas antigas, como maneira de preservar as características da construção, por meio de diferentes técnicas de reforço. Li et al. (2014) buscaram solucionar o problema das vigas de edifícios históricos de Taiwan, deterioradas por fungos, com reforço no centro da viga da madeira usando hastes de GFRP (*Polímero Reforçado com Fibra de Vidro*) e CFRP (*Polímero Reforçado com Fibra de Carbono*), e notaram o aumento das resistências médias das vigas, quando comparado às vigas sem reforço.

Andor et al. (2015) realizaram uma análise experimental e estatística de vigas de madeira reforçadas com tecido de fibra de carbono unidirecional e resina epóxi bicomponente, com diferentes quantidades de camadas e larguras de tecido, e notaram um aumento da resistência em todas as situações de reforço.

O estudo de Khelifa et al. (2015) demonstrou que o uso de modelos computacionais apresentou boa confiabilidade para prever ensaios de flexão em vigas de madeira. Estes autores utilizaram um software de elementos finitos para testar o efeito do reforço de vigas de madeira com fibra de carbono e concluíram que o reforço com duas e três camadas apresentou um aumento significativo de resistência à flexão em comparação com as vigas não reforçadas. Além disso, Khelifa et al. (2015) ressaltaram que os reforços com materiais compósitos contribuem no aumento da rigidez da madeira com o grande benefício de não ser necessário elevar a espessura da viga, o que promove economia de material e diminuição do peso da estrutura.

Nos últimos anos, diversas pesquisas surgiram em torno do reforço de estruturas de madeira engenheiradas com o uso da fibra de carbono. O estudo de Nadir et al. (2016) comprovou a eficiência da fibra de carbono em relação à fibra de vidro no reforço de vigas MLC (Madeira Lamelada Colada), com destaque para a configuração de dupla camada, pois forneceu um melhor desempenho para a estrutura com aumento da rigidez e na resistência à flexão.

Yang et al. (2016) estudaram o desempenho na flexão de vigas MLC com diferentes técnicas de reforço com barras de CFRP, e concluíram que as vigas com barras pré-tensionadas com uma baixa taxa de reforço (menos de 1%) alcançaram um aumento de mais de 90% da capacidade de carga, e de aproximadamente 33% na rigidez à flexão comparadas às vigas sem reforço. Eles observaram que as barras que não foram tensionadas proporcionaram para a estrutura um aumento na capacidade de flexão de aproximadamente 65% e de rigidez à flexão de quase 20%.

Subhani et al. (2017) analisaram a eficiência, por meio de ensaios de flexão a três pontos, de um grupo de vigas retangulares de madeira laminada colada (LVL) sem reforço, e com duas maneiras diferentes de reforços de CFRP, e concluíram que a técnica que se mostrou mais eficiente para o reforço a de contorno em U da região tracionada da viga, pois forneceu um ganho de rigidez de 19,74% e de ductilidade em torno de aproximadamente 30%, além de fornecer um aumento médio da capacidade de carga de 25%, em relação às vigas não reforçadas.

Globa et al. (2018) notaram em seus estudos que a técnica de reforço de vigas LVL somente com tira de tecido unidirecional de CFRP com resina epóxi bicomponente apresentou resultados inferiores à técnica U-wrap, quando aplicada na região de tensão da viga LVL, pois, enquanto o reforço com a tira externa aumentava apenas 10% da capacidade de carga, 4% de ductilidade e 14% de rigidez, em relação às vigas de controle, a técnica U-wrap com tecido unidirecional de CFRP, proporcionava um ganho de rigidez, ductilidade e de capacidade de carga em 20%, 30%, e de 25%, respectivamente, com uma falha mais dúctil, demonstrando resultados muito melhores. Além disso, estes autores concluíram que ao introduzir o CFRP bidirecional em testes de viga-coluna, envolvendo a ligação, foi alcançado resultados muito interessantes de resistência à flexão dos compósitos CFRP-LVL, aumento da capacidade de carga em 86%, e foi notado que o tecido bidirecional aumentava a ductilidade da viga, por meio da deflexão máxima das amostras.

Rescalvo et al. (2018) realizaram uma análise experimental e analítica da capacidade de carga de flexão de vigas de madeira velhas com defeitos, quando reforçadas com fibra de carbono, e evidenciou que elas aumentaram em 88% a sua capacidade de carga de flexão, em

relação às vigas sem reforço. Além disso, Rescalvo et al. (2018) afirmam que reforços com elementos metálicos são mais demorados, com etapas complexas de instalação, aumentam o peso da estrutura e podem perder a eficácia ao longo do tempo.

Bakalarz e Kossakowski (2019) realizaram ensaios de flexão de quatro pontos em vigas LVL sem reforço e com reforço de tecidos de fibra de carbono unidirecional com resina epóxi bicomponente, e evidenciaram que o reforço somente na região inferior da viga foi capaz de fornecer um ganho de resistência a flexão de 30% e com o tecido envolvendo a viga em forma de U até a metade da altura da seção transversal um ganho de 35%, já que é uma taxa de reforço maior. No trabalho destes autores, as vigas LVL reforçadas mostraram mais ductilidade.

Novosel et al. (2021) reforçaram vigas de madeira lamelada colada (MLC) com polímero reforçado com fibra de carbono (CFRP) e notaram que uma ou duas camadas de fibra na largura da viga (zona de tensão) proporcionaram uma elevação das propriedades mecânicas. Entretanto, os autores notaram que com o aumento severo das camadas as propriedades de tração da fibra não eram inteiramente aproveitadas devido às falhas de resistência da linha de cola da resina com a madeira.

Bakalarz e Kossakowski (2022a) analisaram o desempenho de vigas LVL com tecido unidirecional de CFRP, com o reforço em U, por meio de ensaios de flexão em quatro pontos e concluíram que a qualidade do reforço foi superior na medida que aumentou a taxa de reforço e a superfície de envolvimento, e afirmaram que os tecidos de CFRP com a resina epóxi são muito interessantes para o reforço de estruturas em utilização, por serem por ser de fácil execução, além de não exigir muito tempo. Bakalarz e Kossakowski (2022b) em seus estudos concluíram que a rigidez à flexão da viga aumenta de acordo com um maior módulo de elasticidade da fibra do compósito, e por isso o tecido de fibra de carbono se destaca devido ao seu elevado módulo de elasticidade.

2.5 CONCLUSÕES DA REVISÃO DA LITERATURA

Como pode ser visto, os estudos existentes indicam bons resultados com a utilização de tecido de fibra de carbono bidirecional e resina epóxi bicomponente, com peças estruturais de madeira. A técnica de fabricação predominante diz respeito ao envolvimento total da região de aplicação da fibra, de forma a proporcionar uma melhor área de reforço. A adoção do tecido bidirecional parece ser a mais adequada para este estudo, devido às diferentes direções dos esforços que a estrutura deverá resistir. Poucos estudos tratam da confecção de nós de treliça, e essa lacuna é que foi observada no presente campo de pesquisa.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

3.1.1 A Madeira

Souza Junior (2004) encontrou características mecânicas da espécie de *Eucalyptus cloeziana* de diferentes municípios de Minas Gerais apresentando pouca variação entre os resultados encontrados para as madeiras oriundas das duas regiões, como a resistência à flexão com um valor médio aproximado de 125 MPa, o módulo de elasticidade variando aproximadamente entre 12.700 e 13.130 MPa, a resistência à compressão paralela na faixa de 82,5 e 83,9 MPa e a resistência ao cisalhamento próximo de 16 e 17 MPa com a mesma espécie das duas regiões.

Alves et al. (2017) encontraram valores médios nas amostras da madeira de *Eucalyptus cloeziana* F. Muell, com 10 anos de idade, de 703 kg/m³ para a densidade básica, 843 kg/ m³ para a densidade aparente seca, 929 kg/m³ para densidade aparente com umidade entre 10,45% a 39,16% e 916 kg/m³ para a densidade aparente com 12% de umidade.

Araújo et al. (2004) afirmam que a espécie de *Eucalyptus cloeziana* F. Muell no litoral norte da Bahia, local de onde foi retirada a madeira utilizada para a presente pesquisa, possui uma importância estratégica para a região, devido a ocupação de localidades marginais e à qualidade da madeira.

A espécie de madeira adotada para a confecção das barras da treliça é encontrada em território brasileiro, possuindo características mecânicas e de trabalhabilidade relevantes. A madeira foi fornecida em toras pela CM Venturoli, retirada da área de reflorestamento do Litoral norte da Bahia, com diâmetro variando entre 6 e 8 cm, ver Figura 4.

Figura 4 - Armazenamento das Toras de Madeira.



Fonte: Autora.

3.1.2 O Adesivo

O adesivo utilizado foi uma resina epóxi bicomponente 2001 e endurecedor 3154, do fabricante Redelease, utilizada para fins estruturais. Segundo o fabricante, a resina epóxi base do sistema é um produto líquido, que é o resultado da reação da Epicloridrina com Bisfenol-A. A proporção do volume utilizado para a resina epóxi e o endurecedor foi de 2:1. Foi utilizada uma quantidade média entre 75 g e 100 g (g = grama) de saturante por camada, ao todo entre 225 g e 300 g por nó, resultando entre 0,3 a 0,4 g/cm², equivalente a 3 kg/m² e 4kg/m², de saturação por nó. O tempo de cura total de 7 dias foi respeitado conforme o fabricante recomenda após a aplicação.

De acordo com o fabricante, Redelease, as vantagens do sistema de Resina Epoxi 2001 com Endurecedor 3154, inclui a sua fluidez, excelente transparência e retenção de cores, facilidade de processamento, elevada resistência química, principalmente ao intemperismo e umidade, elevada resistência mecânica se utilizada com fibras, possui estabilidade aos ciclos térmicos, impactos e ações mecânicas, alta adesão, alta dureza, resistência à abrasão, facilidade de impregnação na aplicação de laminados, juntamente com alto poder de adesão. O Quadro 7 e o Quadro 8 apresentam as características dos componentes isolados e do sistema após a cura.

Quadro 7 – Características dos componentes

| Características | Resina Epóxi 2001 | Endurecedor 3154 |
|--|--------------------------|-----------------------------|
| Aparência | Líquido incolor viscoso | Líquido levemente amarelado |
| Viscosidade, 20°C, cPs | 10.000 a 14.000 | 200 máx. |
| Peso Específico, 20°C, g/cm ³ | 1,16 +/- 0,01 | 1,005 +/- 0,015 |

Fonte: Redelease (Fabricante).

Quadro 8 – Propriedades do sistema curado

| | |
|--|---------------|
| Temperatura de Deflexão Térmica (HDT) (°C) | 95-100 |
| Força de Compressão (MPa) | 34,47 |
| Força de Tração (MPa) | 20,68 – 42,75 |
| Elongação (%) | 2,8 |

Fonte: Redelease (Fabricante).

A Temperatura de Deflexão Térmica (HDT, do inglês Heat Deflection Temperature) é uma medida que indica a temperatura em que um material começa a se deformar sob carga, perdendo sua rigidez. Uma amostra do material é submetida a uma carga específica e a temperatura é elevada gradualmente. Então, quando uma determinada deflexão é atingida no material, essa temperatura é registrada.

A propriedade de Elongação refere-se à capacidade do material de se deformar ou esticar antes de se romper. É uma medida da elasticidade ou flexibilidade do material, e é expressa como a porcentagem de aumento no comprimento original do material antes de atingir o ponto de ruptura. Então, quanto maior for a maior elongação de uma resina epóxi curada, mais flexível e deformável essa resina será antes de atingir o ponto de ruptura.

3.1.3 A Fibra

A Fibra adotada no presente estudo foi o tecido bidirecional da Texiglass Indústria e Comércio Têxtil Ltda, com filamentos de alta resistência e um peso de aproximadamente 200 g/m². Foram utilizadas três camadas de tecidos de 50 cm de comprimento por 5 cm de largura, resultando em uma área de fibra utilizada de 750 cm² em cada nó do triângulo.

O Quadro 9 apresenta as propriedades do tecido bidirecional, indicadas pela Texiglass Indústria e Comércio Têxtil Ltda, fabricante do material utilizado no presente trabalho.

Quadro 9 - Informações técnicas do Tecido bidirecional.

| | |
|-------------------------|------------------------|
| Resistência à Tração | 4.500 MPa |
| Módulo de Elasticidade | 240 GPa |
| Tipo de trama | Sarja 2x2 |
| Peso | 200 g/m ² |
| Espessura | 0,29 mm |
| Densidade | 1,76 g/cm ³ |
| Número de Fios de trama | 5 fios/cm |

Fonte: Texiglass Indústria e Comércio Têxtil Ltda.

3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Trata-se de ensaios, tendo como objetivo principal a obtenção dos deslocamentos de uma ligação de peças roliças de madeira realizada com fibra de carbono. Secundariamente, o ensaio visa avaliar o comportamento de ligações dessa natureza, particularmente, modos de ruptura, tendências, movimentos, entre outros aspectos possíveis de serem observados. Os corpos de prova serão constituídos de um protótipo triangular feito com madeira de *Eucalyptus cloeziana*, envolvido com tecido de fibra de carbono e resina epóxi na região da ligação entre as partes.

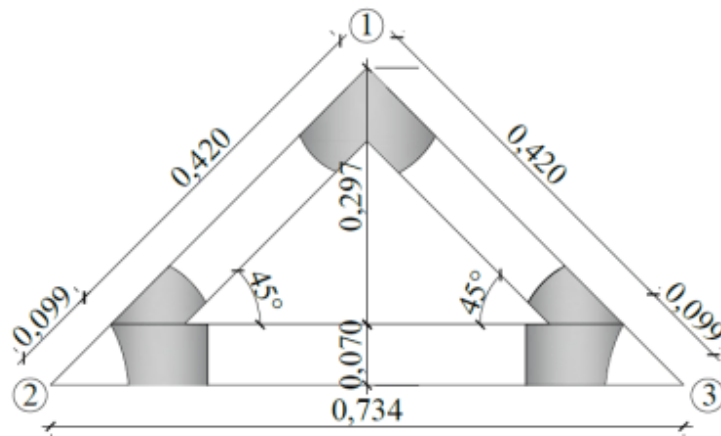
Os experimentos foram realizados empregando-se uma prensa hidráulica, de acionamento manual, com capacidade de 15 toneladas-força (ton) ou aproximadamente 150 kN.

3.2.1 Montagem do Protótipo

No primeiro dia da montagem do protótipo, dia 19 de maio de 2023, na região de Salvador próxima ao Aeroporto. No segundo dia da montagem do protótipo, dia 20 de maio de 2023, no mesmo local do dia anterior, foram montados os dois nós inferiores.

As dimensões do protótipo foram definidas de acordo com a prensa utilizada no ensaio, com ângulo de 45° entre o banzo inferior e cada diagonal. Os nós do triângulo foram numerados para a coleta e tratamento de dados, e juntamente com as dimensões do protótipo pode ser observado na Figura 5. As peças de madeira foram cortadas, lixadas e limpas com pano seco antes de iniciar a montagem e são mostradas na Figura 6. Os materiais utilizados na montagem do protótipo para o primeiro ensaio são apresentados na Figura 7.

Figura 5 - Corpo de prova: dimensões em metros.



Fonte: Autora.

Figura 6 - Peças de madeira cortadas e lixadas antes da montagem.



Fonte: Autora.

Figura 7 - Materiais para a confecção do protótipo triangular.



a) Tecido bidirecional de fibra de carbono.



b) Endurecedor Epoxi 3154 e Resina epóxi 2001.



c) Trena, tesoura, colher, fita crepe, balança digital, pincéis e recipiente para mistura.
Fonte: Autora.

O envolvimento dos nós aconteceu conforme o procedimento apresentado na Figura 8, Figura 9 e Figura 10. Uma trena foi utilizada para o corte da madeira e do tecido. O protótipo foi construído a partir de um único tronco de árvore da espécie de Eucalipto Cloeziana. Então, os outros protótipos a serem construídos também terão todas as suas peças a partir de um mesmo tronco de árvore, a fim de evitar dispersão dos resultados. A nomenclatura para diferenciação das peças aconteceu da seguinte forma: o primeiro tronco foi chamado de M1, então todas as

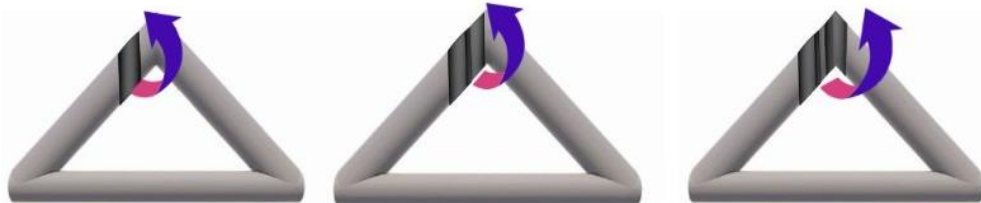
peças de madeira do primeiro tronco foram chamadas de M1 e foram utilizadas para construir este protótipo para o primeiro ensaio experimental. O segundo, o terceiro e o quarto tronco foram chamados de M2, M3 e M4, então todas as peças de madeira do segundo tronco foram chamadas de M2 e foram utilizadas para construir o segundo protótipo, as peças do terceiro tronco foram chamadas de M3 e foram usadas para o terceiro protótipo, e as do quarto tronco foram chamadas de M4 e foram usadas no quarto protótipo.

Dessa forma, o primeiro protótipo, ou a primeira estrutura triangular, foi identificado por M1. O segundo, o terceiro e o quarto protótipos foram construídos para os ensaios experimentais complementares, e foram identificados por M2, M3 e M4

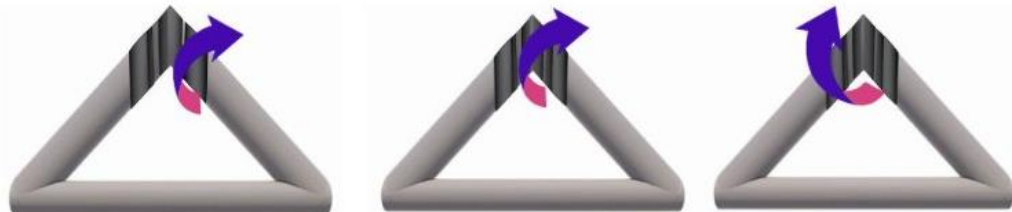
Com o auxílio da fita crepe e uma caixa de papelão como suporte de apoio, foi possível estabilizar a estrutura para a montagem do triângulo, ver Figura 11 e Figura 12. A fita crepe mostrou ser importante também no auxílio do corte do tecido, para preservar a trama bidirecional. Após pesar na balança a quantidade de resina e endurecedor, após a mistura, a resina foi aplicada na madeira com os pincéis em uma quantidade de modo que toda a área da fibra ficasse saturada. Assim, a cada camada de fibra, foi aplicada a resina na área que foi preenchida pela fibra. O aspecto visual obtido pode ser visto na Figura 13.

Figura 8 - Montagem do Nó Superior com a fibra de carbono.

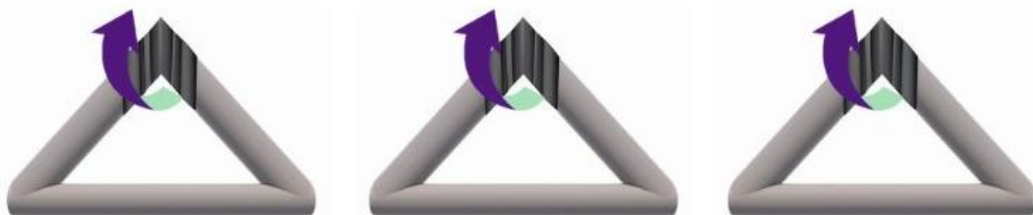
1ª Camada do Nó Superior



2ª Camada do Nó Superior

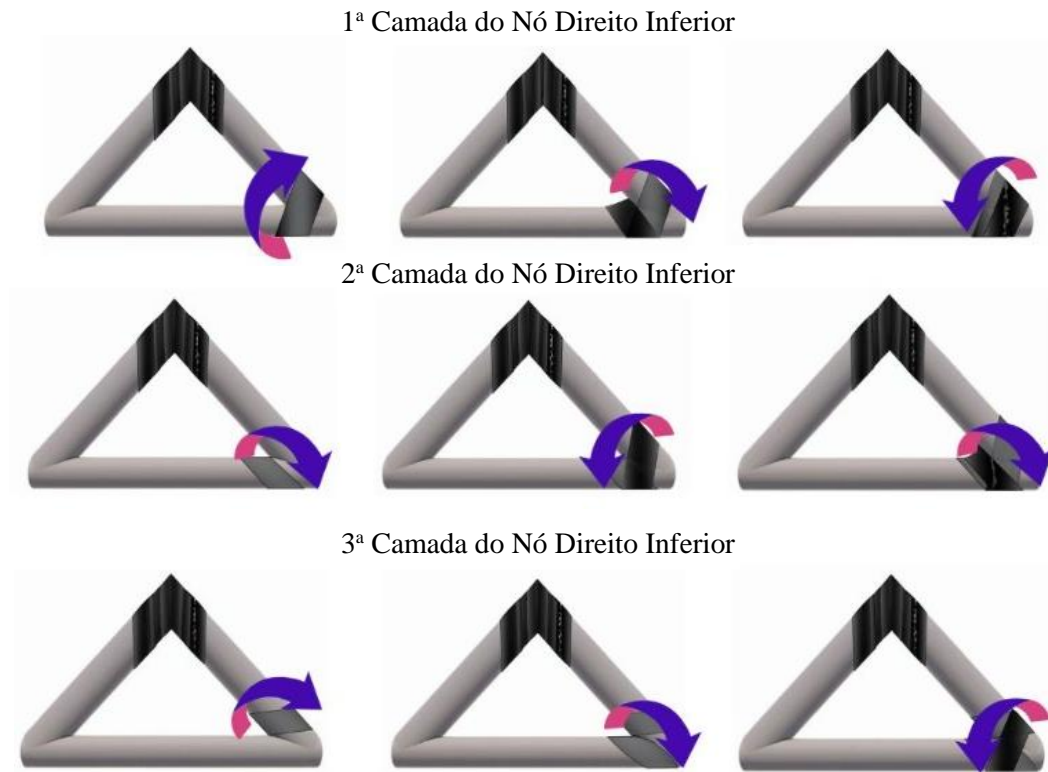


3ª Camada do Nó superior



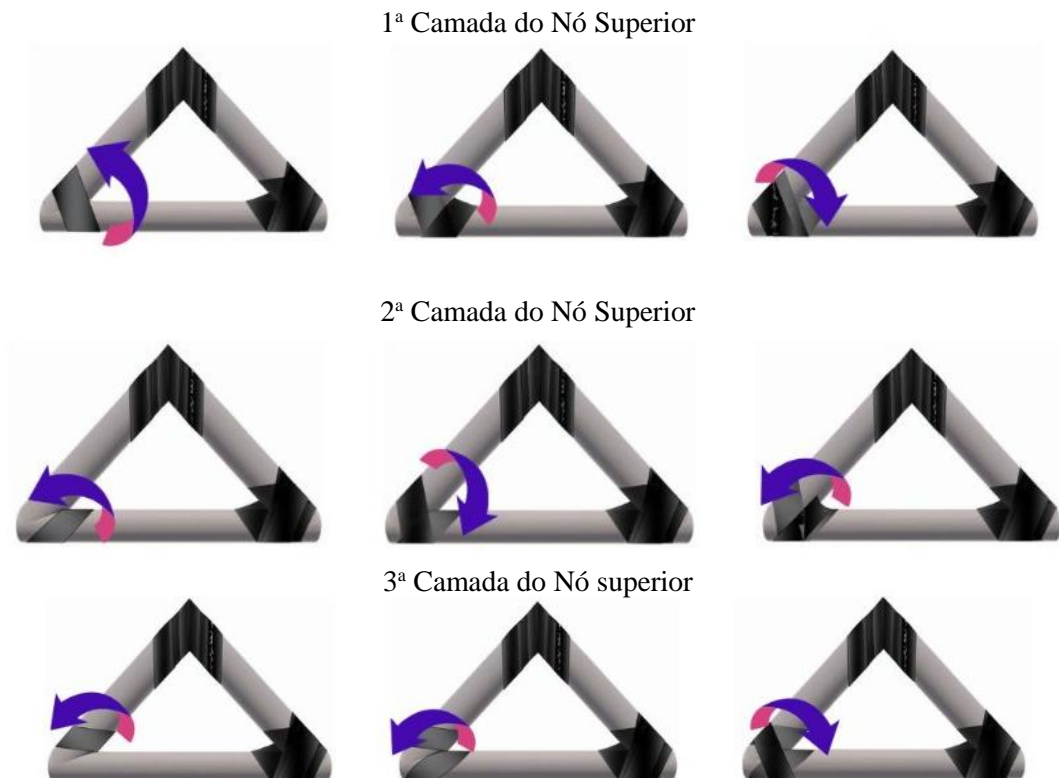
Fonte: Autora.

Figura 9 - Montagem do Nó Direito Inferior com a fibra de carbono.



Fonte: Autora.

Figura 10 - Montagem do Nó Esquerdo Inferior com a fibra de carbono.



Fonte: Autora.

Figura 11 - Auxílio da caixa de papelão para confecção do protótipo M1.



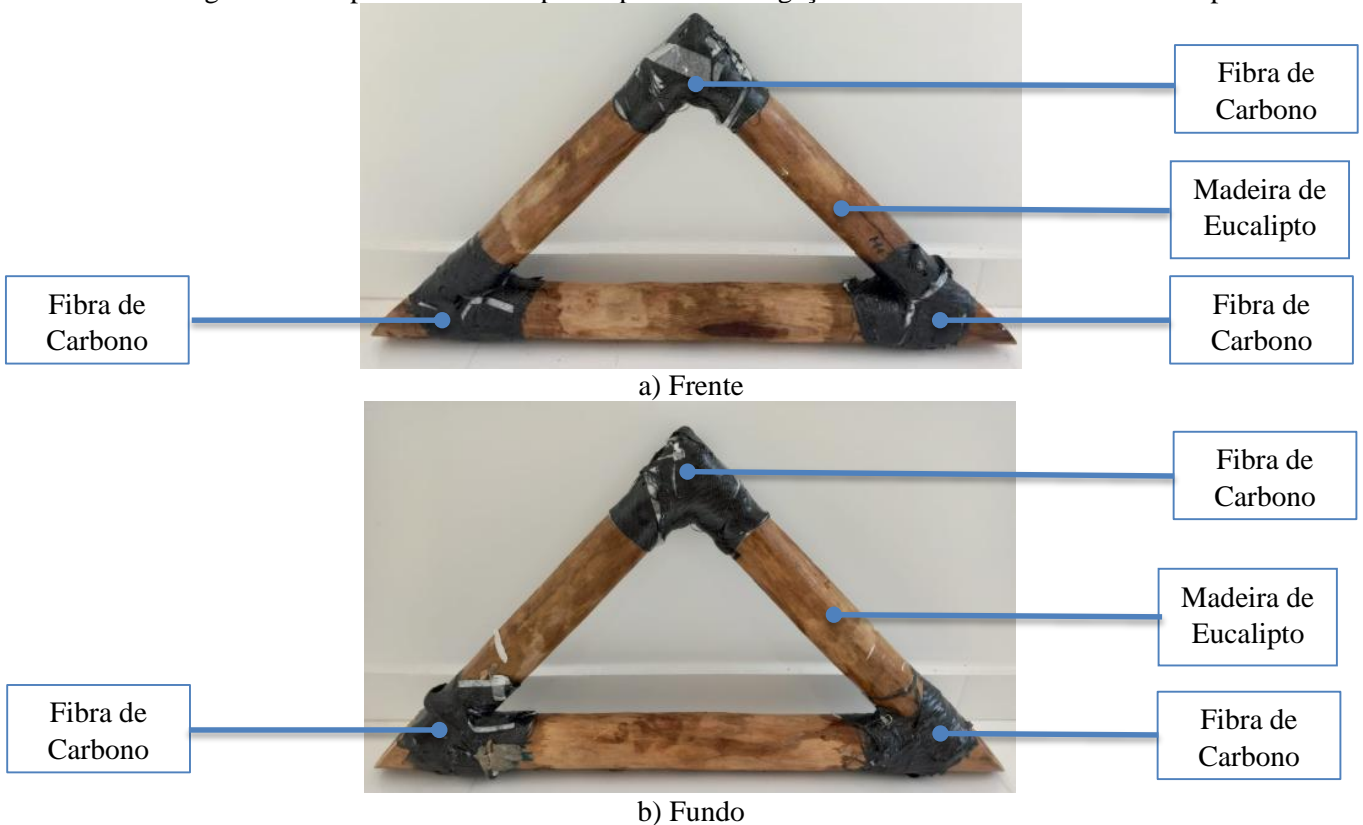
Fonte: Autora.

Figura 12 – Auxílio da fita crepe para a estabilidade do protótipo M1 durante a colagem dos nós inferiores



Fonte: Autora.

Figura 13 - Aspecto obtido do protótipo M1 com ligações de fibra de carbono e resina epóxi.

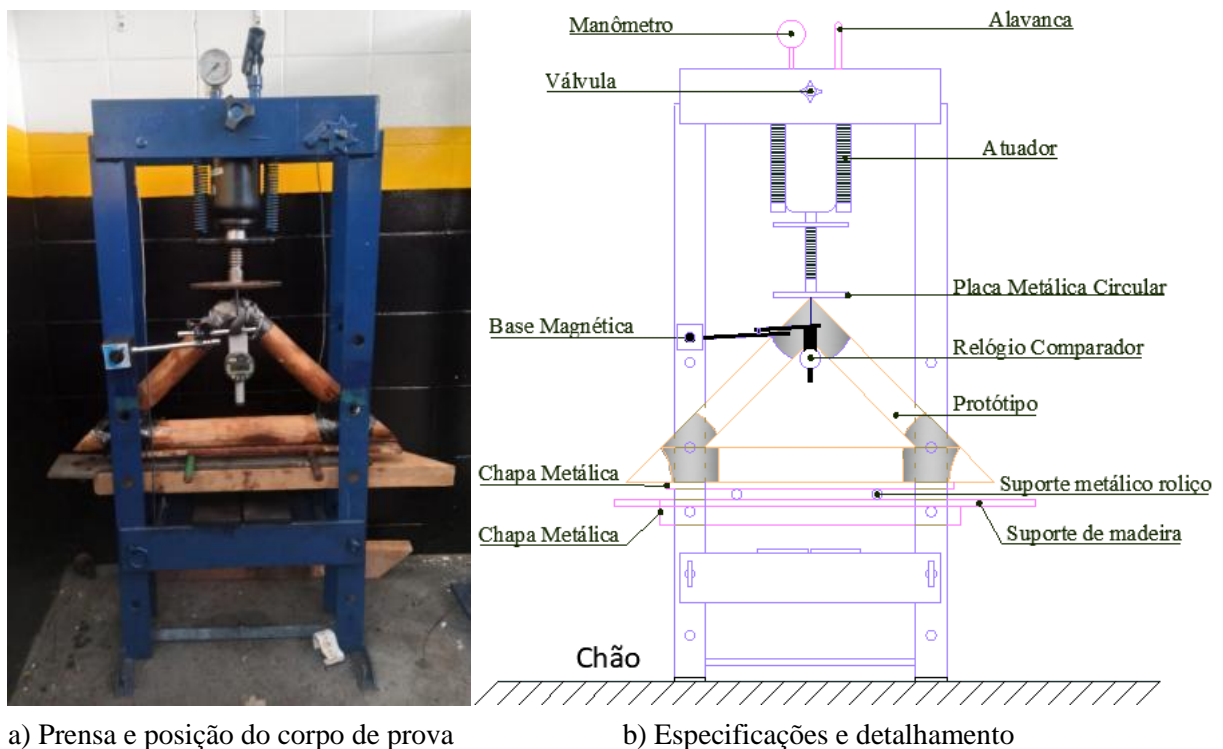


Fonte: Autora.

3.2.2 Primeiro Ensaio Experimental

No dia 30 de maio de 2023 aconteceu o primeiro ensaio experimental. Foi utilizada uma prensa hidráulica de acionamento manual. O protótipo de madeira M1 foi posicionado de forma a alcançar a altura necessária para que o atuador da prensa pudesse agir. Duas chapas metálicas distribuíam as tensões no contato da madeira com peças de maneira a fim de evitar a plastificação local da madeira. Dois roletes metálicos maciços, simulavam apoios móveis, permitindo o deslocamento horizontal do protótipo, conforme mostra a Figura 14.

Figura 14 - Ensaio da estrutura triangular M1 de madeira com a fibra de carbono.



a) Prensa e posição do corpo de prova

Fonte: Autora.

b) Especificações e detalhamento

Este ensaio foi de natureza prospectiva, por ser um primeiro ensaio, por isso ocorreu o deslocamento do apoio para fora dos nós durante a aplicação da carga, o que pode ter influenciado nos resultados. Mesmo assim, os resultados foram aproveitados, pois ficaram próximos de um dos ensaios complementares, que foi realizado com o apoio nos nós e com suportes que evitaram o tombamento.

Foram anotados os deslocamentos apresentados pelo nó 1 (superior) do corpo de prova para cada valor de força aplicada. O ensaio aconteceu em duas etapas. A primeira consistiu na aplicação da força em intervalos de 4,90 kN (≈ 5 kN) até o máximo de 29,42 kN (≈ 30 kN), quando foram registrados os primeiros sons característicos de ruptura. Após isso, o corpo de

prova foi retirado da prensa para análise e inspeção, sendo verificado que ainda estava em condições de carregamento. Em seguida, foi realizada a segunda etapa com a aplicação da força até 39,23 kN (≈ 40 kN), pois a estrutura não suportava mais pressão.

3.2.2.1 Análises após o Primeiro Ensaio Experimental

O estado do corpo de prova M1 após a segunda etapa ainda conservava sua geometria original, como pode ser visto na Figura 15. As peças de madeira ainda estavam bastante preservadas. A fibra de carbono, entretanto, apresentava deformações significativas, em especial nos Nós 1 e 3. Isto evidencia restrições diferentes impostas pela fibra de carbono comparativamente entre os nós inferiores e o nó superior. É importante registrar que devido aos aspectos construtivos, próprios de sistemas reais, é possível ter havido alguma excentricidade na aplicação da força no nó superior, assim como terem sido produzidos desvios laterais no plano da treliça dado a movimentação percebida durante a aplicação do carregamento.

Figura 15 - Corpo de prova após ensaio experimental.



Fonte: Autora.

3.2.3 Ensaio Experimentais Complementares

Após a realização do primeiro ensaio experimental, foram realizados os ensaios experimentais dos protótipos M2, M3 e M4 com o objetivo de obter uma amostra de dados mais significativa.

No dia 24 de outubro de 2023, aconteceu a montagem dos nós superiores dos protótipos, na região de Salvador próxima ao Aeroporto. As confecções dos nós inferiores aconteceram no dia 06 de novembro de 2023. A montagem dos protótipos M2, M3 e M4 aconteceu seguindo o mesmo passo a passo do primeiro protótipo M1 construído para o ensaio preliminar, com as mesmas dimensões. Houve poucas diferenças no processo construtivo, como o uso da régua, ao

invés da trena, para medir o tecido da fibra de carbono. A Figura 16 demonstra os materiais utilizados na confecção dos três protótipos complementares.

Figura 16 - Materiais para a confecção dos protótipos triangulares complementares.



Fonte: Autora.

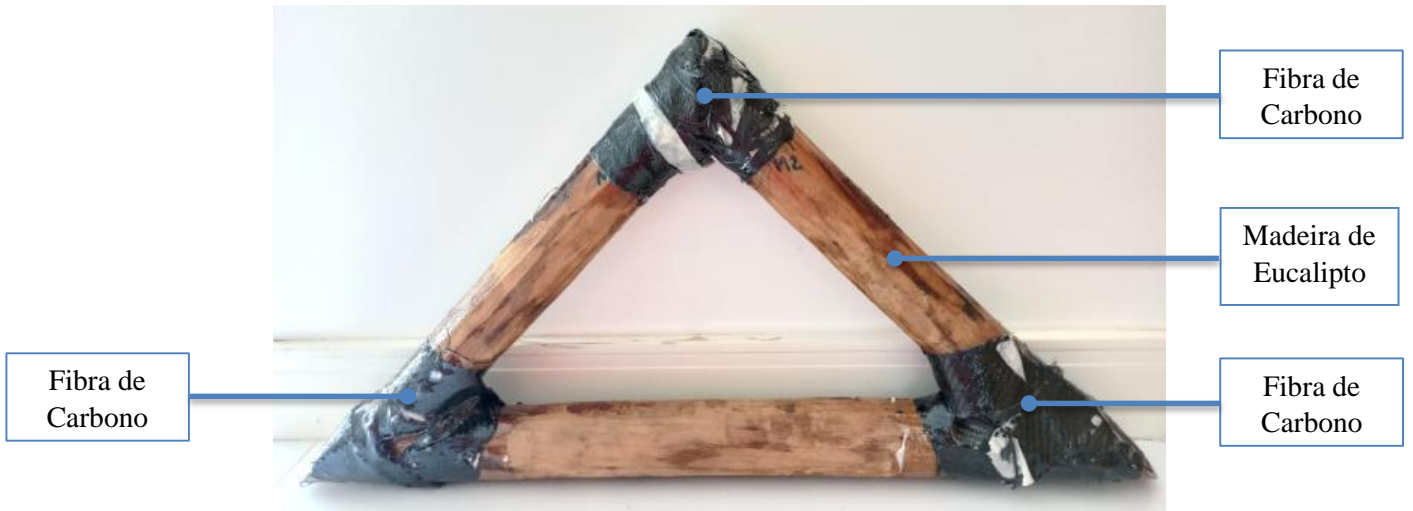
Os corpos de prova tiveram cura superior a 7 dias, respeitando a cura total estabelecida pelo fabricante da resina epóxi. A Figura 17, a

Figura 18 e a Figura 19 apresentam a vista frontal e de fundo dos protótipos M2, M3 e M4, respectivamente, já curados um dia antes dos ensaios. É importante ressaltar que, durante o ensaio optou-se por colocar na prensa o corpo de prova M2 com o fundo virado para frente, pois a colagem da fibra aparentemente não estava tão eficiente na parte de trás, então era importante analisar o comportamento da fibra nesse nó, devido essa observação.

Figura 17 - Aspecto obtido do protótipo M2 com ligações de fibra de carbono e resina epóxi.



a) Frente



b) Fundo

Fonte: Autora.

Figura 18 - Aspecto obtido do protótipo M3 com ligações de fibra de carbono e resina epóxi.



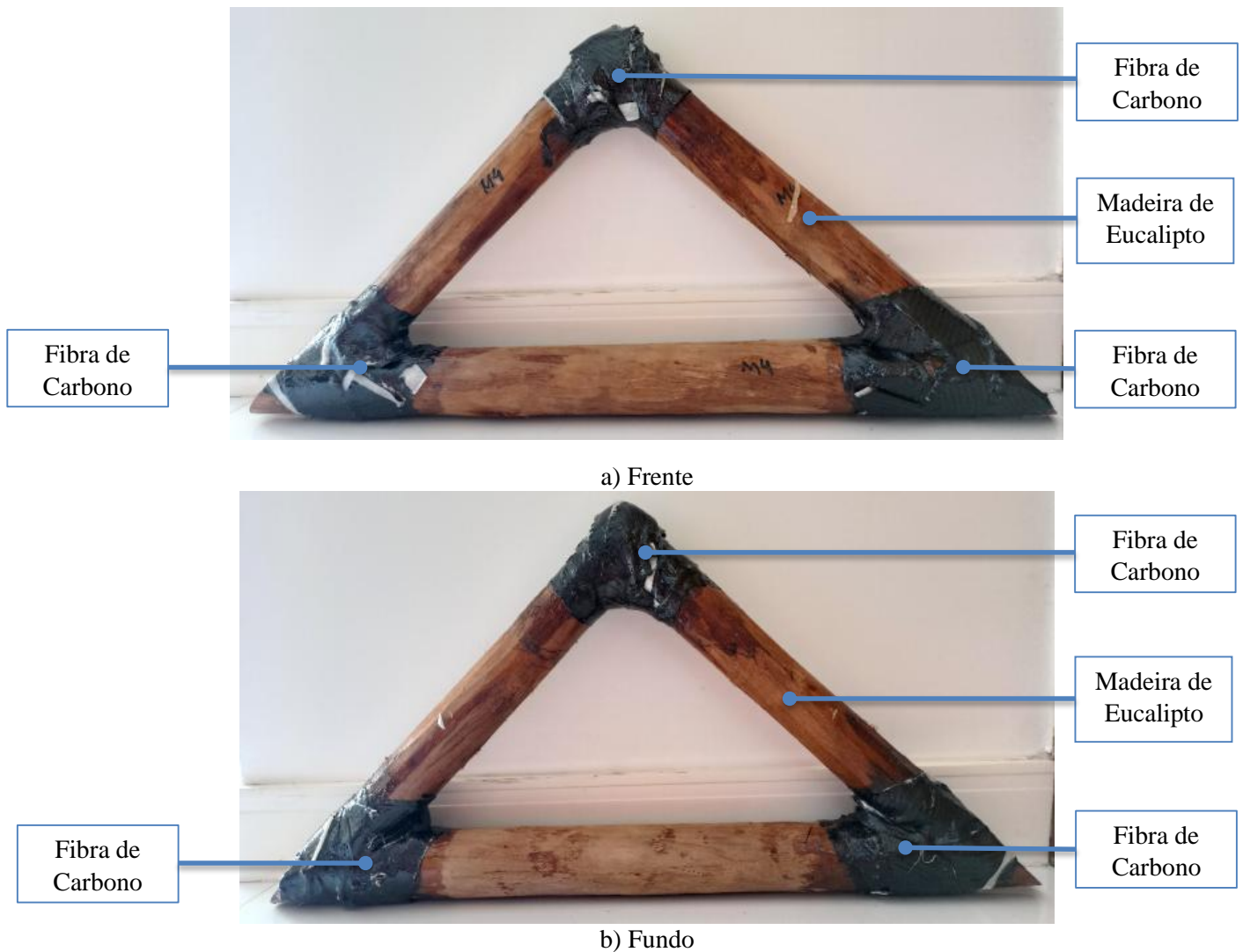
a) Frente



b) Fundo

Fonte: Autora.

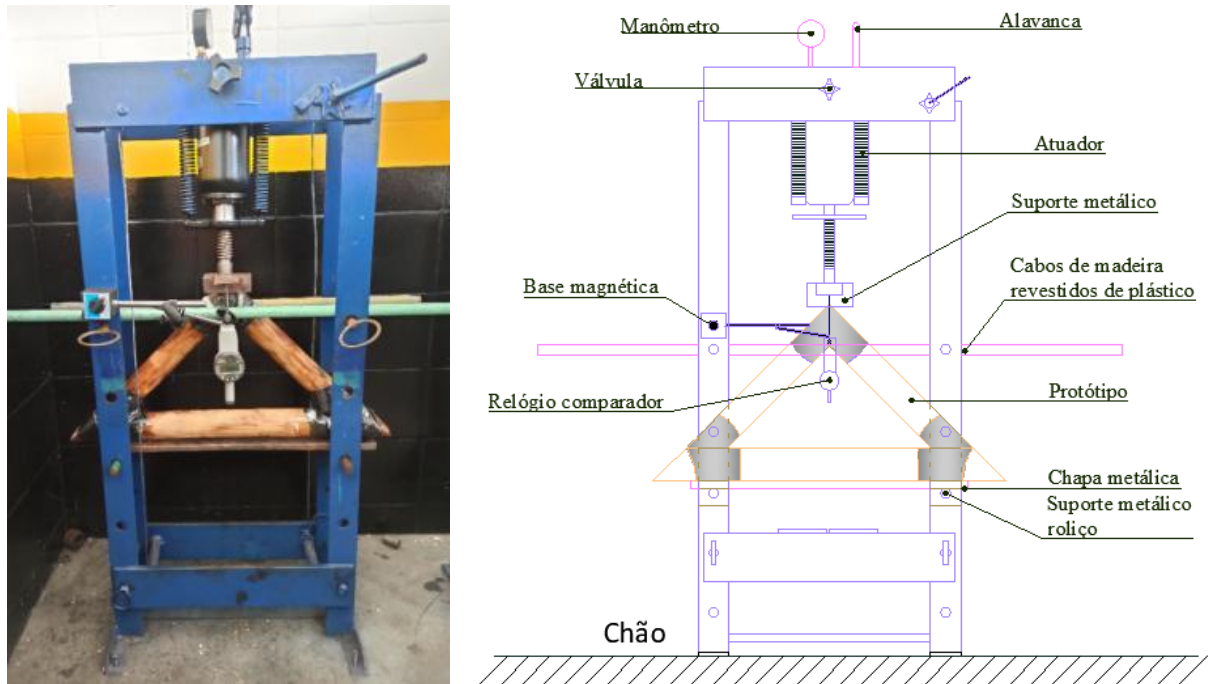
Figura 19 - Aspecto obtido do protótipo M4 com ligações de fibra de carbono e resina epóxi.



Fonte: Autora.

Os ensaios dos protótipos complementares aconteceram no dia 16 de novembro de 2023, e. Algumas mudanças foram realizadas para melhorar a configuração do ensaio, conforme mostra a Figura 20, a fim de alcançar também uma maior segurança durante o experimento. Foram introduzidos elementos sem atrito para evitar o tombamento da estrutura, como cabos de madeira revestidos com plástico; a localização dos apoios móveis foi a mais próxima possível dos nós inferiores; foi confeccionado um suporte de aço em U, para o nó superior, com uma chapa soldada frontalmente, para melhor precisão dos dados coletados pelo relógio comparador. Sendo assim, durante estes ensaios complementares não foi notado tombamento da estrutura.

Figura 20 - Estrutura triangular na prensa hidráulica demonstrando a nova configuração dos ensaios complementares.



a) Prensa e posição do corpo de prova
Fonte: Autora.

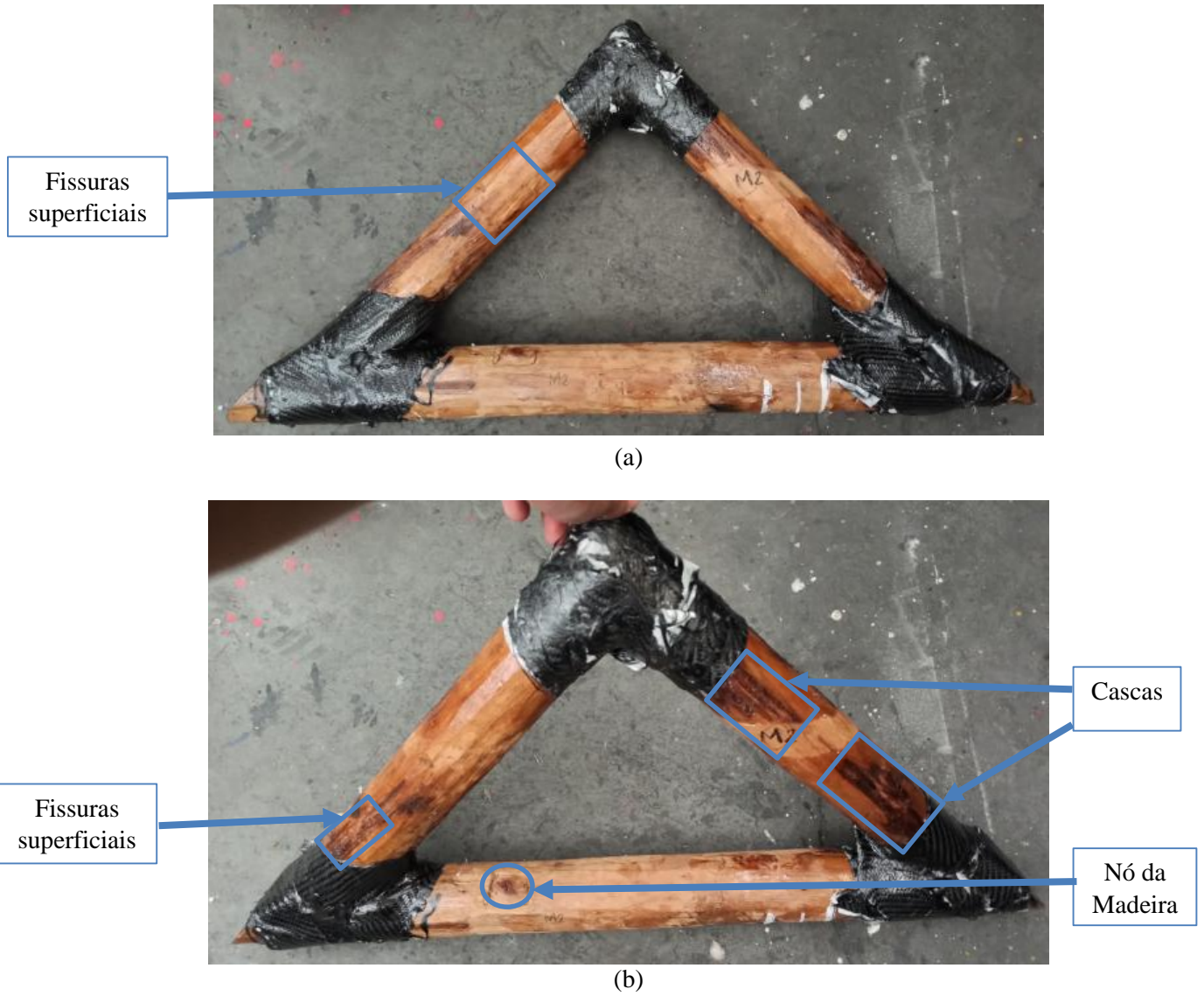
b) Especificações e detalhamento

Foram anotados os deslocamentos apresentados pelo nó 1 (superior) do corpo de prova para cada valor de força aplicada. O ensaio na aplicação da força em intervalos de 4,90 kN (\approx 5 kN) até o máximo de 29,42 kN (\approx 30 kN) ou 34,32 kN (\approx 35 kN), em uma etapa única, pois após os primeiros sons característicos de ruptura, a prensa não conseguia fazer uma pressão mais elevada, pelo contrário, aconteceu uma perda de pressão lentamente, demonstrando que o corpo de prova já havia atingido o máximo da sua eficiência. Então, após isso o corpo de prova era retirado da prensa.

3.2.3.1 Análises antes dos Ensaios Complementares

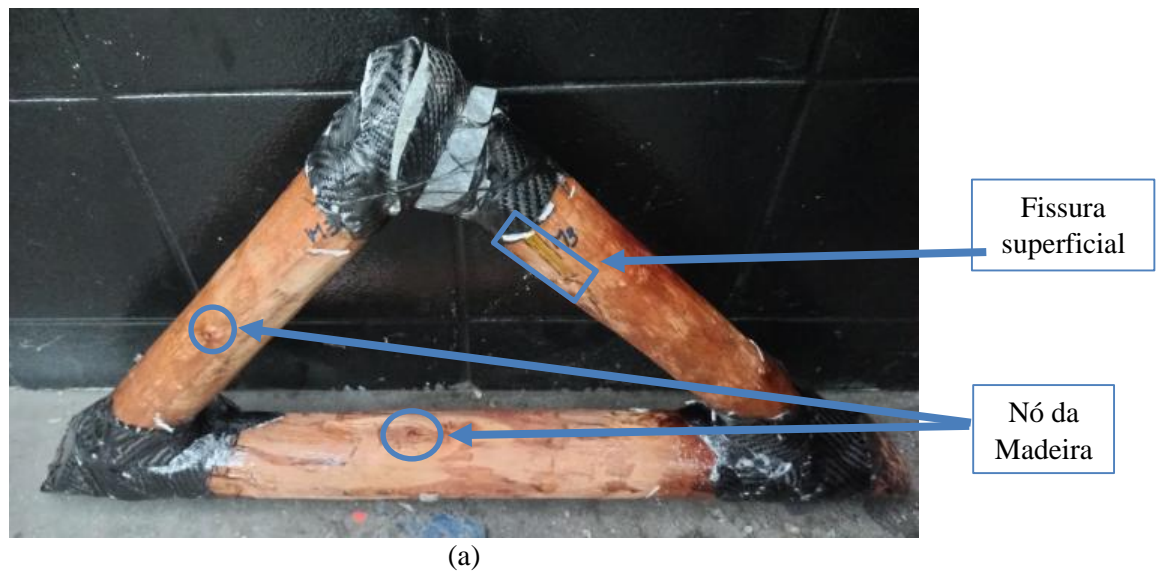
Os corpos de prova antes de serem ensaiados foram submetidos à inspeções, buscando observar os defeitos já existentes na madeira, para que não houvesse confusão, nem distorção nas análises após o ensaio, acusando fissuras, cascas e nós já existentes na madeira de possíveis consequências do ensaio após aplicação da carga. A Figura 21 (a) e (b), Figura 22 (a) e (b) e Figura 23 (a), (b) e (c), mostram o estado dos corpos de prova M2, M3 e M4, respectivamente, antes dos ensaios.

Figura 21 - Corpo de prova M2 antes do ensaio experimental.



Fonte: Autora.

Figura 22 - Corpo de prova M3 antes do ensaio experimental.



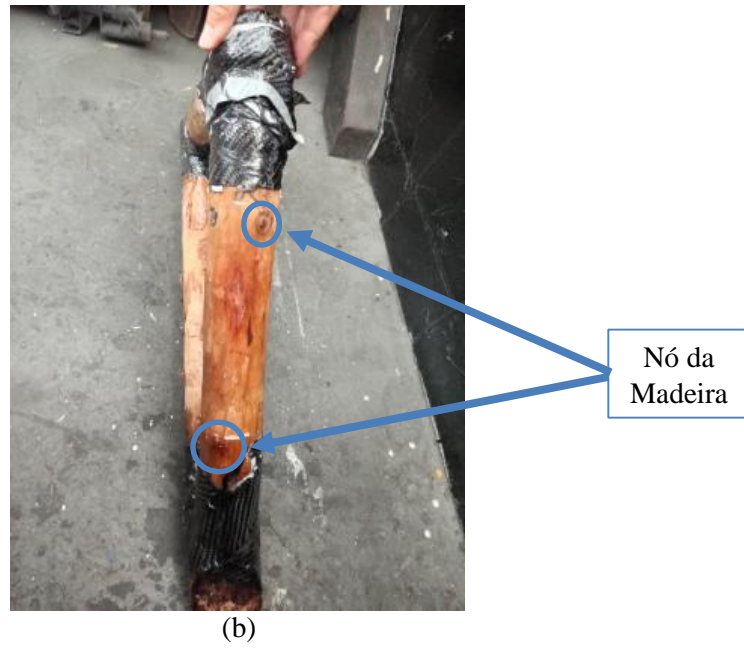
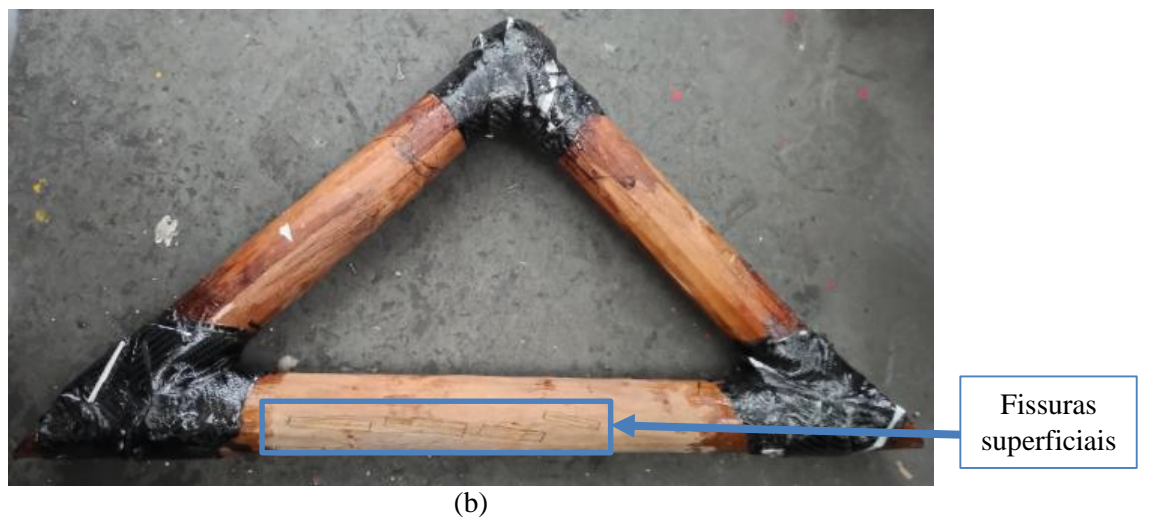
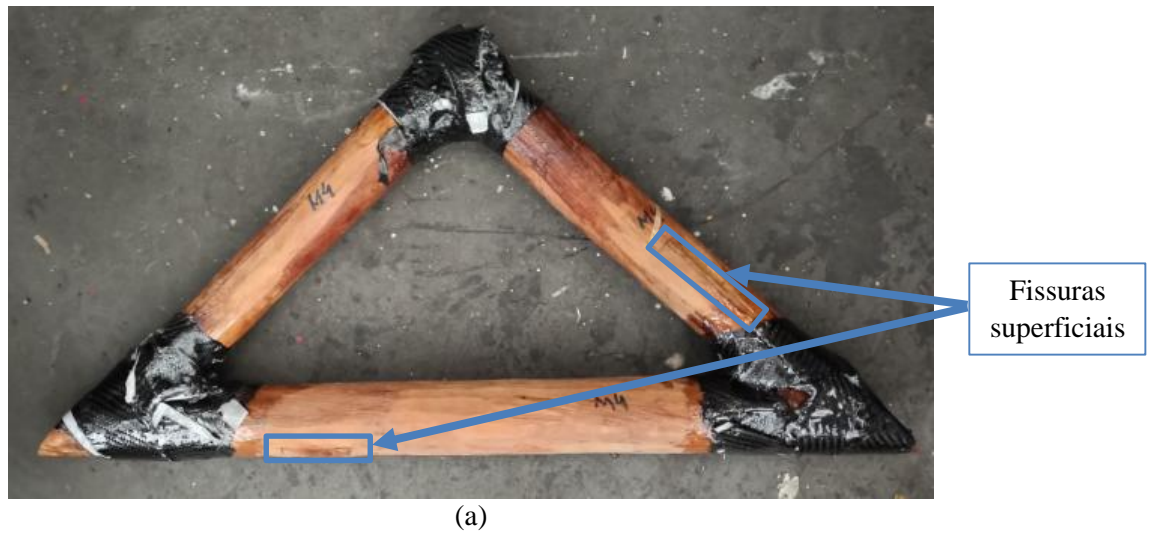
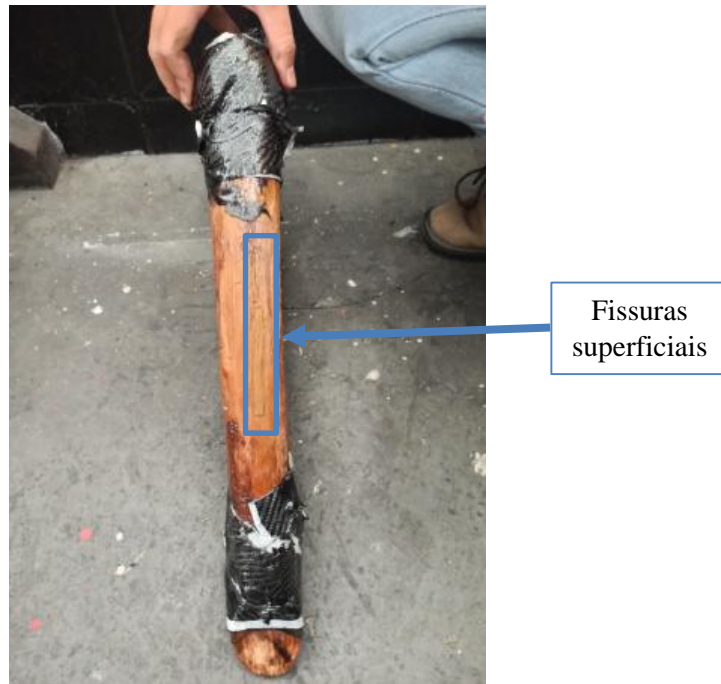


Figura 23 - Corpo de prova M4 antes do ensaio experimental.





(c)

3.2.3.2 Análises após os Ensaios Complementares

As peças de madeira ainda estavam bastante preservadas nos corpos de prova M2, M3 e M4 após os ensaios, como pôde ser visto nas Figura 24, Figura 25 e Figura 26.

No corpo de prova M2 foi notada uma acomodação da fibra, juntamente com um pouco de deformação e descolamento da fibra somente no Nó inferior 2, de acordo com a Figura 24, pois no ensaio, a frente e o fundo foram invertidos, devido a necessidade de observação do desempenho deste nó.

Figura 24 - Corpo de prova M2 após ensaio experimental.



a) Vista que foi ensaiada de frente



b) Vista que ficou no fundo

Fonte: Autora.

Os aspectos construtivos podem ter influenciado em uma colagem com falhas nesse nó de M2, neste protótipo, entretanto, mesmo assim, o coeficiente de rigidez da estrutura foi bem próximo do coeficiente encontrado no protótipo M4, evidenciando assim, que mesmo com maiores imperfeições, a fibra deste nó resistiu bem à carga. Não houve ruptura da fibra em nenhum nó. O som de ruptura da madeira ocorreu após 29,42 kN (≈ 30 kN) indo para 34,32 kN (35 kN).

No corpo de prova M3 também foi notada uma acomodação da fibra no Nó inferior 2, de acordo com a Figura 25. Os deslocamentos da estrutura se assemelharam muito com os da segunda etapa do protótipo M1, alcançando um coeficiente de rigidez mais próximo do encontrado para a segunda etapa do ensaio do corpo de prova M1. Não houve ruptura da fibra em nenhum nó. O som de ruptura da madeira ocorreu entre 34,32 kN (≈ 35 kN) e 39,23 kN (≈ 40 kN). No corpo de prova M4 o som de ruptura da madeira ocorreu após 29,42 kN (≈ 30 kN) indo para 34,32 kN (≈ 35 kN).

Figura 25 - Corpo de prova M3 após ensaio experimental.



Fonte: Autora.

Foi observada uma acomodação das fibras nos Nós inferiores de M3, mas nenhuma deformação significativa. Observou-se a preservação da estrutura, mesmo após a carga. O coeficiente de rigidez encontrado foi semelhante ao do corpo de prova M2.

Figura 26 - Corpo de prova M4 após ensaio experimental.



Fonte: Autora.

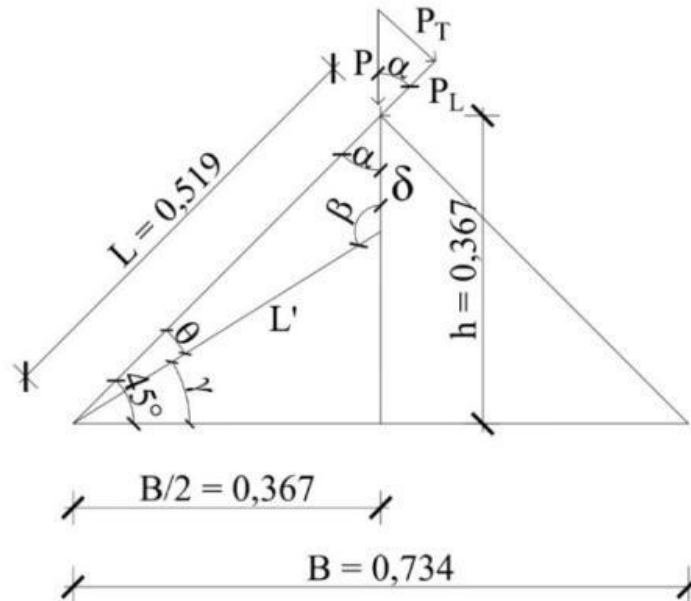
3.2.4 Análise dos Resultados

A partir dos resultados, pode-se extrair o parâmetro de rigidez rotacional ($K\theta$) da ligação da estrutura, que é dada pela Equação 1:

$$K\theta = \frac{\Delta M}{\Delta \theta}, \quad \text{Equação 1}$$

e pode-se obter o coeficiente de rigidez analisando as relações trigonométricas presentes durante a aplicação da força no protótipo. A Figura 27 representa os elementos envolvidos nessas relações, onde L é o comprimento inicial de um dos lados do triângulo, L' é o novo comprimento após o deslocamento, h é a altura inicial do triângulo, δ representa o deslocamento para cada carga aplicada, B é a base, $B/2$ é a metade da base, γ é o novo ângulo formado entre a base e o novo comprimento e θ é o ângulo formado entre o comprimento inicial e o novo comprimento. Além disso, a Figura 27 mostra que para a decomposição da Força P (força aplicada durante o ensaio), têm-se P_T como componente em y , e P_L componente em x , e α é o ângulo formado entre o comprimento inicial e a altura, oposto pelo vértice entre a força P e a sua decomposta em x (P_L).

Figura 27 - Representação das relações geométricas presentes durante a aplicação da carga no Protótipo (dimensões lineares em metros).



Fonte: Autora.

Dessa forma, com o objetivo de calcular a rigidez presente no Momento exercido no Nó 2, deve-se decompor a Força P no eixo y , a fim de encontrar a Força P_T , que está perpendicular ao comprimento L' . A multiplicação de P_T por L' resulta em um Momento para cada força aplicada. Pode-se calcular o novo comprimento L' a partir da lei dos cossenos, conforme demonstra a Equação 2:

$$L'^2 = L^2 + \delta^2 - 2 \cdot L \cdot \delta \cdot \cos(\alpha), \quad \text{Equação 2}$$

pois, como os valores de L e δ são conhecidos, basta substituir também o valor de α na Equação 2, que equivale a 45° , ou seja, $0,785398$ rad.

Em seguida, pode-se encontrar θ a partir da sua tangente, sabendo que $\theta = 45^\circ - \gamma$. Isso é demonstrado na Equação 3:

$$\text{tg } \theta = \text{tg } (45^\circ - \gamma), \quad \text{Equação 3}$$

e, a Equação 4 mostra a $\text{tg } \gamma$:

$$\text{tg } \gamma = \frac{h - \delta}{\frac{B}{2}}, \quad \text{Equação 4}$$

pela identidade trigonométrica, tem-se a Equação 5:

$$\operatorname{tg}(45^\circ - \gamma) = \frac{\operatorname{tg} 45^\circ - \operatorname{tg} \gamma}{1 + \operatorname{tg} 45^\circ \operatorname{tg} \gamma}, \quad \text{Equação 5}$$

assim:

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{1 - \operatorname{tg} \gamma}{1 + \operatorname{tg} \gamma}, \quad \text{Equação 6}$$

substituindo a Equação 4 na Equação 6, chega-se à:

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{1 - \left(\frac{h - \delta}{\frac{B}{2}}\right)}{1 + \left(\frac{h - \delta}{\frac{B}{2}}\right)}, \quad \text{Equação 7}$$

simplificando a Equação 7:

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{\frac{B}{2} - h + \delta}{\frac{B}{2} + h - \delta}, \quad \text{Equação 8}$$

e multiplicando a Equação 8 por -1, encontra-se a Equação 9:

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{h - \delta - \frac{B}{2}}{\delta - h - \frac{B}{2}} \quad \text{Equação 9}$$

e, encontra-se θ , conforme demonstra a Equação 10:

$$\theta = \operatorname{arctg} \left(\frac{h - \delta - \frac{B}{2}}{\delta - h - \frac{B}{2}} \right). \quad \text{Equação 10}$$

3.2.4.1 Resultados do Primeiro Ensaio

A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos para os deslocamentos apresentados pelo nó 1 (superior) nas duas etapas do ensaio.

Tabela 6 - Deslocamentos do nó superior.

| Etapa 1 | | Etapa 2 | |
|------------------------|-------------------|------------------------|-------------------|
| Força (kN) | Deslocamento (mm) | Força (kN) | Deslocamento (mm) |
| 4,90 (≈ 5) | 9,303 | 4,90 (≈ 5) | 4,600 |
| 9,81 (≈ 10) | 12,148 | 9,81 (≈ 10) | 6,548 |
| 14,71 (≈ 15) | 15,895 | 14,71 (≈ 15) | 9,123 |
| 19,61 (≈ 20) | 18,170 | 19,61 (≈ 20) | 11,237 |
| 24,52 (≈ 25) | 20,804 | 24,52 (≈ 25) | 13,733 |
| 29,42 (≈ 30) | 25,830 | 29,42 (≈ 30) | 15,294 |
| - | - | 34,32 (≈ 35) | 19,440 |
| - | - | 39,23 (≈ 40) | 23,290 |

Fonte: Autora.

E, assim, os valores para as duas etapas do ensaio experimental foram calculados e estão demonstrados na Tabela 7 e na Tabela 8.

Tabela 7 - Valores calculados para a Etapa 1.

| θ (rad) | θ (graus) | L' | P_T | M (Tf.m) | M (kN.m) | $K\theta$ |
|----------------------------------|------------------|----------|----------|------------|-------------|-------------|
| 0,012836 | 0,735470632 | 0,512464 | 0,353553 | 0,181183 | 1,611887721 | 14,11483065 |
| 0,016827 | 0,964135907 | 0,510482 | 0,707107 | 0,360966 | 3,211309319 | 21,45112644 |
| 0,022131 | 1,268014742 | 0,507885 | 1,060660 | 0,538693 | 4,792454394 | 24,34108353 |
| 0,025378 | 1,454033518 | 0,506315 | 1,414214 | 0,716037 | 6,370186212 | 28,2152518 |
| 0,029162 | 1,670849929 | 0,504504 | 1,767767 | 0,891845 | 7,934250766 | 30,58262071 |
| 0,036458 | 2,088897034 | 0,501068 | 2,121320 | 1,062927 | 9,456266553 | 29,15472122 |
| $K\theta$ (Tf.m/rad) = 37,327606 | | | | | | |
| $K\theta$ (kN.m/rad) = 332,08293 | | | | | | |

Fonte: Autora.

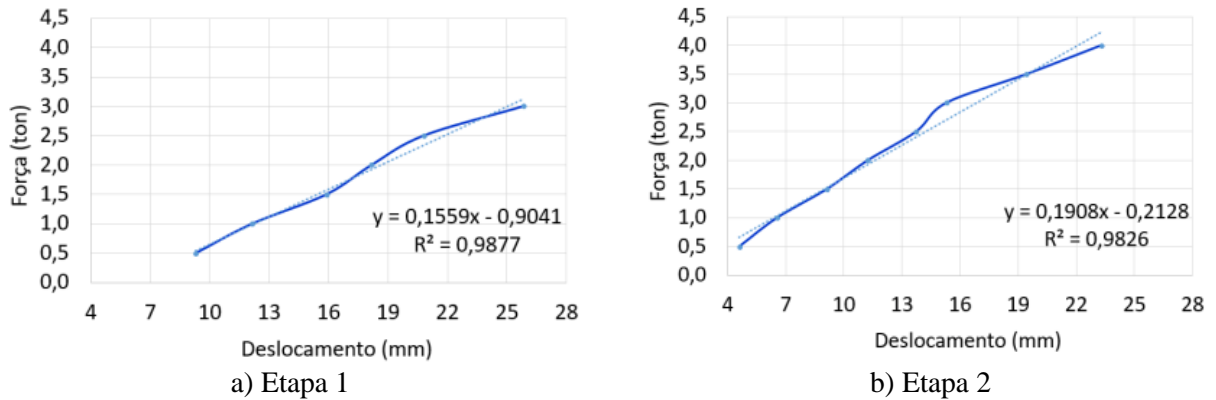
Tabela 8 - Valores calculados para a Etapa 2.

| θ (rad) | θ (graus) | L' | P_T | M (Tf.m) | M (kN.m) | $K\theta$ |
|----------------------------------|------------------|----------|----------|------------|-------------|-------------|
| 0,006306 | 0,361334099 | 0,515758 | 0,353553 | 0,182348 | 1,622247172 | 28,91440759 |
| 0,009001 | 0,515721494 | 0,514391 | 0,707107 | 0,363729 | 3,235895776 | 40,40968952 |
| 0,012585 | 0,721062747 | 0,512590 | 1,060660 | 0,543683 | 4,836848821 | 43,20118658 |
| 0,015546 | 0,890721864 | 0,511116 | 1,414214 | 0,722827 | 6,430591051 | 46,49593651 |
| 0,019064 | 1,092299957 | 0,509382 | 1,767767 | 0,900468 | 8,010966353 | 47,23340035 |
| 0,021277 | 1,219065122 | 0,508301 | 2,121320 | 1,078268 | 9,592752983 | 50,67836276 |
| 0,027199 | 1,558378972 | 0,505441 | 2,474874 | 1,250902 | 11,12858009 | 45,99100467 |
| 0,032758 | 1,876913714 | 0,502801 | 2,828427 | 1,422137 | 12,65195853 | 43,41298744 |
| $K\theta$ (Tf.m/rad) = 46,869639 | | | | | | |
| $K\theta$ (kN.m/rad) = 416,97309 | | | | | | |

Fonte: Autora.

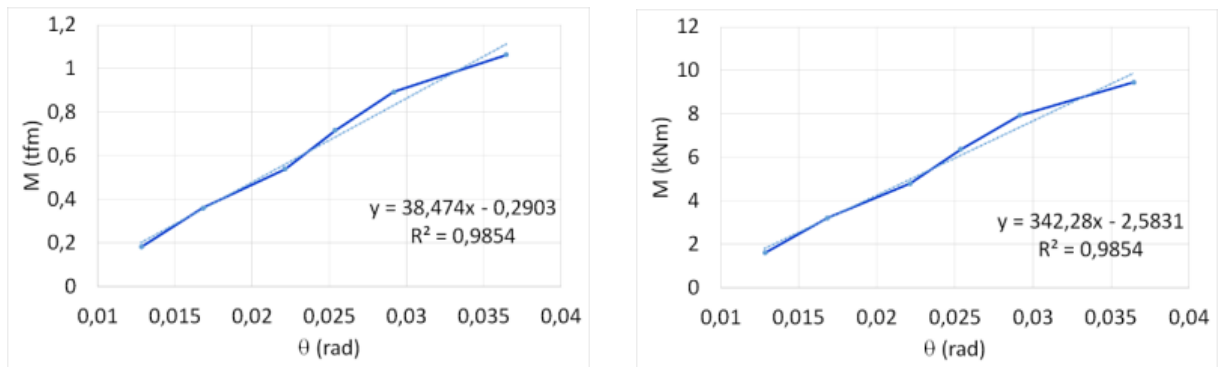
O gráfico da Figura 28 apresenta a relação força-deslocamento da ligação superior nas duas etapas do ensaio e o da Figura 29 e Figura 30 apresentam relações momento-ângulo de rotação das etapas 1 e 2.

Figura 28 - Relações força-deslocamento do Primeiro Ensaio.



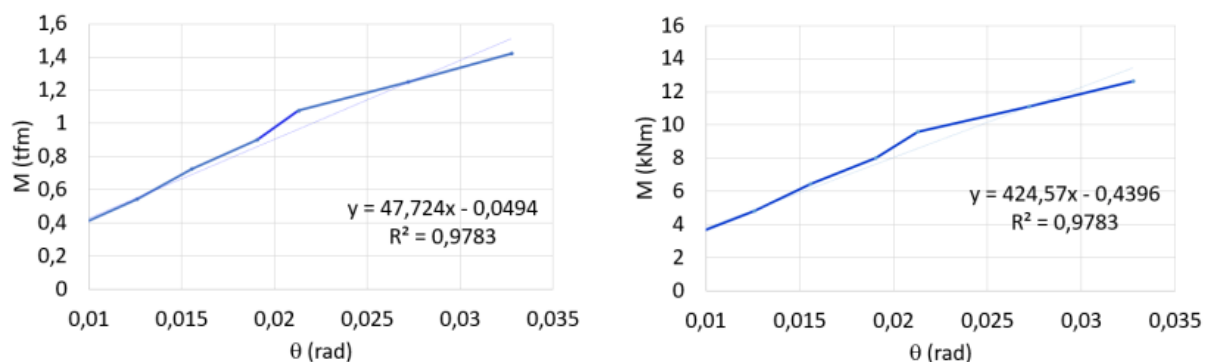
Fonte: Autora.

Figura 29 - Relações momento-ângulo de rotação da Etapa 1.



Fonte: Autora.

Figura 30 - Relações momento-ângulo de rotação da Etapa 2.



Fonte: Autora.

Os deslocamentos apresentados pela estrutura na segunda etapa do ensaio foram inferiores aos da primeira, denotando haver um aumento da rigidez da ligação, seguramente, favorecida pela acomodação da fibra de carbono, com potencial plastificação na região dos nós

inferiores. O aumento da rigidez foi da ordem de 18%, podendo ser comprovado pelo coeficiente angular da equação da linha de tendência, nos gráficos da Figura 29 e da Figura 30. Observando, igualmente, a linha de tendência, é possível verificar a existência de um comportamento linear para as relações força-deslocamento em ambas as etapas do ensaio.

3.2.4.2 Resultados dos ensaios Complementares

A Tabela 9 apresenta os resultados dos ensaios dos corpos de prova M2, M3 e M4.

Tabela 9 - Deslocamentos dos Nós superiores de M2, M3 e M4.

| Corpo de Prova | M2 | M3 | M4 |
|------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Força (kN) | Deslocamento (mm) | Deslocamento (mm) | Deslocamento (mm) |
| 4,90 (≈ 5) | 5,668 | 4,204 | 1,313 |
| 9,81 (≈ 10) | 7,290 | 5,336 | 2,320 |
| 14,71 (≈ 15) | 8,986 | 7,348 | 4,589 |
| 19,61 (≈ 20) | 11,719 | 9,200 | 6,200 |
| 24,52 (≈ 25) | 12,647 | 11,365 | 7,974 |
| 29,42 (≈ 30) | 14,239 | 16,278 | 10,198 |
| 34,32 (≈ 35) | - | - | 11,409 |

Fonte: Autora.

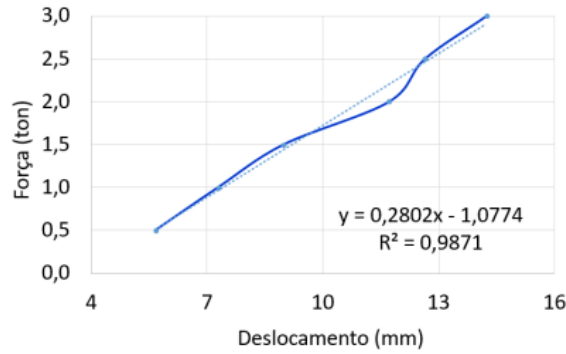
A partir dos resultados, pode-se extrair o parâmetro de rigidez rotacional ($K\theta$) da ligação da estrutura dos corpos de prova M2, M3 e M4, da mesma forma que foi calculada a rigidez equivalente à fibra de carbono do corpo de prova M1. A Tabela 10, a Tabela 11 e a Tabela 12 apresentam os resultados das rigidezes dos corpos de prova M2, M3 e M4, respectivamente. Os gráficos da Figura 31, Figura 33 e da Figura 35 apresentam a relação força-deslocamento da ligação superior nos ensaios e, já os da Figura 32, Figura 34 e Figura 36 apresentam as relações momento-ângulo de rotação.

Tabela 10 - Valores calculados para M2.

| θ (rad) | θ (graus) | L' | P_T | M (Tf.m) | M (kN.m) | $K\theta$ |
|----------------------------------|------------------|----------|----------|------------|-------------|-------------|
| 0,007782 | 0,445876225 | 0,515008 | 0,353553 | 0,182083 | 1,619888613 | 23,39790954 |
| 0,010031 | 0,574744014 | 0,513871 | 0,707107 | 0,363362 | 3,232626754 | 36,22324276 |
| 0,012394 | 0,710101479 | 0,512685 | 1,060660 | 0,543785 | 4,837751443 | 43,87623509 |
| 0,016224 | 0,929541729 | 0,510781 | 1,414214 | 0,722353 | 6,42637162 | 44,52492183 |
| 0,017531 | 1,0044257 | 0,510136 | 1,767767 | 0,901801 | 8,022820285 | 51,44171845 |
| 0,019780 | 1,133332036 | 0,509031 | 2,121320 | 1,079818 | 9,606539639 | 54,59036958 |
| $K\theta$ (Tf.m/rad) = 74,821454 | | | | | | |
| $K\theta$ (kN.m/rad) = 665,64481 | | | | | | |

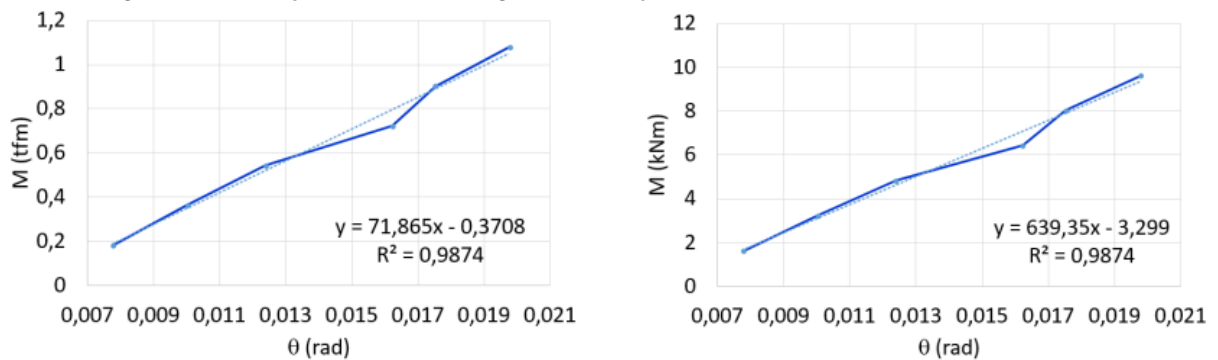
Fonte: Autora.

Figura 31 - Relações força-deslocamento de M2.



Fonte: Autora.

Figura 32 - Relações momento-ângulo de rotação de M2.



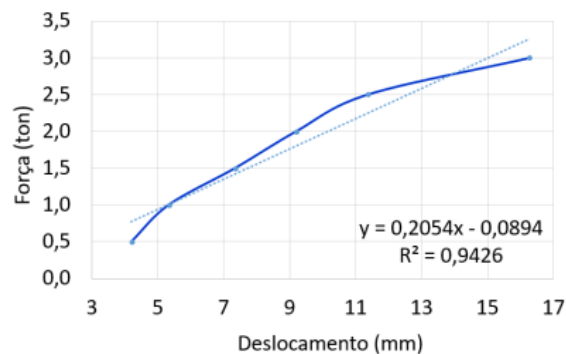
Fonte: Autora.

Tabela 11 - Valores calculados para M3.

| θ (rad) | θ (graus) | L' | P_T | M (Tf.m) | M (kN.m) | $K\theta$ |
|----------------------------------|------------------|----------|----------|------------|-------------|-------------|
| 0,00576 | 0,330049483 | 0,516036 | 0,353553 | 0,182446 | 1,62312259 | 31,67221853 |
| 0,007323 | 0,419568985 | 0,515241 | 0,707107 | 0,36433 | 3,241242839 | 49,75244338 |
| 0,010112 | 0,579362664 | 0,513830 | 1,060660 | 0,544999 | 4,848557053 | 53,897451 |
| 0,012692 | 0,727225255 | 0,512536 | 1,414214 | 0,724835 | 6,448455448 | 57,10747673 |
| 0,015726 | 0,901025905 | 0,511027 | 1,767767 | 0,903377 | 8,036837813 | 57,44525312 |
| 0,022676 | 1,29925073 | 0,507620 | 2,121320 | 1,076825 | 9,579913563 | 47,4870118 |
| $K\theta$ (Tf.m/rad) = 52,872544 | | | | | | |
| $K\theta$ (kN.m/rad) = 470,37758 | | | | | | |

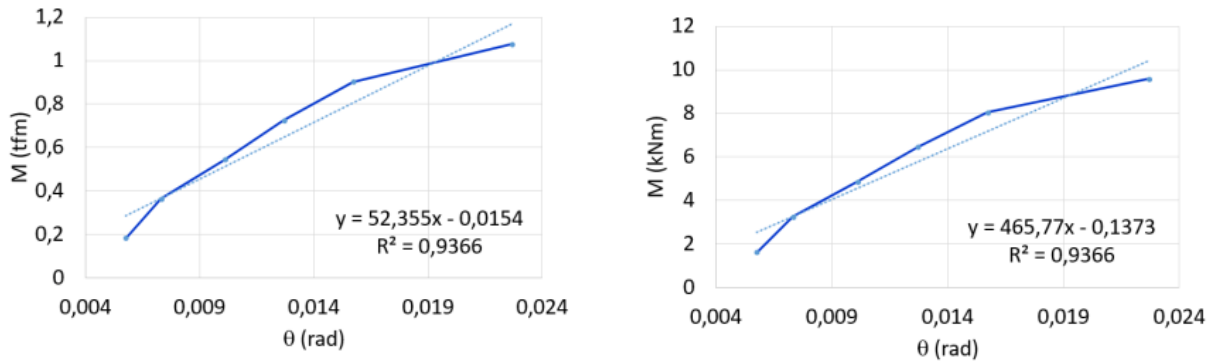
Fonte: Autora.

Figura 33 - Relações força-deslocamento de M3.



Fonte: Autora.

Figura 34 - Relações momento-ângulo de rotação de M3.



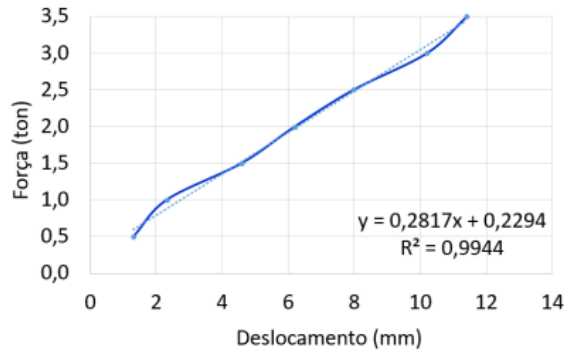
Fonte: Autora.

Tabela 12 - Valores calculados para M4.

| θ (rad) | θ (graus) | L' | P_T | M (Tf.m) | M (kN.m) | $K\theta$ |
|----------------------------------|------------------|----------|----------|------------|-------------|-------------|
| 0,001792 | 0,102675874 | 0,518072 | 0,353553 | 0,183166 | 1,629528179 | 102,2114826 |
| 0,003171 | 0,181671992 | 0,517362 | 0,707107 | 0,36583 | 3,254588127 | 115,3756813 |
| 0,006291 | 0,360464626 | 0,515765 | 1,060660 | 0,547052 | 4,866814447 | 86,95375824 |
| 0,008519 | 0,488080847 | 0,514635 | 1,414214 | 0,727803 | 6,474860275 | 85,43677689 |
| 0,010983 | 0,629258699 | 0,513392 | 1,767767 | 0,907558 | 8,074040766 | 82,63574183 |
| 0,014089 | 0,807214819 | 0,511840 | 2,121320 | 1,085776 | 9,659544722 | 77,06794029 |
| 0,015788 | 0,904568749 | 0,510996 | 2,474874 | 1,264651 | 11,25089879 | 80,10356763 |
| $K\theta$ (Tf.m/rad) = 77,272829 | | | | | | |
| $K\theta$ (kN.m/rad) = 687,45333 | | | | | | |

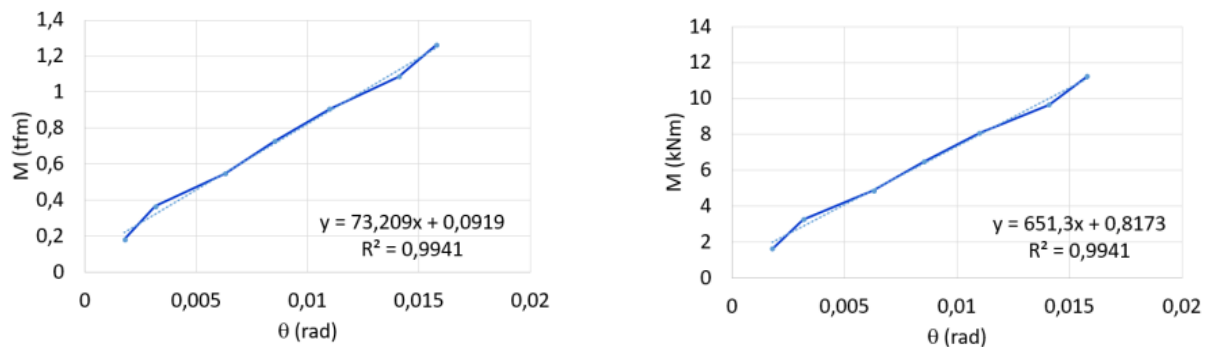
Fonte: Autora.

Figura 35 - Relações força-deslocamento de M4.



Fonte: Autora.

Figura 36 - Relações momento-ângulo de rotação de M4.

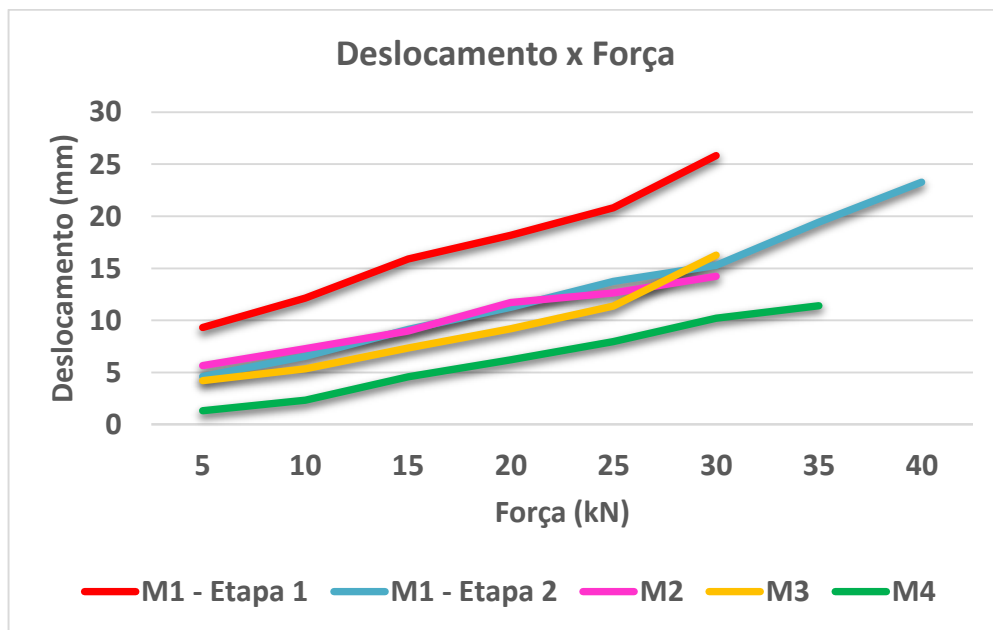


Fonte: Autora.

3.2.4.3 Tratamento dos Dados

Pode-se observar na Figura 37 um aumento da rigidez nos ensaios dos corpos de prova após a primeira etapa de M1 (primeiro corpo de prova a ser ensaiado), pois os deslocamentos tenderam a diminuir nos outros ensaios seguintes. Outro aspecto relevante é que a Etapa 2 do corpo de prova M1 apresentou um comportamento muito semelhante aos dos corpos de prova M2 e M3, com valores de deslocamento mais próximos dos encontrados nestes ensaios complementares, onde os corpos de prova alcançaram uma rigidez maior. Nota-se também que o melhor desempenho foi alcançado no corpo de prova M4, entretanto o valor de rigidez alcançado por este protótipo foi muito próximo ao de M3, mesmo com M3 alcançando deslocamentos maiores.

Figura 37 – Gráfico Deslocamento x Força dos Protótipos.



Fonte: Autora.

Assim, a fim de não desprezar os valores da Etapa 2 do primeiro ensaio, pois observou-se a relevância destes, optou-se por considerar os valores das duas etapas do primeiro ensaio, obtendo uma média entre as duas etapas. A Tabela 13 mostra os valores da rigidez da ligação para cada etapa do primeiro ensaio.

Tabela 13 - Valores de rigidez para cada etapa do primeiro ensaio.

| Etapa 1 | Etapa 2 |
|--|--|
| $K\theta = 332,08293 \text{ kN.m/rad}$ | $K\theta = 416,97309 \text{ kN.m/rad}$ |

Fonte: Autora.

Dessa forma, o valor médio obtido no ensaio do corpo de prova M1 foi encontrado com a Equação 11:

$$K\theta = \frac{332,08293+416,97309}{2} = 374,52801 \text{ kN.m/rad} \quad \text{Equação 11}$$

Assim, a fim de encontrar um único valor de rigidez para adoção na simulação computacional, será realizada uma média desses valores encontrados nos ensaios experimentais. A Tabela 14 mostra então o valor de rigidez encontrada em cada corpo de prova ensaiado, juntamente com o valor médio encontrado no resultado por todos os ensaios. Optou-se por este tratamento de dados devido à necessidade de considerar todos os resultados encontrados, e por ser uma medida de tendência central, tendo em vista que as montagens de protótipos e ensaios experimentais estão sujeitos a desvios, oriundos de aspectos construtivos ou intrínsecos de ensaios experimentais, que podem acabar interferindo em todos os resultados, apesar dos devidos cuidados.

Tabela 14 - Valores de rigidez da ligação para cada ensaio em kN.m/rad.

| M1 | M2 | M3 | M4 |
|---------------------|-----------|-----------|-----------|
| 374,52801 | 665,64481 | 470,37758 | 687,45333 |
| Média = 549,5009325 | | | |

Fonte: Autora.

O valor da Média se aproxima muito do valor da Mediana, que excluiria o maior e o menor valor do conjunto de dados e elegeria, dentro de uma média dos valores intermediários, um único valor; este fato comprova que o valor adotado é representativo dentro do conjunto de dados obtidos, não desprezando nenhum resultado obtido.

4 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

O físico e cientista Robert Hooke observou analisando as deformações de alguns corpos sólidos, a existência de deformações com características lineares e elásticas. A Lei de Hooke, demonstra a relação diretamente proporcional entre a deformação de um objeto e a força nele aplicada.

Assim sendo, é possível fazer uma associação direta dessa propriedade com o comportamento apresentado pelo protótipo quando era aplicada uma força. A estrutura, após o uso da técnica de ligação com fibra de carbono ganhou uma rigidez, que pode ser representada pelo [K], coeficiente de rigidez obtido por meio do experimento realizado, ou seja, a rigidez

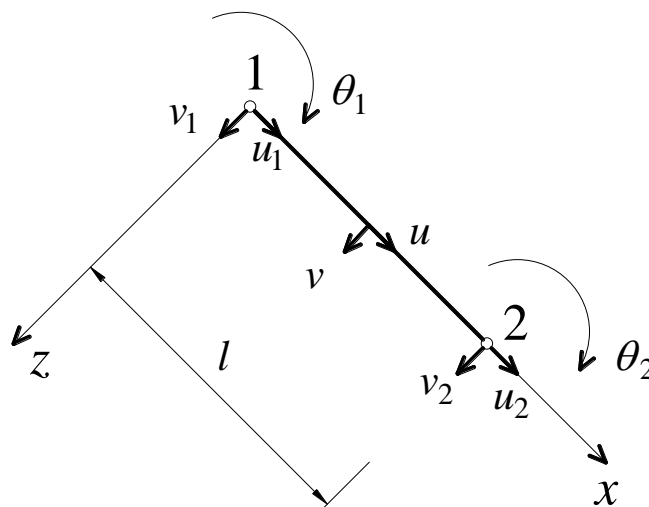
rotacional da ligação da estrutura. No modelo representativo do método dos elementos finitos, $[K]$ representa a matriz de rigidez global do sistema, que contém as informações sobre a rigidez de cada elemento e como eles estão conectados, $\{x\}$ representa o vetor de deslocamentos nodais, cada componente deste vetor representa o deslocamento em um nó específico do modelo, e $\{F\}$ o vetor de forças aplicadas ao sistema, cada componente deste vetor representa uma força aplicada em um nó específico do modelo, conforme apresenta a Equação 12:

$$\{F\} = [K] \cdot \{x\}. \quad \text{Equação 12}$$

Após a análise pelo MEF, a partir do conhecimento da rigidez da estrutura e das cargas que esta é submetida, será possível aplicar os critérios de deformação e os estados limites de projeto, para verificar, do ponto de vista estrutural, se as deformações e as tensões são aceitáveis ou não para a estrutura, considerando as propriedades dos materiais construtivos. Para a simulação computacional foi utilizado o programa SAP 2000.

De acordo com Wahrhaftig et al. (2021), na modelagem computacional via Método dos elementos finitos, cada elemento individual se comporta como elemento de viga, e cada um possui 6 graus de liberdade, conforme mostra a Figura 38. Pode-se observar na imagem os eixos x e z que representam os eixos de referência locais do elemento; l , u e v representam o comprimento do deslocamento e os deslocamento longitudinal e transversal do eixo; u_1 , v_1 , θ_1 , u_2 , v_2 , θ_2 representam os deslocamentos correspondentes ao movimento translacional e rotacional dos nós 1 e 2, respectivamente.

Figura 38 - Elemento de viga individual com 6 graus de liberdade.



Fonte: Wahrhaftig et al. (2021).

As Equações 13 e 14 mostram as matrizes de rigidez do elemento de viga representado.

$$[k_0] = E \begin{bmatrix} \frac{A}{l} & 0 & 0 & -\frac{A}{l} & 0 & 0 \\ & \frac{12I}{l^3} & \frac{6I}{l^2} & 0 & -\frac{12I}{l^3} & \frac{6I}{l^2} \\ & & \frac{4I}{l} & 0 & -\frac{6I}{l^2} & \frac{2I}{l} \\ & & & \frac{A}{l} & 0 & 0 \\ & \text{simétrico} & & & \frac{12I}{l^3} & -\frac{6I}{l^2} \\ & & & & & \frac{4I}{l} \end{bmatrix}, \quad \text{Equação 13}$$

e

$$[k_g] = \frac{P}{l} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & \frac{6}{5} & \frac{l}{10} & 0 & -\frac{6}{5} & \frac{l}{10} \\ & & \frac{2l^2}{15} & 0 & -\frac{l}{10} & -\frac{l^2}{30} \\ & & & 0 & 0 & 0 \\ & \text{simétrico} & & & \frac{6}{5} & -\frac{l}{10} \\ & & & & & \frac{2l^2}{15} \end{bmatrix} \quad \text{Equação 14}$$

O modelo adotado neste estudo foi desenvolvido no programa SAP 2000 (2023) e foi dimensionado de duas formas. No primeiro momento foi dimensionada uma treliça de acordo com o método tradicional de cálculo, com diâmetro de 21 cm, com seus elementos rotulados, e um apoio fixo na extremidade esquerda e móvel na direita, para que fosse possível observar as tensões que a estrutura suporta ao ser carregada nas condições habituais de construção.

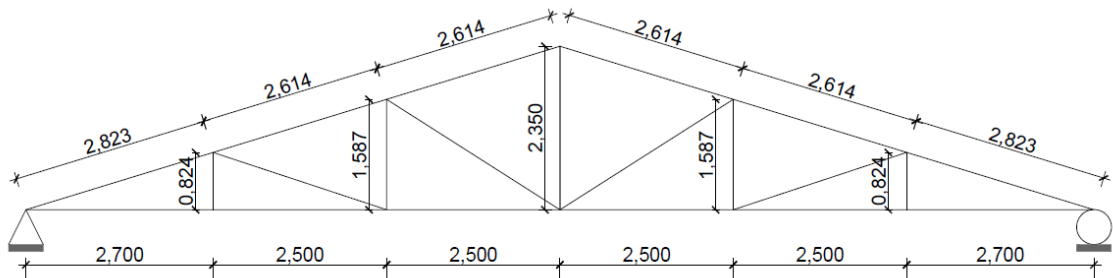
Em seguida, a mesma estrutura foi adotada para simulação computacional, com o acréscimo de uma rigidez de rotação, que representa a utilização da fibra de carbono nas ligações da estrutura. Isso permite a análise do comportamento da mesma estrutura biapoiada da mesma forma nos dois casos, verificando os deslocamentos e as diferentes tensões que a estrutura resiste em cada contexto, no método geralmente adotado como modelo de dimensionamento e na técnica da fibra de carbono e resina epóxi apresentada neste estudo.

A estrutura adotada para a modelagem foi a do estudo de Wahrhaftig e Carvalho (2016), uma treliça localizada na região central da estrutura de telhado, apresentada na Figura 39, com carga estimada de 200 kgf/m², um comprimento total de 15,40m, e as cargas aplicadas em cada

nó foram calculadas com o conhecimento da área de influência, representadas na Figura 40, e podem ser vistas na Tabela 15. Neste trabalho, as peças foram dimensionadas de forma circular, e o diâmetro adotado foi de 21 cm, para alcançar uma área próxima à realidade do projeto de Wahrhaftig e Carvalho (2016), que era de 225 cm².

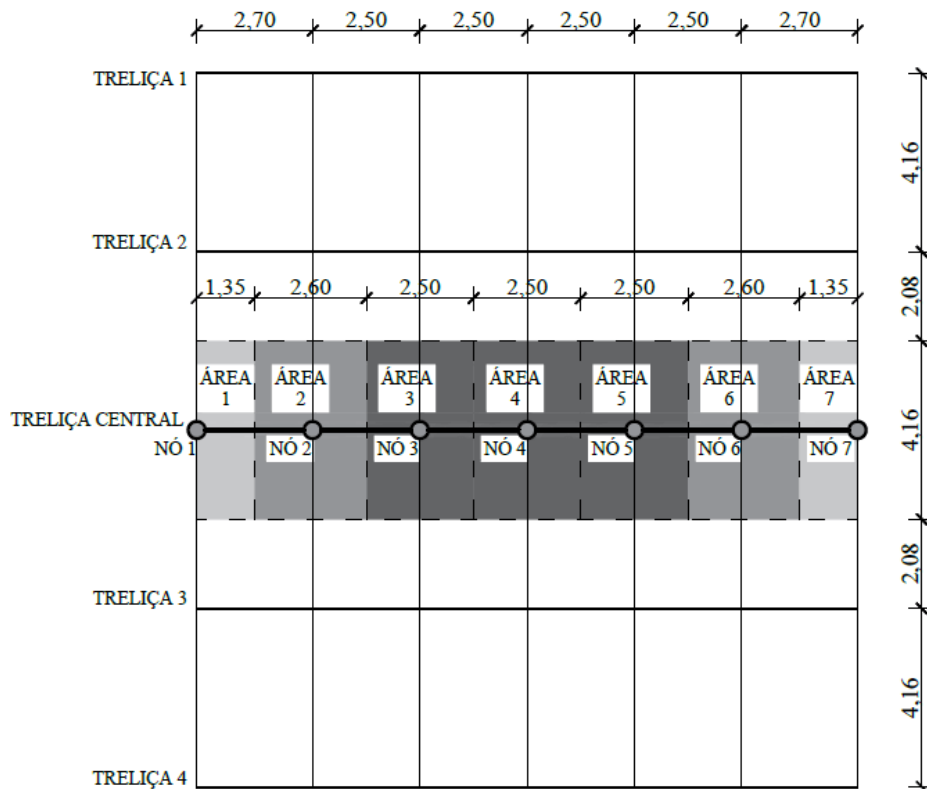
Dessa forma, é possível estabelecer a comparação do comportamento dos deslocamentos nodais da estrutura, com o método com componentes metálicos, e com a fibra de carbono, adotando a rigidez encontrada no elemento para cada etapa do ensaio experimental realizado.

Figura 39 - Treliça adotada para modelagem (medidas em metros).



Fonte: Autora.

Figura 40 - Área de influência para cada nó da treliça central (medidas em metros).



Fonte: Autora.

Tabela 15 - Cálculo da carga de cada nó da treliça central.

| Nó | Carga distribuída | Área (m ²) | Carga do Nó (N)* | Carga do Nó (kN) |
|----|------------------------|------------------------|------------------|------------------|
| 1 | 200 kgf/m ² | 5,616 | 11.018,592 | 11,019 |
| 2 | | 10,816 | 21.220,992 | 21,221 |
| 3 | | 10,400 | 20.404,8 | 20,405 |
| 4 | | 10,400 | 20.404,8 | 20,405 |
| 5 | | 10,400 | 20.404,8 | 20,405 |
| 6 | | 10,816 | 21.220,992 | 21,221 |
| 7 | | 5,616 | 11.018,592 | 11,019 |

* Foi adotado o valor de $g = 9,81\text{m/s}^2$.

Fonte: Autora.

A Tabela 16 apresenta os valores característicos da espécie da madeira de Eucalipto cloeziana segundo a NBR 7190 (ABNT, 1997), onde ρ_{ap} é a massa específica aparente, f_{c0} a resistência à compressão paralela às fibras, f_{t0} a resistência à tração paralela às fibras, f_{t90} a resistência à tração normal às fibras, f_v a resistência ao cisalhamento, E_{c0} é o módulo de elasticidade longitudinal obtido no ensaio de compressão paralela às fibras, e n é o número de corpos-de-prova ensaiados.

Tabela 16 - Valores característicos da espécie da madeira de *Eucalyptus*.

| Espécie | ρ_{ap} (12%) kg/m ³ | f_{c0} MPa | f_{t0} MPa | f_{t90} MPa | f_v MPa | E_{c0} MPa | n |
|-----------------------------|--|-----------------|-----------------|------------------|--------------|-----------------|-----|
| <i>Eucalyptus cloeziana</i> | 822 | 51,8 | 90,8 | 4,0 | 10,5 | 13.963 | 21 |

Fonte: NBR 7190 (ABNT, 1997).

Dessa forma, ainda segundo a NBR 7190 (ABNT, 1997), a partir da densidade aparente da madeira a 12% de 822 kg/m³ da espécie de *Eucalyptus cloeziana*, pode ser enquadrada na classe de resistência C 30 das dicotiledôneas, conforme apresenta a Tabela 20.

Tabela 17 - Classes de resistência das dicotiledôneas.

| Dicotiledôneas (Valores na condição-padrão de referência U = 12%) | | | | | |
|--|------------------|-----------------|-------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Classes | f_{c0k} MPa | f_{vk} MPa | $E_{c0,m}$ MPa | $\rho_{bas,m}$ kg/m ³ | $P_{aparente}$ kg/m ³ |
| C20 | 20 | 4 | 9.500 | 500 | 650 |
| C30 | 30 | 5 | 14.500 | 650 | 800 |
| C40 | 40 | 6 | 19.500 | 750 | 950 |
| C60 | 60 | 8 | 24.500 | 800 | 1.000 |

Fonte: NBR 7190 (ABNT, 1997).

Dessa forma, é possível calcular os valores das resistências de projeto e o módulo de elasticidade, a fim de verificar se a estrutura dimensionada com o uso da fibra será aprovada segundo os critérios de projeto.

4.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1.1 Cálculo das Resistências de Projeto

Com a finalidade de obter um valor teórico e realizar um comparativo com os valores encontrados na modelagem, foram realizados os seguintes cálculos para se alcançar os valores de resistência de projeto, a partir da Equação 15, que é uma fórmula geral para encontrar valores referentes a diferentes resistências.

Segundo a NBR 7190 (ABNT, 2022), a partir dos valores característicos das propriedades da madeira ($f_{c0,k}$, $f_{v0,k}$ e $f_{t0,k}$) é possível calcular o valor da resistência de projeto ($f_{c0,d}$, $f_{v0,d}$ e $f_{t0,d}$), por meio dos valores do coeficiente modificação (K_{mod}) e do coeficiente de minoração das propriedades da madeira (γ_w), por meio da Equação 15, a seguir:

$$f_{wd} = K_{mod} \times \frac{f_{wk}}{\gamma_w} \quad \text{Equação 15}$$

Onde:

f_{wd} representa $f_{c0,d}$, $f_{t0,d}$ e $f_{v0,d}$ e f_{wk} representa $f_{c0,k}$, $f_{t0,k}$ e $f_{v0,k}$.

Para se obter o coeficiente de modificação (K_{mod}), de acordo com a NBR 7190 (ABNT, 2022), é importante ter conhecimento da classe de carregamento e do ambiente que o material será empregado. A Equação 16 do K_{mod} é dada por:

$$K_{mod} = K_{mod_1} * K_{mod_2} \quad \text{Equação 16}$$

O coeficiente de modificação K_{mod_1} , leva em conta a classe de carregamento e o tipo de material empregado. Segundo a NBR 7190 (ABNT, 2022), o K_{mod_1} adotado para o dimensionamento de resistência da madeira serrada para o projeto de treliça deve ser de 0,60 para a classe de carregamento permanente, ver Tabela 18.

Tabela 18 - Tabela de definição de classes de carregamento e valores de K_{mod1} .

| Classes de Carregamento | Ação variável principal da combinação | | Tipos de madeira | |
|-------------------------|---------------------------------------|---|---|--------------------|
| | Duração acumulada | Ordem de grandeza da duração acumulada da ação característica | Madeira serrada Madeira roliça Madeira lamelada colada (MLC) Madeira lamelada colada cruzada (MLCC) Madeira laminada colada (LVL) | Madeira recomposta |
| Permanente | Permanente | Mais de dez anos | 0,60 | 0,30 |
| Longa Duração | Longa Duração | Seis meses a dez anos | 0,70 | 0,45 |
| Média Duração | Média Duração | Uma semana a seis meses | 0,80 | 0,65 |
| Curta Duração | Curta Duração | Menos de uma semana | 0,90 | 0,90 |
| Instantânea | Instantânea | Muito curta | 1,10 | 1,10 |

Fonte: NBR 7190 (ABNT, 2022).

De acordo com a NBR 7190 (ABNT, 2022), o coeficiente de modificação K_{mod2} leva em conta a classe de umidade e o tipo de material empregado. Para Salvador a umidade de equilíbrio da madeira é de 18%, então a classe de umidade adotada foi a 3, e o K_{mod2} é 0,8, ver Tabela 19.

Tabela 19 - Tabela de valores de K_{mod2} .

| Classes de umidade | Madeira serrada Madeira roliça Madeira lamelada colada (MLC) Madeira lamelada colada cruzada (MLCC) Madeira laminada colada (LVL) | Madeira recomposta |
|--------------------|---|--------------------|
| (1) | 1,00 | 1,00 |
| (2) | 0,90 | 0,95 |
| (3) | 0,80 | 0,93 |
| (4) | 0,70 ^a | 0,90 |

^a Não é permitido o uso do MLCC para classe de umidade (4).

Fonte: NBR 7190 (ABNT, 2022).

Logo, após a obtenção dos dados, temos que:

$$K_{mod} = 0,6 * 0,8 = 0,48$$

Equação 17

Dessa forma, é possível obter a resistência à compressão paralela às fibras ($f_{c0,d}$), na Equação 18, e de cisalhamento paralelo às fibras ($f_{v0,d}$), conforme mostra a Equação 19, com o K_{mod} encontrado de 0,48 e do coeficiente de minoração (γ_w), que é de 1,4, para estados-limite últimos decorrente de tensões normais, e de 1,8 para estados-limite últimos decorrentes de tensões de cisalhamento. Os coeficientes de minoração foram adotados de acordo com a NBR 7190 (ABNT, 2022).

$$f_{c0,d} = K_{mod} * f_{c0,k} / \gamma_w = 0,48 * 30 / 1,4 = 10,29 \text{ MPa} \quad \text{Equação 18}$$

e, admitindo $f_{v0,k} = f_{vk}$ da Tabela 17, tem-se:

$$f_{v0,d} = K_{mod} * f_{v0,k} / \gamma_w = 0,48 * 5 / 1,8 = 1,33 \text{ MPa} \quad \text{Equação 19}$$

Já para o cálculo da resistência à tração de projeto, será calculado o valor característico da resistência a tração pela fórmula apresentada na caracterização simplificada da NBR 7190 (ABNT, 1997), apresentada na Equação 20.

$$f_{t0,k} / f_{c0,k} = 0,77 \quad \text{Equação 20}$$

Assim:

$$f_{t0,k} = f_{c0,k} / 0,77 = 30 / 0,77 = 38,96 \text{ MPa} \quad \text{Equação 21}$$

E então pode ser encontrada a resistência à tração paralela às fibras de projeto, conforme descreve a Equação 22.

$$f_{t0,d} = K_{mod} * f_{t0,k} / \gamma_w = 0,48 * 38,96 / 1,4 = 13,36 \text{ MPa} \quad \text{Equação 22}$$

4.1.2 Módulo de Elasticidade

Nas verificações de segurança que dependem da rigidez da madeira, o módulo de elasticidade na direção paralela às fibras deve ser admitido pela Equação 23, segundo a NBR 7190 (ABNT, 2022).

$$E_{0,ef} = K_{mod1} * K_{mod2} * E_{0,med} \quad \text{Equação 23}$$

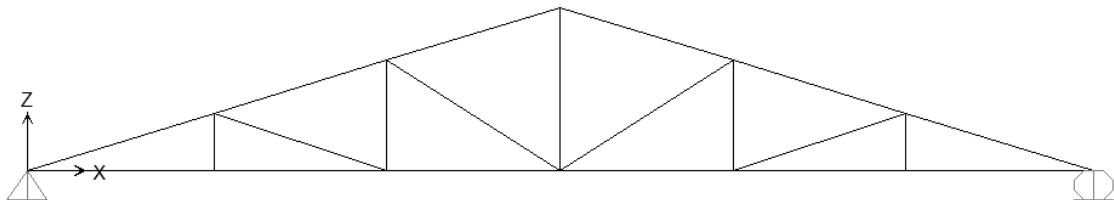
Assim:

$$E_{0,ef} = 0,6 * 0,8 * 14.500 = 6.950 \text{ MPa} \quad \text{Equação 24}$$

4.1.3 Dimensionamento da estrutura rotulada

A Figura 41 apresenta o modelo criado no SAP 2000 (2023) dimensionado com as ligações rotuladas, modelo tradicional de cálculo geralmente adotado, a fim de verificar o deslocamento central, as tensões que a estrutura está submetida com a aplicação das cargas, enfim para a análise do desempenho da treliça nessas condições.

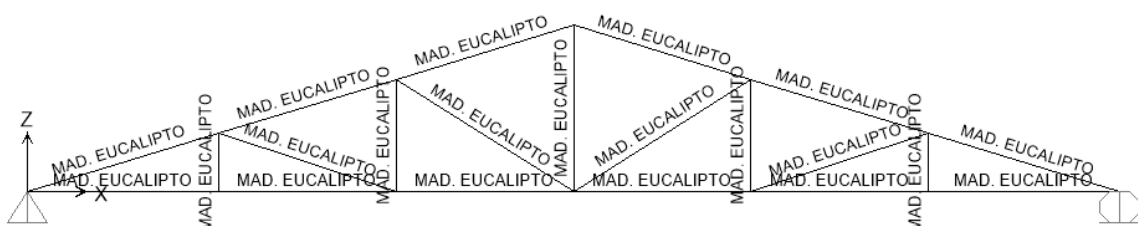
Figura 41 - Modelo da Treliça extraído do SAP 2000 (2023).



Fonte: Autora.

Foram inseridas no programa as propriedades como densidade aparente da madeira de Eucalipto cloeziana, o diâmetro da peça de 21 cm, módulo de elasticidade de 6.950 MPa, e as cargas aplicadas para fornecimento dos diagramas de esforços e tensões, ver Figura 42.

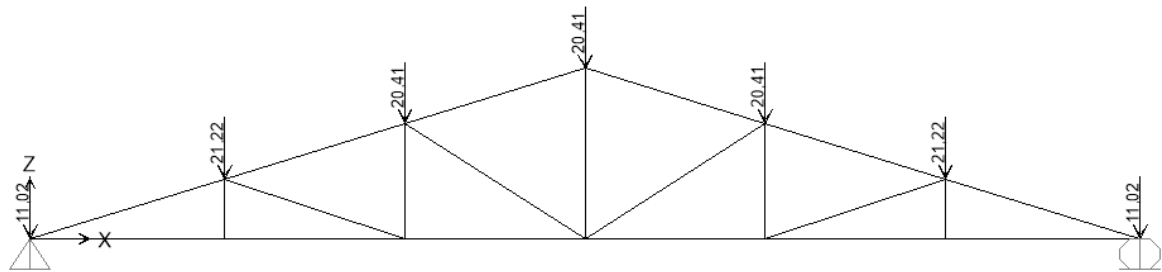
Figura 42 - Aplicação das propriedades e seções das peças.



Fonte: Autora.

Em seguida, foram aplicadas as cargas calculadas para cada nó, com os valores da Tabela 15 e pode ser visto na Figura 43.

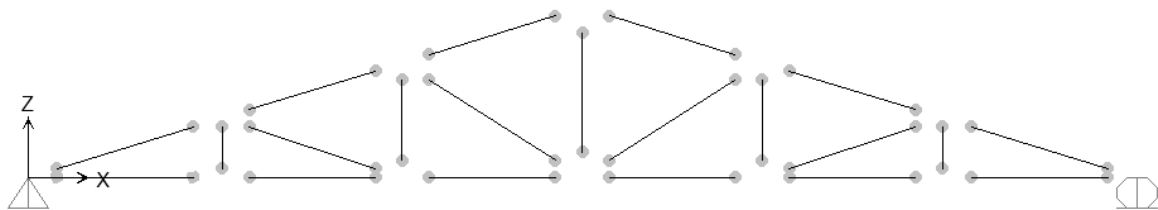
Figura 43 - Aplicação das cargas na treliça (em kN).



Fonte: Autora.

A Figura 44 mostra a estrutura rotulada em todas as ligações, sem a presença de rigidez no seu dimensionamento.

Figura 44 - Estrutura rotulada.

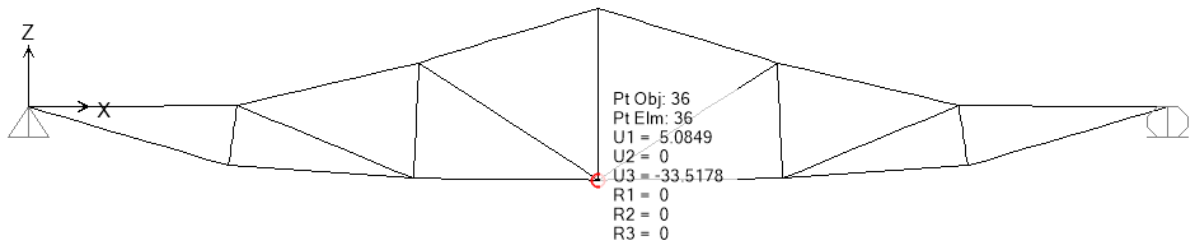


Fonte: Autora.

Após a simulação, foi possível obter o deslocamento máximo central da estrutura, que foi de 33,5178 mm, ou aproximadamente 3,35 cm, conforme mostra a Figura 45. A simulação da treliça plana foi realizada no plano X-Z, conforme mostra a imagem, por isso só ocorreram deslocamentos nessas duas direções, U1 (UX) e U3 (UZ). Nesse sentido, U3 representa o deslocamento vertical máximo, e, por não se tratar de uma análise no espaço, o deslocamento U2 (UY) aparece zerado.

Segundo a NBR 7190 (ABNT, 2022), a instabilidade lateral pode ocorrer, o desvio no alinhamento axial da peça, medido na metade da distância entre os apoios, mas precisa estar dentro do limite de $L/300$, por ser madeira roliça, onde L é o comprimento do vão em centímetros. O vão de 1.540 cm da estrutura dimensionada, só pode ter um deslocamento central de até 5,1333 cm. Sendo assim, o deslocamento da estrutura de aproximadamente 3,35 cm atende a este requisito normativo.

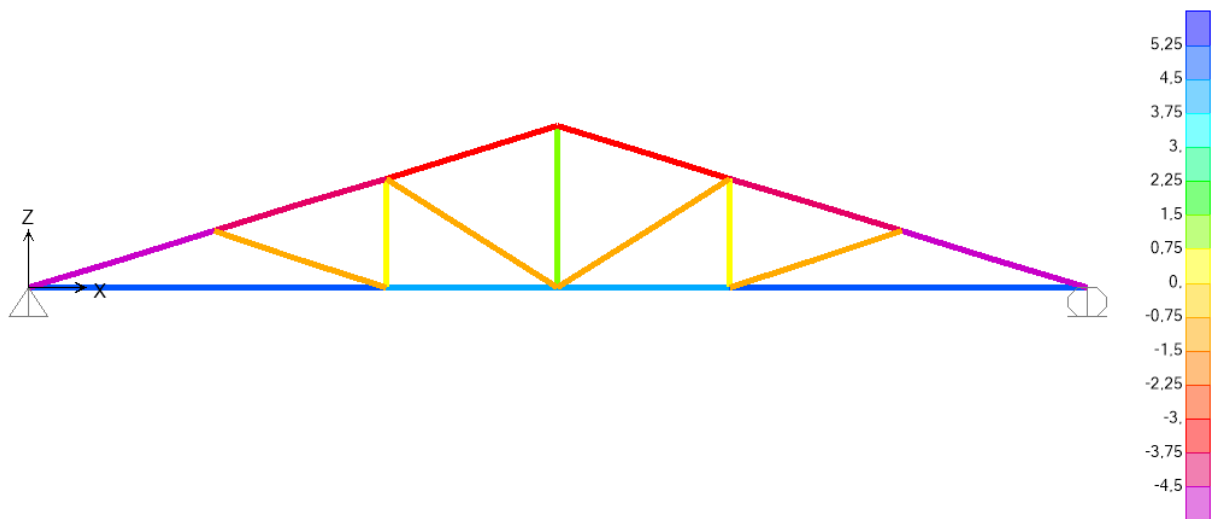
Figura 45 - Deslocamento máximo central da treliça (deslocamento em milímetros).



Fonte: Autora.

Quanto às verificações das tensões máximas de tração e compressão, o SAP 2000 (2023) forneceu os valores das tensões de tração e compressão, sendo as máximas de 4,903 MPa de tração e 5,126 MPa para compressão, conforme mostra a Figura 46. Esses dois valores estão abaixo dos valores das resistências de projeto ($f_{c0,d} = 10,29$ MPa e $f_{t0,d} = 13,36$ MPa), mostrando que o dimensionamento realmente atende os requisitos de projeto.

Figura 46 - Tensões de compressão e de tração em MPa.

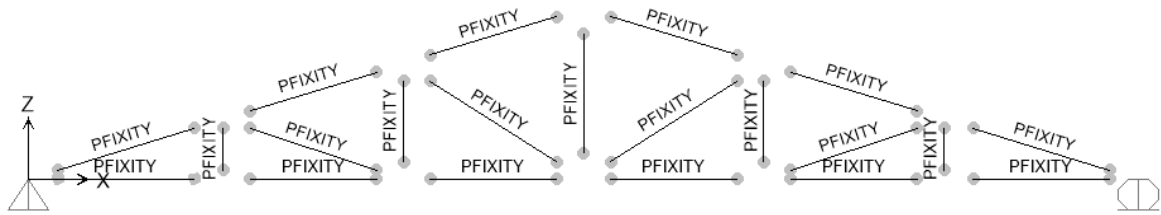


Fonte: Autora.

4.1.4 Dimensionamento da Estrutura com a Fibra

A apresenta o mesmo modelo criado no SAP 2000 (2023) dimensionado com as mesmas dimensões, cargas aplicadas, e mesmo material, porém com uma rigidez nas ligações no valor de 549,5009 kN.m/rad na estrutura, fornecida pela fibra de carbono, obtida por meio dos ensaios experimentais, conforme a Figura 47. Isso permite verificar o novo deslocamento central e as novas tensões que a estrutura está submetida com a aplicação das cargas, podendo assim comparar o desempenho da estrutura confeccionada tradicionalmente com a nova técnica.

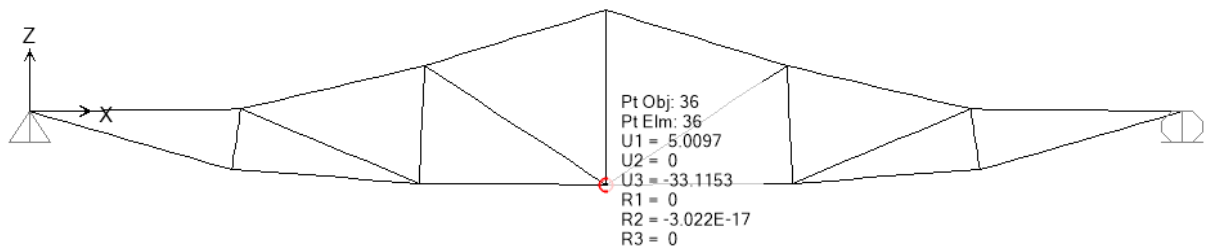
Figura 47 - Aplicação da rigidez de rotação nos elementos da treliça representando o uso da fibra de carbono.



Fonte: Autora.

Após a simulação da treliça que foi realizada no plano X-Z, foi possível obter o deslocamento máximo central da estrutura (U3, deslocamento UZ) de 33,1153 mm, ou aproximadamente 3,31 cm, conforme mostra a Figura 48, abaixo do limite de $L/300$, de acordo com a NBR 7190 (ABNT, 2022), por ser madeira roliça, de 5,1333cm, para um vão de 1.540cm da estrutura dimensionada. Por não se tratar de uma análise no espaço, o deslocamento U2 (UY) aparece zerado.

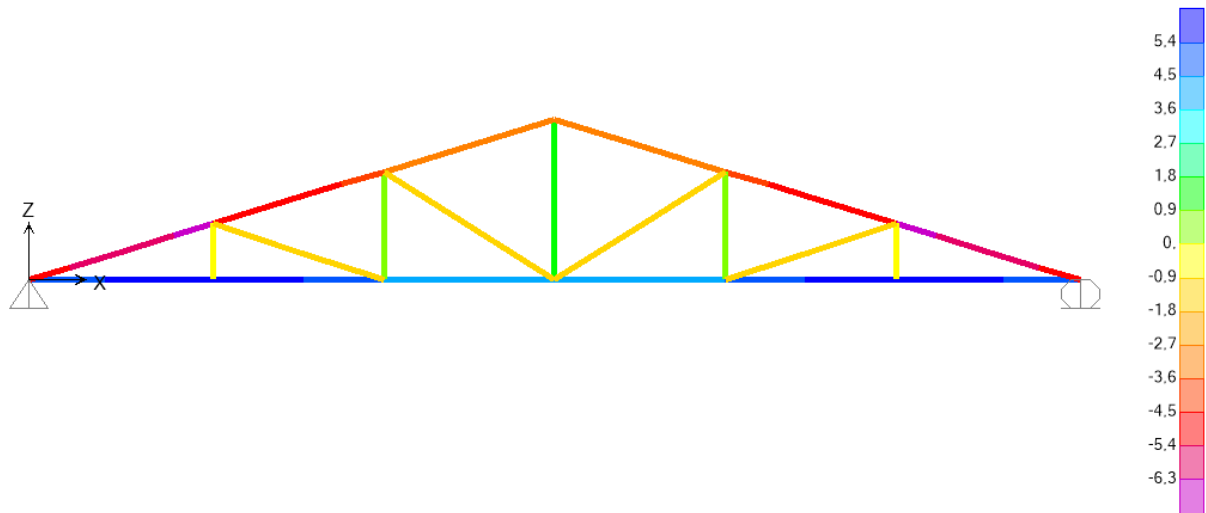
Figura 48 - Treliça deformada com deslocamento central (deslocamento em milímetros).



Fonte: Autora.

Quanto às verificações das tensões máximas de tração e compressão, o SAP 2000 (2023) forneceu os valores das tensões de tração e compressão, sendo as máximas de 6,256 MPa de tração e 6,647 MPa para compressão, conforme mostra a Figura 49. Esses dois valores estão abaixo dos valores das resistências de projeto ($f_{c0,d} = 10,29$ MPa e $f_{t0,d} = 13,36$ MPa), o que mostra que o dimensionamento atende bem os requisitos de projeto. As tensões de cisalhamento que surgiram, após a aplicação da rigidez na estrutura, não foram analisadas, pois ficaram muito próximas de zero.

Figura 49 - Esforços normais na treliça em MPa.



Fonte: Autora.

4.1.5 Verificação da Flexão Simples

A carga adotada para o cálculo da flexão simples, considerando a carga permanente, peso próprio e o vento, foi de 200 kgf/m, representada na Equação 25.

$$q = 200 \frac{\text{Kgf}}{\text{m}} = 2,00 \frac{\text{Kgf}}{\text{cm}} \quad \text{Equação 25}$$

A Equação 26 mostra o cálculo do valor do momento fletor (M_d), considerando o vão correspondente (L) de 416 cm:

$$M_d = \frac{q * L^2}{8} = \frac{2 * 416^2}{8} = 43.264 \text{ Kgf} * \text{cm} \quad \text{Equação 26}$$

Para uma seção circular, o módulo de resistência à flexão deve ser calculado de acordo com a Equação 27:

$$W = \frac{\pi * d^3}{32} = \frac{\pi * 21^3}{32} = 909,2 \text{ cm}^3 \quad \text{Equação 27}$$

Para uma seção circular, o módulo de resistência à flexão deve ser calculado de acordo com a Equação 28, e adotando o $f_{c0,d} = 10,29 \text{ MPa}$, pode-se encontrar:

$$\sigma_{M,d} = \frac{Md}{W} = \frac{43.264 \text{ Kgf*cm}}{909,2 \text{ cm}^3} = 47,58 \frac{\text{Kgf}}{\text{cm}^2} = 4,67 \text{ MPa} \quad \text{Equação 28}$$

Dessa forma, a Inequação 1 apresenta a verificação para a flexão simples da estrutura:

$$\frac{\sigma_{m,d}}{f_{c0,d}} \leq 1 \rightarrow \frac{4,67 \text{ Mpa}}{10,29 \text{ Mpa}} \leq 1 \rightarrow 0,45 < 1 \quad \text{Inequação 1}$$

A verificação da flexão simples para a estrutura está aprovada segundo a verificação da Norma.

4.1.6 Verificação da Flexocompressão e Flexotração

Após o dimensionamento, encontrados os valores máximos de tensão de compressão e de tração, é possível realizar as verificações da flexocompressão e da flexotração. A Inequação 2 apresenta a verificação para a flexocompressão, considerando apenas uma flexão simples, para análise no plano, retirada da NBR 7190 (ABNT, 2022).

$$\left(\frac{\sigma_{NC0,d}}{f_{c0,d}} \right)^2 + KM \frac{\sigma_{M,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad \text{Inequação 2}$$

Considerando $f_{m,d} = f_{c0,d}$, e $KM = 1,0$ para seções transversais que não são quadradas, ver Inequação 3 a seguir:

$$\left(\frac{6,647}{10,29} \right)^2 + 1,0 \frac{4,67}{10,29} \leq 1 \longrightarrow 0,87 < 1,0 \quad \text{Inequação 3}$$

No caso da verificação da flexotração, a Inequação 4 apresenta como deve ser feita:

$$\left(\frac{\sigma_{Nt0,d}}{f_{t0,d}} \right) + KM \frac{\sigma_{M,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad \text{Inequação 4}$$

Considerando $f_{m,d} = f_{i0,d}$, e $K_M = 1,0$ para seções transversais que não são quadradas, ver Inequação 5 a seguir:

$$\left(\frac{6,256}{13,36}\right) + 1,0 \frac{4,67}{13,36} \leq 1 \longrightarrow 0,82 < 1,0 \quad \text{Inequação 5}$$

A verificação da flexocompressão e flexotração demonstraram a adequação da estrutura para essas situações.

4.1.7 Comparação dos Resultados da Simulação Computacional

Após a análise da viabilidade do dimensionamento com a técnica do tecido de fibra de carbono e resina epóxi apresentada neste estudo, pode-se comparar os resultados da simulação computacional com a do método tradicional de dimensionamento que geralmente é adotado como modelo. A Tabela 20 apresenta resumidamente os valores de tensão de compressão, tração e deslocamento em cada situação modelada, comprovando a eficiência da técnica proposta nesta pesquisa, por meio do seu desempenho.

Tabela 20 – Resultados da Simulação Computacional das Técnicas.

| Técnica de Dimensionamento | Tensão de Compressão (MPa) | Tensão de Tração (MPa) | Deslocamento máximo (cm) |
|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| Tradicional | 5,126 | 4,903 | 3,35 |
| Fibra de Carbono e Resina Epóxi | 6,647 | 6,256 | 3,31 |

Fonte: Autora.

Pode-se observar que a técnica de dimensionamento com a fibra de carbono e a resina epóxi apresentaram resultados muito interessantes no que diz respeito às tensões principais suportadas de tração e compressão alcançando um deslocamento máximo muito próximo do encontrado no modelo de dimensionamento tradicional. Isso só reforça o quão promissora pode ser a técnica apresentada nesta pesquisa.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi possível verificar a viabilidade da técnica de colagem dos nós de uma treliça de madeira com fibra de carbono e resina epóxi, em função de sua relativa praticidade e aplicação. Nesse sentido, foram realizados testes experimentais com intuito de levantar dados para sustentar a relevância da técnica para ligações de nós de treliça.

Na análise dos ensaios experimentais notou-se que, com o melhor sustento do protótipo na prensa hidráulica nos ensaios complementares, por meio dos dispositivos inseridos que impediram o tombamento da estrutura, os deslocamentos se tornavam cada vez menores e a resistência mecânica da ligação aumentava. Esse fato foi verificado no cálculo experimental dos valores da constante de rigidez rotacional ($K\theta$), em que os ensaios complementares apresentaram valores consideravelmente maiores de rigidez em comparação com os ensaios iniciais.

Com os resultados obtidos verificou-se que a estrutura formada pela estrutura triangular de eucalipto e suas ligações apresentaram boa confiabilidade. Isso ocorreu, pois a estrutura apresentou uma ductilidade, dando sinais de que iria romper, com a elevação constante da carga na prensa hidráulica, visto que ela sofreu deslocamentos e foram observados sinais sonoros e visuais que antecederiam um processo de ruptura. Esse aspecto reforça a viabilidade da aplicação da técnica apresentada nesse trabalho.

Foi realizada uma simulação numérica, baseada no MEF aplicado a uma treliça com o intuito de simular a aplicação de cargas prováveis em uma treliça com ligações de fibra de carbono e resina epóxi na região dos nós. Para isso, o parâmetro de rigidez rotacional ($K\theta$), o qual foi encontrado nos ensaios experimentais, foi utilizado nas ligações dos elementos da treliça de madeira. Dessa forma, foi possível visualizar que o método de colagem utilizado resiste a determinadas cargas, conforme o modelo proposto, que foi baseado em parâmetros de uma situação real, em que foi acrescentada uma rigidez relativa aos nós da estrutura.

Os resultados da modelagem computacional também validam a técnica de colagem dos nós, em conformidade com os critérios de projeto da norma vigente. Foram encontrados valores de tensão de tração e compressão dentro dos limites de projeto, conforme as recomendações da NBR 7190 (ABNT, 2022). Os valores de deslocamento central da estrutura também estavam dentro dos limites permitidos pela Norma de acordo com o tamanho do vão da treliça. A comparação dos resultados da simulação numérica de uma estrutura rotulada, modelo adotado de dimensionamento tradicional, nas mesmas condições da estrutura com a rigidez obtida experimentalmente, que representa a fibra nas ligações, reforça que o uso da fibra de carbono e

resina epóxi nos elementos de ligação de estruturas treliçadas apresenta nível de segurança similar para resistir ao tipo de carga analisada.

Nesse sentido, o estudo revela a possibilidade de utilizar uma treliça de madeira com ligação dos nós colados com fibra de carbono e resina epóxi em coberturas de telhados. Isso foi observado na simulação computacional, a qual utilizou os esforços e cargas que uma treliça real estaria submetida nessa condição de trabalho. O parâmetro da rigidez rotacional permitiu o vínculo entre o ensaio experimental e a modelagem computacional, uma vez que esse parâmetro foi utilizado para avaliação do comportamento da estrutura dimensionada com as ligações coladas com fibra de carbono.

Por tudo que foi apresentado e discutido no decorrer desse trabalho, fica evidenciada a viabilidade da utilização da fibra de carbono com resina epóxi na ligação dos nós de uma treliça de madeira. Essa técnica, que possui relativa praticidade na aplicação, amplia os horizontes para a formulação de projetos mais sustentáveis, por meio da utilização da madeira de reflorestamento, mantendo a mesma confiabilidade de métodos tradicionais. Por esse motivo, a técnica apresentada pode auxiliar no desenvolvimento de projetos de treliças de madeira no Brasil.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar estudo comparativo de viabilidade e desempenho de uma treliça de madeira com tecido unidirecional e bidirecional de fibra de carbono;
- Ensaiar uma treliça, a fim de verificar a rigidez e o desempenho da estrutura completa.

REFERÊNCIAS

- ALBINO, V. C. S.; MORI, F. A.; MENDES, L. M. A study of the bonding of wood from *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden using resorcinol-formaldehyde adhesive. **CERNE**, v. 16, n. 4, p. 443-449, 2010. DOI.10.1590/S0104-77602010000400003.
- ALVES, R. C.; OLIVEIRA, A. L. C.; CARRASCO, E. V. M. Propriedades Físicas da Madeira de *Eucalyptus cloeziana* F. Muell. **Floresta e Ambiente**, 24: e00015312, 2017. ISSN 2179-8087 (online). DOI.10.1590/2179-8087.015312.
- AMER, M.; KABOUCHI, B.; RAHOUTI, M.; FAMIRI, A. Experimental Study of Physical Properties and Impact Bending Strength of Clonal *Eucalyptus* Wood. **Int J Thermophys** 43, n. 163, 2022. DOI.10.1007/s10765-022-03087-w.
- ANDOR, K.; LENGYEL, A.; POLGÁR, R.; FODOR, T.; KARÁCSONYI, Z. Experimental and statistical analysis of spruce timber beams reinforced with CFRP fabric. **Construction and Building Materials**, v. 99, pp. 200-207, 2015. ISSN 0950-0618. DOI.10.1016/j.conbuildmat.2015.09.026.
- ARAÚJO, C. V. M.; ALVES, L. DE J.; SANTOS, O. M.; ALVES, J. M. Micorriza arbuscular em plantações de *Eucalyptus cloeziana* F. Muell no litoral norte da Bahia, Brasil. **Acta Botanica Brasilica**, 18(3), pp. 513-520, 2004. DOI.10.1590/S0102-33062004000300011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira**. Rio de Janeiro, 1997. 107 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190-1: Projeto de estruturas de madeira - Parte 1: Critérios de dimensionamento**. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2022. 81 p.
- BAKALARZ, M. M.; KOSSAKOWSKI, P. G. Mechanical Properties of Laminated Veneer Lumber Beams Strengthened with CFRP Sheets. **Archives of Civil Engineering**, v. 65, pp. 57 – 66, 2019. DOI.10.2478/ace-2019-0018.
- BAKALARZ, M. M.; KOSSAKOWSKI, P. G. Strengthening of Full-Scale Laminated Veneer Lumber Beams with CFRP Sheets. **Materials**, v. 15(19), 6526, 2022a. DOI.10.3390/ma15196526.
- BAKALARZ, M.M.; KOSSAKOWSKI, P.G. Ductility and Stiffness of Laminated Veneer Lumber Beams Strengthened with Fibrous Composites. **Fibers**, v. 10(2), 21, 2022b. DOI. 10.3390/fib10020021.
- BIANCHE, J. J.; CARNEIRO, A. C. O.; LADEIRA, J. P. S.; LADEIRA, J. P. S.; TEIXEIRA, A. P. M.; PEREIRA, F. A.; OLIVEIRA, B. S. de. Shear Strength in the Glue Line of *Eucalyptus* sp. and *Pinus* sp. Wood. **Revista Árvore**, v. 40, n. 6, 2016. DOI.10.1590/0100-67622016000600017.
- BIANCHE, J. J.; TEIXEIRA, A. P. M.; LADEIRA, J. P. S.; CARNEIRO, A. C. O.; CASTRO, R. V. O.; LUCIA, R. M. D. Cisalhamento na Linha de Cola de *Eucalyptus* sp. Colado com Diferentes Adesivos e Diferentes Gramaturas. **Floresta e Ambiente**, v. 24: e00077114, 2017. ISSN 2179-8087. DOI.10.1590/2179-8087.077114.
- BIANCHE, J. J.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; ANDRADE, B. G. de; GOMES, R. M.; ARAÚJO, S. O.; SOUZA, E. C. Improving the understanding of wood bonding:

Behavior of different adhesives on the surface of eucalyptus and pine wood. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 112, 2022. DOI.10.1016/j.ijadhadh.2021.102987.

BOURSCHEID, C. B.; TEREZO, R. F.; RIOS, P. D.; DA CUNHA, A. B.; WALTRICK, D. B.; RIGHEZ, J. L. B. Strength of Structural Finger-Joints Reinforced with Fibers. **Revista FLORESTA**, Curitiba, PR, v. 49, n. 1, pp. 031-040, 2019. ISSN Eletrônico 1982-4688. DOI.10.5380/rf.v49i1.53549.

BRITO, L. D. **Recomendações para o projeto e construção de estruturas com peças roliças de madeira de reflorestamento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010. DOI.10.11606/D.18.2010.tde-14072010-085613. Acesso em: 03 mar. 2023.

BRITO, L. D.; CALIL JR., C. Manual de projeto e construção de estruturas com peças roliças de madeira de reflorestamento. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, São Carlos, v. 12, n. 56, p. 57-77, 2010. ISSN: 1809-5860. Disponível em: <http://cadernos.set.eesc.usp.br/article/view/16>. Acesso em: 24 out. 2021.

CALLISTER, W.; RETHWISCH, D. G.. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. Tradução Sérgio Murilo Stamile Soares. - 9. ed. - [Reimpr.]. - Rio de Janeiro: LTC, 2018. il; 28 cm.

CHEN, J.; XIONG, H.; WANG, Z.; YANG, L. Mechanical Properties of a Eucalyptus-Based Oriented Oblique Strand Lumber for Structural Applications. **Journal of Renewable Materials**, v. 7, n. 11, p. 1147-1164, 2019. ISSN: 2164-6341. Disponível em: <http://www.techscience.com/jrm/v7n11/33858>. DOI.10.32604/jrm.2019.07642.

COELHO, R. M.; LEITE, A. M. P.; LEONEL, M. S.; MATUDA, J. J.; FREITAS, L. C. Avaliação Econômica do uso da Madeira de Eucalipto para Diferentes Finalidades, na Região do Alto Jequitinhonha, MG. **Revista FLORESTA**, Curitiba, PR, v. 46, n. 2, p. 155 – 164, 2016. ISSN eletrônico 1982-4688. DOI.10.5380/rf.v46i2.38600

CUNHA, J.; SOUZA Jr., D. A. Avaliação estrutural de peças de madeira reforçadas por fibras de carbono. **Revista Engenharia Civil: Revista da Universidade Federal de Uberlândia**, n. 20, p. 71-81, Minas Gerais, 2004. Disponível em: <https://www.civil.uminho.pt/revista/artigos/Num20/Pag%2071-81.pdf>. Acesso em: 08 jul. 2023.

CUNHA, R. D. A.; MUNOZ, R.; CÉSAR, S. F. **Utilização de eucalipto roliço em construções na orla norte da Bahia- Brasil: a madeira de florestas plantadas como alterantiva sustentável**. In: CLB-MCS 2014: Congresso Luso Brasileiro de Mateirais Sustentáveis, 2014, Guimarães. Anais. Portugal 2014. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Joao-Calmon-2/publication/283854306_Residuo_de_perfuracao_de_petroleo_como_agregado_miudo_e_m_blocos_de_pavimentacao/links/5648a76d08aef646e6d1f5f6/Residuo-de-perfuracao-de-petroleo-como-agregado-miudo-em-blocos-de-pavimentacao.pdf. Acesso em: 08 jul. 2023.

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

DE OLIVEIRA, R. G. E.; GONÇALVES, F. G.; Segundinho, P. G. DE A.; OLIVEIRA, J. T. DA S.; PAES, J. B.; CHAVES, I. L. S.; BRITO, A. S. Analysis of glue line and correlations between density and anatomical characteristics of *Eucalyptus grandis* ×

Eucalyptus urophylla glulam. **Maderas. Ciencia y tecnologia**, v. 22, n. 4, p. 495-504, 2020. DOI.10.4067/S0718-221X2020005000408.

FIORELLI, J. **Utilização de fibras de carbono e de fibras de vidro para reforço de vigas de madeira**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002. DOI.10.11606/D.88.2002.tde-12052003-144536. Acesso em: 10 mar. 2022.

FIORELLI, J.; DIAS, A. A. Vigas de Madeira de Baixa e Média Densidade Reforçadas com FRP – Avaliação Teórica E Experimental. **Madeira: Arquitetura e Engenharia**, v. 3, n. 8, 2002. ISSN 1516-2850. Disponível em: <https://silo.tips/download/vigas-de-madeira-de-baixa-e-media-densidade-reforçadas-com-frp-avaliaao-teorica-e>. Acesso em: 29 jan. 2024.

FIORELLI, J.; INO, A.; DIAS, A. A. Sistema Estrutural Modular em Madeira de Reflorestamento e Cobertura com Telha Ecológica. **Madeira: Arquitetura e Engenharia**, v.9, n. 22, pp. 11-20, 2008. ISSN 1806-6097. Disponível em: <http://madeira.set.eesc.usp.br/article/view/171>. Acesso em: 9 jun. 2023.

FORTES, A. S. **Vigas de concreto armado reforçadas com fibras de carbono**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000. Disponível em: <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/78159>. Acesso em: 24 out. 2021.

GÓMEZ, E.P.; COBO, A.; GONZÁLEZ, M.N. Reinforcement and repair of small sawn Pinus Sylvestris beams with carbon fiber. **Composites Part B: Engineering**, v. 101 (15), pp. 147-154, 2016. DOI.10.1016/j.compositesb.2016.07.001.

GONZÁLEZ-PRIETO, O.; CASAS MIRÁS, J.M.; TORRES, L.O. Finger-jointing of green Eucalyptus globulus L. wood with one-component polyurethane adhesives. **European Journal of Wood and Wood Products**, 80, pp. 429–437, 2022. DOI. 10.1007/s00107-021-01770-7.

GLOBA, A.; SUBHANI, M.; MOLONEY, J.; AL-AMERI, R. Carbon Fiber and Structural Timber Composites for Engineering and Construction. **Journal of Architectural Engineering**, v. 24(3), 2018. DOI.10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000318.

IEJAVS, J.; ŠKĀLE, K.; GRANTS, E.; UZULS, A. Bonding performance of wood of fast-growing tree species eucalyptus (Eucalyptus grandis) and radiata pine (Pinus radiata D.Don) with polyvinyl acetate and emulsion polymer isocyanate adhesives. **Agronomy Research**, v. 20, n. 1, p. 174–187, 2022. DOI.10.15159/AR.22.002.

JANKOWSKI, L. J.; JASIEŃKO, J.; NOWAK, T. P. Experimental assessment of CFRP reinforced wooden beams by 4-point bending tests and photoelastic coating technique. **Materials and Structures/ Materiaux et Constructions**, v. 43, pp. 141-150, 2010. DOI.10.1617/s11527-009-9476-0.

JAYAPRAKASH, J., SAMAD, A. A. A., ABBASOVICH, A. A.; ALI, A. A. A. Repair of precracked RC rectangular shear beams using CFRP strip technique. **Structural Engineering and Mechanics**, 26(4), 427–439, 2007. DOI.10.12989/SEM.2007.26.4.427

KHELIFA, M.; AUCHET, S.; MÉAUSOONE, P.-J.; CELZARD, A. Finite element analysis of flexural strengthening of timber beams with Carbon Fibre-Reinforced Polymers. **Engineering Structures**, v. 101, pp. 364-375, 2015. DOI.10.1016/j.engstruct.2015.07.046.

LI, Y. F.; TSAI, M.-J.; WEI, T.-F.; WANG, W.-C. A study on wood beams strengthened by FRP composite materials. **Construction and Building Materials**, v. 62, pp. 118-125, 2014. ISSN 0950-0618. DOI.10.1016/j.conbuildmat.2014.03.036.

MARINI, L. J.; CAVALHEIRO, R. S.; DE ARAUJO, V. A.; CORTEZ-BARBOSA, J.; DE CAMPOS, C. I.; MOLINA, J. C.; SILVA, D. A. L.; LAHR, F. A. R.; CHRISTOFORO, A. L. Estimation of mechanical properties in Eucalyptus woods towards physical and anatomical parameters. **Construction and Building Materials**, v. 352, 128824, 2022a. ISSN 0950-0618. DOI.10.1016/j.conbuildmat.2022.128824.

MARINI, L. J.; CAVALHEIRO, R. S.; DE ARAUJO, V. A.; LAHR, F. A. R.; CHRISTOFORO, A. L. Estimativa da resistência à tração nas madeiras de dez espécies de eucalipto em função de parâmetros anatômicos e da densidade aparente. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 27, n. 4, 2022b. DOI.10.1590/1517-7076-RMAT-2022-0196

MEIER, U. Strengthening of structures using carbon fibre/epoxy composites. **Construction and Building Materials**, v. 9, n. 6, p. 341-351, 1995. DOI.10.1016/0950-0618(95)00071-2.

MOHAMAD, G., ACCORDI, J.; ROCA, L.E. Avaliação da associação de compósito de fibra de vidro e carbono no reforço de madeira de eucalyptus in natura e autoclavada. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 16, n. 1, 2011. DOI.10.1590/S1517-70762011000100009.

NADIR, Y.; NAGARAJAN, P.; AMEEN, M.; ARIF M, M. Flexural stiffness and strength enhancement of horizontally glued laminated wood beams with GFRP and CFRP composite sheets. **Construction and Building Materials**, v. 112, pp. 547-555, 2016. ISSN 0950-0618. DOI.10.1016/j.conbuildmat.2016.02.133.

NAPPI, M.M.L.; NAPPI, S.C.B.; VALLE, M.D. **Corrosão na interface metal/madeira – análise de elementos metálicos embutidos em diferentes espécies de madeira**. In: IX Congresso Internacional sobre Patologia e Recuperação de Estruturas (CINPAR), 9. 2013. João Pessoa. Anais. Paraíba, 2013. Disponível em: <https://www.passeidireto.com/arquivo/74776137/corrosao-na-interface-metal-madeira>. Acesso em: 22 nov. 2022.

NOVOSEL, A.; SEDLAR, T.; ČIZMAR, D.; TURKULIN, H.; ŽIVKOVIĆ, V. Structural reinforcement of bi-directional oak-wood lamination by carbon fibre implants. **Construction and Building Materials**, v. 287, 123073, 2021. ISSN 0950-0618. DOI.10.1016/j.conbuildmat.2021.123073.

PAMAR, J. D.; NAIK, B. B.; LATHA, O. H.; AHMED, G.M. S. Experimental Investigation of Bi Directional Carbon Fiber Composite. **Materials Today: Proceedings**, [S.L.], v. 2, n. 4-5, p. 3008-3016, 2015. DOI.10.1016/j.matpr.2015.07.285.

PETRAUSKI, S. M. F. C.; SILVA, J. C.; PETRAUSKI, A.; LUCIA, R. M. D. Analysis of Eucalyptus Glued-Laminated Timber Porticos Structural Performance. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.40, n.5, p.931-939, 2016. DOI.10.1590/0100-67622016000500017.

PIZZO, B.; SMEDLEY, D. Adhesives for on-site bonding: Characteristics, testing and prospects. **Construction and Building Materials**, v. 97, pp. 67-77, 2015. DOI.10.1016/j.conbuildmat.2015.06.061.

PRÖLLER, M.; NOCETTI, M.; BRUNETTI, M.; BARBU, M.-C.; BLUMENTRITT, M.; WESSELS, C. B. Influence of processing parameters and wood properties on the edge gluing of green Eucalyptus grandis with a one-component PUR adhesive. **European Journal of Wood and Wood Products**, 76, 1195–1204, 2018. DOI.10.1007/s00107-018-1313-0

REDECENTER MATERIAIS PLÁSTICOS E ACESSÓRIOS – Distribuidora Oficial da Redelease. Resina 2001 Epoxi Transparente Com Endurecedor 3154. Disponível em: <https://www.redecentersorocaba.com.br/produto/resina-2001-epoxi-transparente-com-endurecedor-3154-01-kg.html>. Acesso em: 11 abr. 2024.

- RESCALVO, F.J.; VALVERDE-PALACIOS, I.; SUAREZ, E.; GALLEGOS, A. Experimental and analytical analysis for bending load capacity of old timber beams with defects when reinforced with carbon fiber strips. **Composite Structures**, v. 186, pp. 29-38, 2018. DOI.10.1016/j.compstruct.2017.11.078.
- SANTOS, F. L. D. L.; DA SILVA J. C.; CUNHA, R. D. A.; WAHRHAFTIG, A. DE M.; CÉSAR, S. F. Resistência ao cisalhamento de ligações de madeira para produção de painel do sistema wood frame com eucalipto jovem. **Revista Matéria** (Rio J.), vol. 25 (04), 2020. DOI.10.1590/S1517-707620200004.1208
- SCHOBER, K. U.; RAUTENSTRAUCH, K. Post-strengthening of timber structures with CFRP's. **Materials and Structures/ Materiaux et Constructions**, v. 40, p. 27-35, 2007. DOI.10.1617/s11527-006-9128-6.
- SEGUNDINHO, P.G.A.; GONÇALVES, F.G.; GAVA, G.C.; TINTI, V.P.; ALVES, S.D.; REGAZZI, A.J. Eficiência da colagem de madeira tratada de *Eucalyptus cloeziana* F. Muell para produção de madeira laminada colada (MLC). **Revista Matéria**, v. 22, n. 2, e11808, 2017. ISSN 1517-7076. DOI. 10.1590/S1517-707620170002.0140.
- SIKA S.A. **Ficha Técnica de Produto Sikadur®-330**. 2017, 5 p. Disponível em: https://bra.sika.com/content/dam/dms/br01/q/sikadur_-330.pdf. Acesso em: 09 jul. 2023.
- SOUZA JÚNIOR, W. P. DE. **Propriedades físicas, mecânicas e anatômicas das madeiras de *Eucalyptus cloeziana* e de *Eucalyptus urophylla* oriundas dos municípios de Turmalina e de Paraopeba**. 1977. 64 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2004. Disponível em: <http://www.locus.ufv.br/handle/123456789/9314>. Acesso em: 08 de jul. 2023.
- SUBHANI, M.; GLOBALA, A.; AL-AMERI, R.; MOLONEY, J. Flexural strengthening of LVL beam using CFRP. **Construction and Building Materials**, v. 150, pp. 480-489, 2017. ISSN 0950-0618. DOI.10.1016/j.conbuildmat.2017.06.027.
- TEXIGLASS INDÚSTRIA E COMÉRCIO TÊXTIL. **Tecidos Planos/Tramados**. Disponível em: <https://texiglass.com.br/produtos/tecidos-planos-tramados/>. Acesso em: 12 abr. 2024.
- VEGA, A.; BAÑO, V.; CARDOSO, A.; MOYA, L. Experimental and numerical evaluation of the structural performance of Uruguayan *Eucalyptus grandis* finger-joint. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 78, p. 923–932, 2020. DOI.10.1007/s00107-020-01570-5.
- WAHRHAFTIG, A. DE M.; CARVALHO, R. F. Design and Construction of Wooden Structure to Replace Collapsed Steel Structure. **Practice Periodical on Structural Design and Construction**, v. 21(3): 05016001, 2016. DOI. 10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000290.
- WAHRHAFTIG, A., MAGALHÃES, K., BRASIL, R., MURAWSKI, K.. Evaluation of Mathematical Solutions for the Determination of Buckling of Columns Under Self-weight. **Journal of Vibration Engineering**, v. 9, pp. 733–749, 2021. DOI: 10.1007/s42417-020-00258-7.
- YANG, H.; JU, D.; LIU, W.; LU, W. Prestressed glulam beams reinforced with CFRP bars. **Construction and Building Materials**, v. 109, pp. 73-83, 2016. ISSN 0950-0618. DOI.10.1016/j.conbuildmat.2016.02.008.

ANEXO A - FICHA TÉCNICA DO TECIDO DE FIBRA DE CARBONO

| | | | |
|--------------------------------|----------------|-----------------|------------|
| TEXIGLASS | | | |
| Ficha Técnica de Tecido | | | |
| Artigo | CCS-200 - 1,30 | Data da Emissão | 25/04/2008 |
| Grupo de Produto | PRFV | Data da Revisão | 12/12/2014 |

| | |
|-----------------------------------|-------------------|
| Matérias Primas Requeridas | |
| Material de Urdume | Roving de Carbono |
| Material de Trama | Roving de Carbono |
| Acabamento do Fio | C |
| Código TEXIGLASS da Resina | NA |

| | | | | |
|------------------------------------|-------------------|--------|---------|--------|
| Informações de Tecelagem | | | | |
| Tipo de Tecelagem | Sarja 2x2 | | | |
| Parâmetros | Unidade | Mínimo | Nominal | Máximo |
| Peso | g/m ² | 180 | 200 | 220 |
| Número de Fios de Urdume | Fios/cm | 4,75 | 5,00 | 5,25 |
| Número de Fios de Trama | Fios/cm | 4,50 | 5,00 | 5,50 |
| Largura | cm | 126 | 130 | 134 |
| Comprimento do rolo | m | 45 | 50 | 55 |
| Tamanho total do rolo | m ² | 57 | 65,0 | 74 |
| Espessura | mm | 0,25 | 0,29 | 0,33 |
| Carga de Ruptura do Urdume Teórica | Kgf/cm | 207 | 259 | 285 |
| Carga de Ruptura da Trama Teórica | Kgf/cm | 207 | 259 | 285 |
| Resistência à Tração | MPa | 4500 | | |
| Módulo de Elasticidade | GPa | 240 | | |
| Elongação | % | 1,80 | | |
| Densidade | g/cm ³ | 1,76 | | |
| Porcentagem de Resina em Peso | % | 0 | 0 | 0 |

| | | | | | |
|-------------------------------|------------------------|---|------|---|------|
| Informações Adicionais | | | | | |
| Unidirecionalidade | U × T | % | 50,0 | × | 50,0 |
| Composição do tecido | 100% Fibra de Carbono. | | | | |
| Validade | Indeterminada. | | | | |
| OBSERVAÇÕES: | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |

| | |
|------------------------------|------------------------|
| Data | 12/12/2014 |
| Nome e assinatura do revisor | Luís Fernando T. Barbi |