



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

Adrian Luiz Costa Viana

**CARACTERIZAÇÃO DE TELAS DE POLÍMEROS REFORÇADOS COM
FIBRAS DE VIDRO**

**São Luís
2025**

Adrian Luiz Costa Viana

**CARACTERIZAÇÃO DE TELAS DE POLÍMEROS REFORÇADOS COM
FIBRAS DE VIDRO**

Trabalho de Conclusão de Curso II
apresentado à Coordenação do Curso de
Engenharia Civil como requisito para o
obtenção do Grau de Bacharelado em
Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Wallace Maia de Souza

**São Luís
2025**

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Viana, Adrian Luiz Costa.

CARACTERIZAÇÃO DE TELAS DE POLÍMEROS REFORÇADOS COM
FIBRAS DE VIDRO / Adrian Luiz Costa Viana. - 2026.
73 p.

Orientador(a): Wallace Maia de Souza.

Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do
Maranhão, São Luís, 2026.

1. Fibras de Vidro. 2. Polímeros Reforçados Com
Fibras. 3. Telas de Gfrp. 4. Caracterização Mecânica. 5.
Normalização. I. Souza, Wallace Maia de. II. Título.

Adrian Luiz Costa Viana

CARACTERIZAÇÃO DE TELAS DE POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS DE VIDRO

Trabalho de Conclusão de Curso II
apresentado à Coordenação do Curso de
Engenharia Civil como requisito para o
obtenção do Grau de Bacharelado em
Engenharia Civil.

Aprovado em 20 de janeiro de 2026

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Wallace Maia de Sousa (UFMA)

Prof. Dr. Paulo César de Oliveira Queiroz (UFMA)

Prof. Dr. Antônio Ernandes Macedo Paiva (UFMA)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, primeiramente, pois acredito na existência de um ser superior que deu à humanidade a inteligência para entender a Criação e seus fenômenos que levam a elaborar trabalhos como este.

Agradeço, também, à minha família, principalmente minha mãe Adriana e irmã Luiza, que nunca me deixaram só nesta jornada, dando todo tipo de apoio. Agradeço a minha filha Aurora, que é o maior motivo de eu nunca desistir de meus sonhos para que ela viva todos os que ela quiser. Ao meu pai Luiz que, mesmo estando além desta vida, sei que continua zelando por minha caminhada.

Aos amigos de caminhada, agradeço pelos momentos de extroversão que também fazem parte da jornada de aprendizado, mais carinhosamente aos “Coragers”, “Carnaval”, “Boiada” e “Glr LISA”, grupos onde estão os mais queridos por mim e que mais me deram apoio durante a elaboração deste trabalho.

Agradeço a meu colega Marcos Pereira que prestou muita ajuda neste trabalho, principalmente em momentos de operação das atividades. Agradeço a meu professor Wallace Maia que foi um grande mentor durante minha jornada acadêmica e, por isso, acredito não ter pessoa melhor adequada para a orientação neste trabalho. Agradeço, também ao Prof. Wenner Saraiva por sua contribuição imprescindível para a realização deste estudo.

Concluo agradecendo à Universidade Federal do Maranhão, por meio da SINFRA, e ao Instituto Federal do Maranhão que foram cruciais em dar todo o apoio para desenvolver este trabalho e, assim, devolver à sociedade o investimento utilizado.

RESUMO

Os desafios para a obtenção de significativa durabilidade das construções de concreto armado em ambientes agressivos, como regiões litorâneas e zonas industriais, são evidentes, principalmente com relação à corrosão para as armaduras de aço convencionais. Os polímeros reforçados com fibras (FRP), especialmente os reforçados com fibras de vidro (GFRP), surgem como uma alternativa devido à sua elevada resistência à corrosão, leveza e alta resistência à tração, produzidos na forma de barras e telas. As telas de GFRP, entretanto, exibem um limitador de sua aplicação, a partir da ausência de recomendações normativas, por conta da reduzida quantidade de estudos técnicos. Por isto, o presente estudo objetiva caracterizar o comportamento mecânico das telas de GFRP através de ensaios experimentais. A metodologia envolveu a preparação de provetes de telas de GFRP de diferentes diâmetros (4, 5 e 6 mm) e a realização de ensaios de determinação do diâmetro efetivo, teor de fibra e resistência à tração, adaptados da norma ABNT NBR 17201, que regulamenta as barras de GFRP, além do uso de chapas metálicas reutilizáveis como ancoragem para os provetes das telas de GFRP. Os resultados indicaram que a região dos laços das telas interfere nas propriedades mecânicas, causando decréscimos, em média, de resistência à tração e módulo de elasticidade de 29% e 14%, respectivamente, na direção secundária em comparação ao mínimo normativo. Na direção principal não houve rupturas válidas, porém destaca-se o valor médio de 875,9 MPa atingido pelos provetes desta direção, antes de interromper o ensaio. Assim, evidencia-se a necessidade de recomendações normativas de projeto que considerem a direção secundária, que compreende a região dos laços, como a que apresenta menor resistência para as condições de dimensionamento, garantindo a segurança das estruturas de concreto armado com telas de GFRP.

Palavras-chave: Fibras de vidro; Polímeros reforçados com fibras; Telas de GFRP; Caracterização mecânica; Normatização.

ABSTRACT

The challenges in achieving significant durability for reinforced concrete structures in aggressive environments, such as coastal regions and industrial zones, are evident, especially regarding corrosion for conventional steel reinforcement. Fiber-reinforced polymers (FRP), especially glass fiber-reinforced polymers (GFRP), emerge as an alternative due to their high corrosion resistance, lightweight, and high tensile strength, produced in the form of bars and grids. GFRP grids, however, exhibit a limitation in their application due to the absence of normative recommendations, resulting from a reduced number of technical studies. Therefore, this study aims to characterize the mechanical behavior of GFRP grids through experimental tests. The methodology involved the preparation of GFRP grid specimens of different diameters (4, 5, and 6 mm) and the performance of tests to determine the effective diameter, fiber content, and tensile strength, adapted from the ABNT NBR 17201 standard, which regulates GFRP bars, in addition to the use of reusable steel plates as an anchoring system for the GFRP grid specimens. The results indicated that the region of the grid loops interferes with the mechanical properties, causing decreases, on average, in tensile strength and modulus of elasticity by 29% and 14%, respectively, in the secondary direction compared to the normative minimum. No valid failures were recorded in the principal direction; however, it is noteworthy that the specimens in this orientation achieved an average stress level of 875.9 MPa prior to the termination of the test. Thus, there is an evident need for design recommendations that consider the secondary direction—which comprises the loop region—as the one presenting lower resistance for design conditions, ensuring the safety of concrete structures reinforced with GFRP grids.

Keywords: Glass fibers; Fiber-reinforced polymers; GFRP grid; Mechanical characterization; Standardization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama do processo de pultrusão de barras de GFRP. _____	20
Figura 2: Construção de cais de proteção (<i>seawall</i>) com barras de GFRP. _	21
Figura 3: Telas de GFRP em laje bidirecional. _____	21
Figura 4: Tipos de acabamento de barras de FRP. _____	22
Figura 5: Trem de levitação magnética no Japão. _____	23
Figura 6: Relação força <i>versus</i> deslocamento de vigas de concreto com barras de aço e GFRP _____	24
Figura 7: Telas de GFRP (a) com barras justapostas e em (b) nó-inglês. __	25
Figura 8: Rolo de tela de fibra de vidro armazenado em fábrica. _____	26
Figura 9: Tela NEFMAC produzida no Brasil. _____	27
Figura 10: Comparação das curvas experimentais de Momento-Deflexão com as curvas obtidas por diferentes métodos de cálculo _____	28
Figura 11: Laje com telas de aço sobre a laje com telas de GFRP, após atingirem a ruptura. _____	28
Figura 12: Elementos estruturais estudados (unidade: mm): (a) Dimensões da amostra (vista frontal); (b) Dimensões da amostra (vista superior); (c) Disposição dos extensômetros de concreto e LVDTs; (d) Tela de GFRP com malha quadrada (AXX) e pontos de medição de G GFRP; (e) Tela de GFRP com malha retangular (SXX) e pontos de medição de GFRP. _____	30
Figura 13: (a) Configuração do teste de flexão, (b) Sistema de ensaio; (c) Layout de laje GFRP bidirecional com barras reforçadas; (d) e (e) Arranjo dos medidores de tensão. _____	31
Figura 14: Nós tipo 1 (acima) e nós do tipo 2 (abaixo) das telas utilizadas na pesquisa. _____	32
Figura 15: Curvas experimentais tensão vs. deformação das telas de diferentes fabricantes _____	33

Figura 16: Indicação de direções e espaçamentos de barras na telas com barra de diâmetro nominal de (a) 4 mm; (b) 5 mm; e (c) 6 mm. _____	37
Figura 17: Provetes das direções principal (a), e secundárias na zona de laços (b) e entrelaços (c) das telas T4, T5 e T6. _____	38
Figura 18: Detalhe do laço de uma tela de GFRP. _____	39
Figura 19: Segmentos de barras: EL4, L4 e P4 (à esquerda); e paquímetro utilizado para medir o comprimento (à direita). _____	40
Figura 20: Provetes P5 e EL5 (à esquerda); e provetes P6 e EL6 (à direita). _____	40
Figura 21: Exemplo de balança hidrostática para determinação do diâmetro efetivo _____	41
Figura 22: Balança analítica e recipiente com água utilizados para obter o diâmetro efetivo. _____	41
Figura 23: Medição de massa do provete de 4 mm. _____	42
Figura 24: Provete de 4 mm imerso para medição de Massa 2. _____	42
Figura 25: Pesagem de cadinho após secagem em estufa. _____	44
Figura 26: Identificação de cadinhos após pesagem em balança analítica. _	44
Figura 27: Corpos de prova nos cadinhos. _____	45
Figura 28: a) Cadinhos, no dessecador, após saírem da estufa; b) Cadinhos com corpos de prova sendo pesados em balança analítica. _____	45
Figura 29: Forno-mufla utilizado no ensaio de teor de fibras. _____	46
Figura 30: Conjunto fibra mais cadinho sendo pesado (à direita); e as fibras de vidro sem a resina após combustão (à esquerda). _____	46
Figura 31: Provetes das direções principal com adesivo epóxi. _____	48
Figura 32: Sistema de ancoragem com chapas de aço. _____	48
Figura 33: Chapas metálicas produzidas para ensaio de tração. _____	49
Figura 34: Barra L4 fixada nas chapas metálicas. _____	49
Figura 35: Provete instalado em máquina de ensaio de tração. _____	50

Figura 36: Curva de tensão <i>versus</i> deformação da tela T4 na direções principal e secundária.	60
Figura 37: Curva de tensão <i>versus</i> deformação da tela T5 na direções principal e secundária.	61
Figura 38: Curva de tensão <i>versus</i> deformação da tela T6 na direções principal e secundária.	61
Figura 39: Modos de ruptura dos provetes da T4 (à esquerda) e detalhe da ruptura (à direita).	62
Figura 40: Modos de ruptura dos provetes da T5 (à esquerda) e detalhe da ruptura (à direita).	62
Figura 41: Modos de ruptura dos provetes da T6 (à esquerda) e detalhe da ruptura (à direita).	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tipos de revestimentos de barras de FRP. _____	22
Tabela 2: Comprimento médio, em milímetros, dos provetes das telas de GFRP, utilizados nos ensaios de diâmetro efetivo e teor de fibra. _____	39
Tabela 3: Diâmetros e áreas efetivas da direção principal das telas de 4 mm. _____	52
Tabela 4: Diâmetros e áreas efetivas dos laços da direção secundária das telas de 4 mm. _____	52
Tabela 5: Diâmetros e áreas efetivas entrelaços da direção secundária das telas de 4 mm. _____	53
Tabela 6: Diâmetros e áreas efetivas da direção principal das telas de 5 mm. _____	53
Tabela 7: Diâmetros e áreas efetivas da direção secundária das telas de 5 mm. _____	53
Tabela 8: Diâmetros e áreas efetivas da direção principal das telas de 6 mm. _____	54
Tabela 9: Diâmetros e áreas efetivas da direção secundária das telas de 6 mm. _____	54
Tabela 10: Diâmetros e áreas efetivas das diferentes telas de GFRP (média $\pm$ desvios-padrão) _____	55
Tabela 11: Teor de fibra de tela T4. _____	55
Tabela 12: Teor de fibra de tela T5. _____	56
Tabela 13: Teor de fibra de tela T6. _____	56
Tabela 14: Teor de fibras de vidro das diferentes telas de GFRP (média $\pm$ desvios-padrão) _____	56
Tabela 15: Tensão de tração, módulo de elasticidade e deformação dos provetes da tela T4. _____	58
Tabela 16: Tensão de tração, módulo de elasticidade e deformação dos provetes da tela T5. _____	58

Tabela 17: Tensão de tração, módulo de elasticidade e deformação dos provetes da tela T6 _____ 58

Tabela 18: Propriedades mecânicas das diferentes telas de GFRP (média $\pm$ desvios-padrão) _____ 59

LISTA DE SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI - *American Concrete Institute*

BFRP - *Basalt Fiber Reinforced Polymer*

CFRP - *Carbon Fiber Reinforced Polymer*

CSA - *Canadian Standards Association*

ELS - Estado Limite de Serviço

ELU - Estado Limite Último

FRP - *Fiber Reinforced Polymer*

GFRP - *Glass Fiber Reinforced Polymer*

HW - *Helically Wrapped*

HWSC - *Helically Wrapped and Sand Coated*

IFMA - Instituto Federal do Maranhão

ISO - *International Organization for Standardization*

LVDTs - *Linear Variable Differential Transformers*

N/A - Não aplicável

NBR - Norma Brasileira

NEFMAC - *New Fiber Composite Material for Concrete*

PN - Projeto de norma

Rb - *Ribbed*

SC - *Sand Coated*

SINFRA - Superintendência de Infraestrutura

UFMA - Universidade Federal do Maranhão

SUMÁRIO

RESUMO	6
ABSTRACT	7
LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABELAS	11
LISTA DE SIGLAS	13
1. INTRODUÇÃO	15
1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS	15
1.2 JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO	16
1.3 OBJETIVOS	18
1.3.1 <i>Objetivo geral</i>	18
1.3.2 <i>Objetivos específicos</i>	18
1.4 ORGANIZAÇÃO DA MONOGRAFIA	18
2. REFERENCIAL TEÓRICO	20
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	20
2.2 CARACTERÍSTICAS DAS BARRAS E TELAS DE GFRP	22
a. <i>Barras de GFRP</i>	22
b. <i>Telas de GFRP</i>	24
2.3 APLICAÇÕES E ESTUDOS COM TELAS DE GFRP	26
2.4 RECOMENDAÇÕES NORMATIVAS PARA O USO DE TELAS DE FRP	33
2.5 CONCLUSÕES GERAIS	34
3. METODOLOGIA	36
3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS	36
3.2 PREPARAÇÃO DOS PROVETES	36
a. <i>Nomenclatura dos provetes</i>	37
b. <i>Descrição visual das barras das telas</i>	38
c. <i>Preparação dos provetes</i>	39
3.3 DETERMINAÇÃO DO DIÂMETRO EFETIVO.	41
3.4 DETERMINAÇÃO DO TEOR DE FIBRA PELO MÉTODO DA COMBUSTÃO.	43
3.5 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E DO MÓDULO DE ELASTICIDADE.	47

<i>a. Preparação dos provetes</i>	47
<i>b. Adaptação da ancoragem por chapas metálicas.</i>	48
<i>c. Ensaio das telas de GFRP.</i>	49
<i>d. Expressão dos resultados.</i>	50
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	52
4.2 DIÂMETRO E ÁREA EFETIVA	52
4.3 TEOR DE FIBRA PELO MÉTODO DA COMBUSTÃO	55
4.4 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA	57
4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	63
5. CONCLUSÃO	65
REFERÊNCIAS	67
ANEXO I	70

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações gerais

A durabilidade das construções de concreto armado é um relevante requisito de qualidade das estruturas, recomendado pela ABNT NBR 6118 (2023), especialmente para aquelas construídas em locais expostos a agentes agressivos. Neste cenário, os materiais compósitos poliméricos, nomeadamente os polímeros reforçados com fibras (FRP, do inglês *Fiber Reinforced Polymer*), em forma de barras, apresentam-se como uma alternativa de substituição às armaduras convencionais de aço, como armadura interna em construções novas, as quais estão sujeitas à corrosão em ambientes agressivos.

Dentre as muitas fibras, destacam-se as fibras de vidro (GFRP, do inglês *Glass Fiber Reinforced Polymer*), cuja aplicação na construção civil aumentou, desde a década de 1970, devido à elevada resistência à corrosão e à sua favorável relação entre resistência e peso. Atualmente, as aplicações em construções novas do GFRP consistem em barras como armadura interna em estruturas de concreto armado, validadas por meio de recomendações de normativas internacionais de dimensionamento e verificação, como a ACI 440.1R-15 (2015) e a CSA S806-12 (2021); e, no Brasil, as normas ABNT NBR 17196 (2025) e ABNT NBR 17201 (2025) que tratam, respectivamente, de projetos estruturais de concreto armado com barras de GFRP e BFRP (do inglês, *Basalt Fiber Reinforced Polymer*), e a caracterização normativa destas barras.

Ainda relativamente ao uso das barras de FRP como armaduras internas, outra relevante aplicação consiste na conformação de telas, que diferentemente das barras não apresentam recomendações normativas ainda vigentes. Essas telas podem ser pré-fabricadas, como o sistema japonês NEFMAC (do inglês, *New Fiber Composite Material for Concrete*), com aplicação em túneis e construções subterrâneas por conta de sua leveza, resistência à corrosão elevada e facilidade de instalação (Clark, 1996).

Por conta da resistência à corrosão do FRP, o uso de telas com este material tem se difundido em regiões litorâneas, zonas industriais ou áreas expostas a agentes de descongelamento. A densidade reduzida do FRP (cerca

de 25% comparada à do aço) possibilita um transporte mais rápido e uma construção mais leve e segura daquelas estruturas (Benmokrane, 2016).

Além disso, as telas de GFRP seguem a mesma característica das barras, possuindo alta resistência à tração na direção das fibras, assegurando, assim, uma boa capacidade de carga nas utilizações estruturais. Soma-se a isto outro benefício significativo, que consiste na sua transparência eletromagnética, permitindo a aplicação das telas de GFRP em estruturas que abrigam equipamentos sensíveis, como hospitais e laboratórios (ACI 440.1R-15, 2015).

Apesar da conhecida eficiência das telas de GFRP, ainda há reduzida quantidade de informações acerca do seu comportamento resistente, o que compromete a segurança, eficiência e dimensionamento de elementos estruturais de concreto armado, tornando necessários ainda muitos estudos antes de aumentar sua aplicação e comercialização.

1.2 Justificativa e motivação

O Brasil é um país tropical com uma vasta costa litorânea, onde se encontram as principais cidades do país, principalmente, as capitais dos estados brasileiros. Dentre essas cidades litorâneas, oito são capitais dos estados do nordeste brasileiro, como por exemplo a cidade de São Luís. Todas elas apresentam um ambiente agressivo às estruturas de concreto armado com aço convencional. Com isso, materiais que são mais resistentes que o aço às intempéries corrosivas são as alternativas buscadas para as construções civis com concreto armado. Dentre esses materiais, as barras de GFRP tornam-se uma opção viável e atrativa para substituir as barras de aço por serem mais duráveis nestes ambientes, além de serem mais leves, reduzindo as dimensões das estruturas de concreto e, portanto, o gasto com materiais.

Embora as barras sejam o produto de FRP mais difundido, o uso crescente de telas de GFRP, por suas características de durabilidade, torna necessária a normatização para o dimensionamento de elementos estruturais, ainda ausente no Brasil tanto para a caracterização quanto para o dimensionamento com este produto. Ademais, pesquisas técnicas acerca do comportamento deste material e de suas propriedades mecânicas ainda são insuficientes para tal elaboração de normas técnicas. Com isso, o

dimensionamento de estruturas de concreto armado com telas de GFRP, bem como a comercialização deste produto são prejudicados, implicando no atraso e limitação da implementação desta tecnologia na construção.

Além disso, os elementos estruturais, como lajes de concreto armado, construídos com uso de telas de polímeros reforçados com fibras, podem estar sujeitos a ações estáticas, dinâmicas, elevadas temperaturas, entre outros, que necessitam de uma adequada caracterização de suas propriedades como teor de fibras, módulo de elasticidade e resistência à tração. Destaca-se, ainda, o fato de que os GFRPs apresentam notavelmente um comportamento elástico-linear até a ruptura de caráter frágil em virtude da ausência de escoamento, que precisa ser caracterizada com adequada eficiência, para as condições de projeto.

O processo produtivo de determinados tipos de telas de GFRP cria laços em uma direção, por onde as barras de GFRP, da outra direção, passam internamente. Essa configuração pode gerar zonas de menor resistência e resultar em rupturas prematuras, tornando indispensável a sua adequada caracterização. As barras de GFRP apresentam um comportamento unidirecional, porém as telas de GFRP exibem um comportamento resistente bidirecional, cuja eficiência depende do desempenho da zona dos laços.

Com as poucas informações resultantes do reduzido número de pesquisas com telas de GFRP, o comportamento das mesmas ainda exhibe diversas questões no que tange ao uso estrutural, comprometendo diretamente a segurança da edificação. O impacto deste cenário resulta na pouca competitividade em relação às telas de aço, pois estas têm um comportamento já conhecido e seguro quanto à sua ruptura dúctil.

Para que o uso das telas de GFRP seja mais acessível, confiável e seguro, faz-se necessária a caracterização de suas propriedades mecânicas, com vista a fornecer parâmetros que contribuem com a caracterização e dimensionamento de estruturas de concreto armado com telas de GFRP que suportem as ações e forneçam segurança.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Caracterizar o comportamento mecânico das telas de GFRP através de ensaios experimentais.

1.3.2 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral será necessário realizar as seguintes atividades como objetivos específicos:

(i) Revisar a literatura técnica nacional e internacional sobre as características das telas de GFRP;

(ii) Caracterizar as telas de GFRP, por meio de ensaios experimentais de determinação do diâmetro e área efetivos, teor de fibras e resistência à tração;

(iii) Analisar os resultados em comparação aos parâmetros mínimos da norma ABNT NBR 17201 (para barras de GFRP), avaliando a influência da configuração geométrica das telas e de suas interseções (laços) na resistência mecânica final.

1.4 Organização da monografia

A monografia, resultado deste projeto, foi organizada com a introdução, explicando-se a motivação e justificativa para a presente pesquisa com telas de GFRP.

Em seguida, o capítulo 2 consiste do estado da arte referente às telas de GFRP. Neste sentido, abordam-se as características deste produto, com destaque para as barras, como também as aplicações e estudos realizados até a presente data. Ademais, as considerações sobre as recomendações normativas e características de projetos com telas de GFRP; e, informações sobre as metodologias para caracterização mecânica.

Quanto ao capítulo 3, descrevem-se as características dos ensaios de caracterização que foram realizados com as telas de GFRP, especificando cada metodologia adotada.

Relativamente ao capítulo 4, são apresentadas as análises dos resultados obtidos, mostrando através de gráficos e registros os resultados dos ensaios

experimentais, realizando-se a adequada comparação ao mínimo normativo para as barras de GFRP.

Finalmente, no capítulo 5, apresenta-se as conclusões que os resultados deste trabalho levaram, recomendações para futuros estudos acerca do mesmo tema e qual a contribuição que estes resultados darão à sociedade acadêmica.

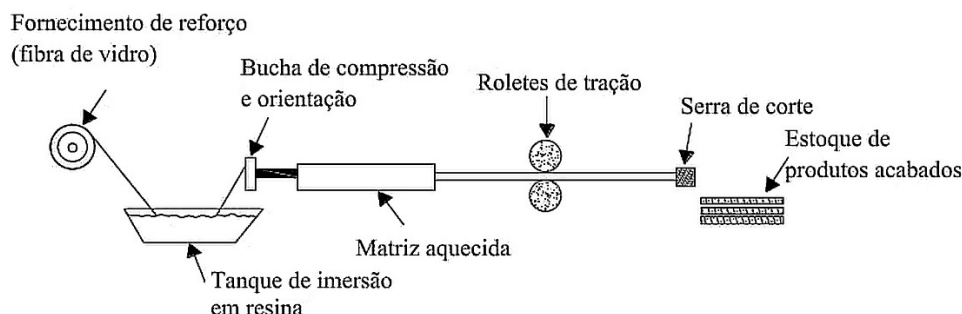
2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Considerações iniciais

Os FRPs apresentam-se como uma classe de materiais compósitos caracterizada pela combinação de uma fase de matriz polimérica e uma outra fase de reforço de fibras. A matriz, tipicamente composta por resinas como epóxi ou viniléster, tem a função de conectar e proteger as fibras (Dalfré *et al*, 2022).

Estas fibras, com sua elevada resistência e rigidez, são responsáveis por suportar a maior parte dos esforços mecânicos. Dos tipos de produção de barras de GFRP, o mais comum consiste no processo de pultrusão, no qual as mechas de fibras, com filamentos contínuos e unidirecionais, são tratadas quimicamente, como referido na NBR 17196 (ABNT, 2025a), resultando na conformação de barras, como mostrado na Figura 1. O principal objetivo dessa combinação é aliar as características de resistência e elevada rigidez das fibras com as propriedades de leveza, facilidade de processamento e capacidade de moldagem da matriz polimérica (Callister e Rethwisch, 2016).

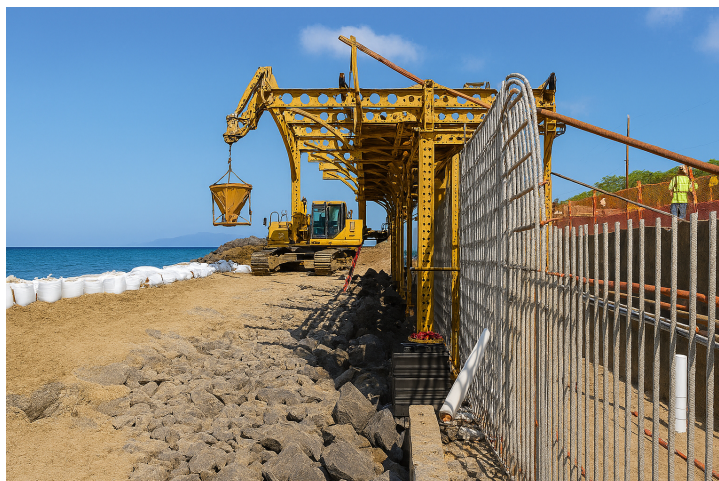
Figura 1: Diagrama do processo de pultrusão de barras de GFRP.



Fonte: Adaptado de Tighiouart *et al.*, 1998.

De acordo com o ACI 440.1R (2015), a aplicação de barras de GFRP em estruturas de concreto é extremamente benéfica em ambientes agressivos, devido sua elevada resistência à corrosão. Podem ser empregadas em substituição das barras de aço em estruturas de concreto armado como pontes e viadutos construídas em áreas litorâneas, estações de tratamento de esgoto, túneis de mineração e fachadas de concreto expostas a condições climáticas adversas, como mostra a Figura 2, construída em ambiente marinho.

Figura 2: Construção de cais de proteção (seawall) com barras de GFRP.



Fonte: ACI 440.1R, 2015.

Aplicadas como telas estruturais, as barras de GFRP são posicionadas como malhas bidimensionais ou tridimensionais, mantendo espaçamentos regulares entre os fios, como mostrado na Figura 3. As telas de GFRP podem atuar como armadura interna para diversos sistemas estruturais, tais como sistemas de concreto, de alvenaria ou de compósitos poliméricos. A principal função dessas telas é a capacidade de resistir eficientemente aos esforços de tração, além de contribuir para o controle de fissuras, o aumento da durabilidade e o aprimoramento do desempenho mecânico global das estruturas (Nanni, 1993; ACI 440.1R-15, 2015).

Figura 3: Telas de GFRP em laje bidirecional.



Fonte: Stratus, 2024.

Desta maneira, neste capítulo são apresentadas as características das telas de GFRP, descrevendo suas aplicações mais gerais, seu comportamento mecânico e tipos, bem como as aplicações e estudos técnicos. Outrossim,

também serão abordadas recomendações normativas que podem ser utilizados para o uso das telas de GFRP em elementos de concreto armado.

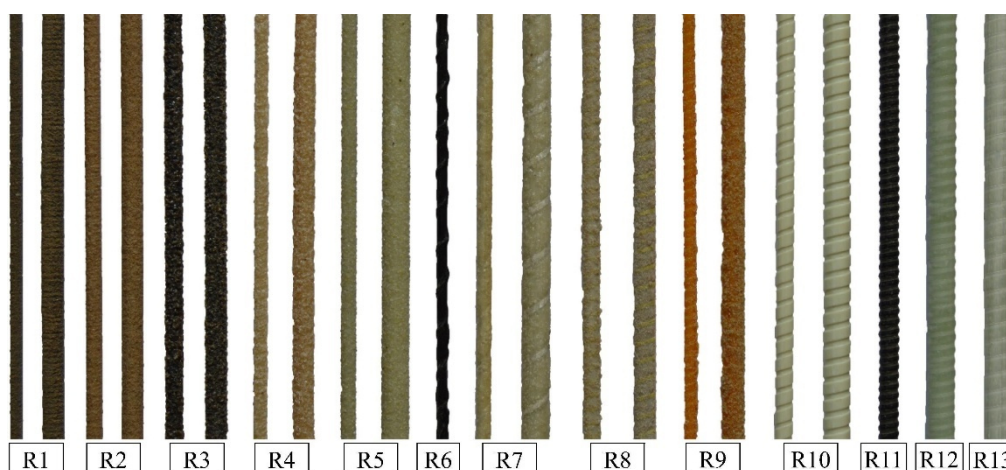
2.2 Características das barras e telas de GFRP

a. Barras de GFRP

As barras de GFRP apresentam muitas características vantajosas, dentre as mais atrativas a leveza, com um peso que varia entre um quarto e um quinto do aço (ACI 440.1R-15, 2015). Essa propriedade facilita o transporte, manuseio e instalação em canteiros de obra.

Há, também, variados tipos de revestimentos das barras de GFRP, que exibem ou não a presença de nervuras ou de algum acabamento, como com areia, que evite o escorregamento, aumentando a aderência da superfície da barra. Estes tipos são mostrados na Figura 4 e listados na Tabela 1.

Figura 4: Tipos de acabamento de barras de FRP.



Fonte: Solyom e Balázs, 2020.

Tabela 1: Tipos de revestimentos de barras de FRP.

ID	Revestimento	Material	Resina
R1	Revestido com areia (SC)	Basalto	Poliamina
R2	SC	Vidro	Poliamina
R3	SC	Basalto	Poliamina
R4	SC	Vidro	Poliamina
R5	SC	Vidro ECR	Éster vinílico
R6	Enrolado helicoidal (HW)	Vidro	N/A
R7	HW e SC (HWSC)	Vidro ECR	Éster vinílico
R8	HWSC	Vidro ECR	Epóxi
R9	HWSC	Vidro ECR	Epóxi

R10	Entalhado (In)	Vidro ECR	Éster vinílico
R11	Nervurado (Rb)	Basalto	Éster vinílico
R12	Rb	Vidro ECR	Éster vinílico
R13	Rb	Vidro ECR	Éster vinílico
R14	Aço	Aço	—

Adicionalmente, as barras de GFRP são não corrosivas, o que as torna imunes à corrosão eletromagnética em condições agressivas. Essa durabilidade intrínseca elimina a necessidade de cobrimentos excessivos de concreto e reduz custos de manutenção a longo prazo (FIB Bulletin 40, 2007).

Outra característica importante consiste na transparência eletromagnética e não condutividade elétrica, o que as torna eficientes em aplicações que exigem isolamento elétrico, como nos trens de levitação magnética (Figura 5) (ACI 440.1R-15, 2015).

Figura 5: Trem de levitação magnética no Japão.

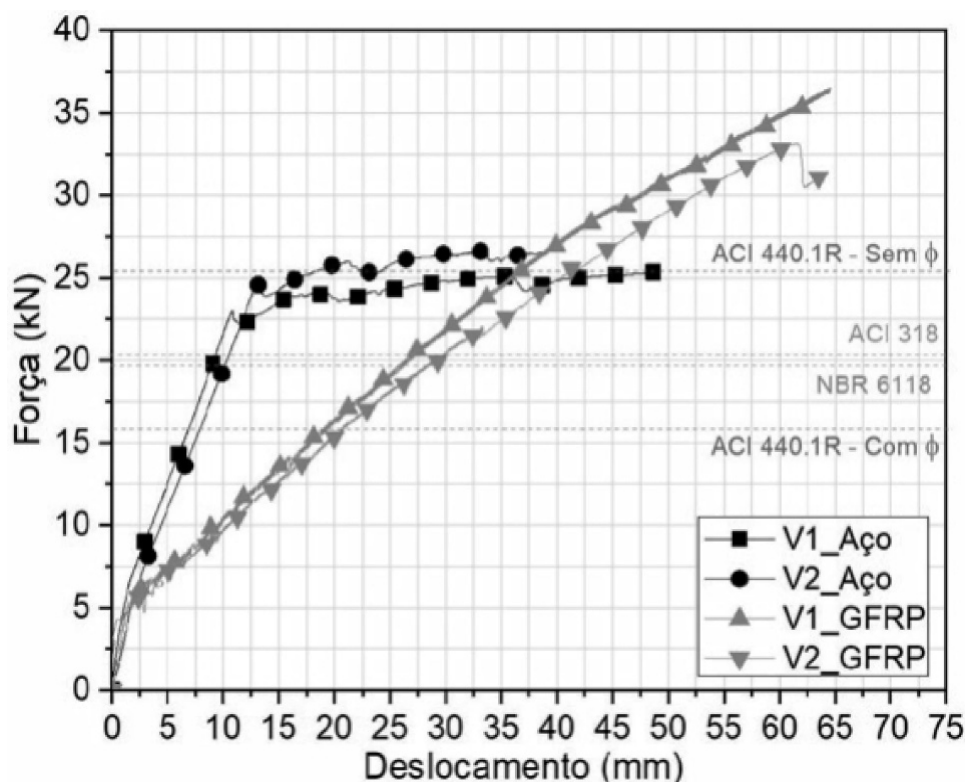


Fonte: FIB Bulletin 40, 2007.

Conforme Dalfré *et al.* (2021), quanto ao seu comportamento mecânico, diferente das armaduras de aço convencionais, as armaduras de GFRP exibem um comportamento elástico-linear até a ruptura, como visto na Figura 6, onde são comparadas as respostas resistentes de vigas de concreto armadas com aço convencional (V1_Aço e V2_Aço) com aquelas vigas armadas com barras de GFRP (V1_GFRP e V2_GFRP). Nota-se neste gráfico, as vigas com barras de GFRP exibiram um comportamento resistente linear, devido à ausência do escoamento, resultando no modo de ruptura frágil; diferentemente, as vigas com

barras de aço, exibiram um patamar de resistência, característico do escoamento destas barras, resultando num comportamento mais dúctil. Deste modo, as estruturas armadas com barras não metálicas apresentam o comportamento estrutural controlado pela deformação excessiva das peças, ou seja, pelas condições de serviço ao invés da condição última, típico das armaduras de aço convencionais.

Figura 6: Relação força *versus* deslocamento de vigas de concreto com barras de aço e GFRP



Fonte: Dalfré *et al.*, 2021.

Por fim, o fenômeno de fluência sob altas temperaturas pode levar à ruptura em tensões menores que a resistência de curta duração: A maioria dos materiais começa a exibir fluência significativa quando as cargas são impostas a temperaturas que excedem 40% de suas temperaturas de fusão. Já as resinas termofixas não têm temperaturas de fusão bem definidas, mas tendem a se degradar quando submetidas a aumentos de temperatura de cerca de 100°C acima da temperatura ambiente, necessitando de atenção especial no dimensionamento (FIB Bulletin 40, 2007).

b. Telas de GFRP

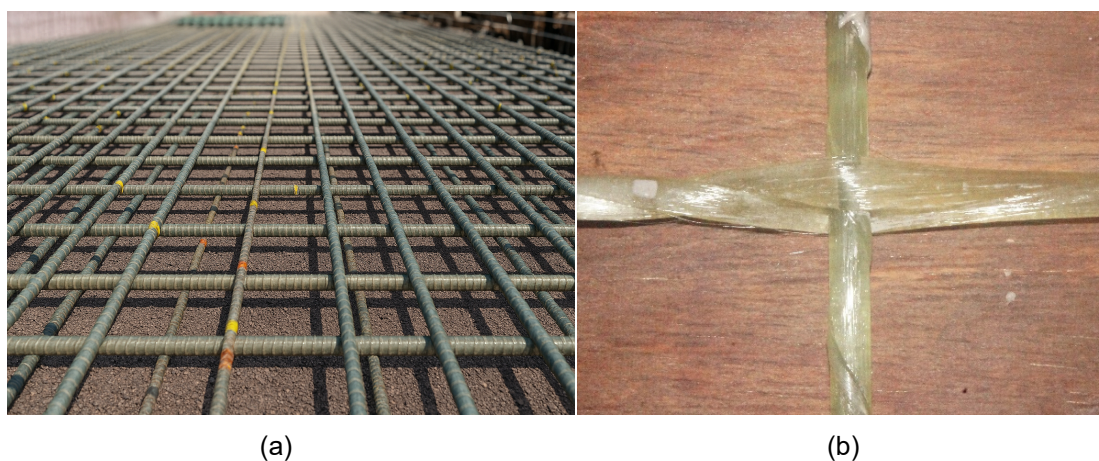
As telas de GFRP são elementos de reforço formados pela união de barras de GFRP em uma configuração de grade, oferecendo vantagens

específicas em diversas aplicações estruturais. A facilidade de manuseio e instalação é uma característica primordial, impulsionada pelo baixo peso do material, o que agiliza o processo de montagem em canteiros de obra e reduz a necessidade de equipamentos pesados (ACI 440.1R-15, 2015).

No que tange à fissuração das estruturas de concreto armado, apesar do menor módulo de elasticidade do GFRP em comparação ao aço, a distribuição homogênea das barras na tela pode ser eficaz na limitação da abertura de fissuras, especialmente em elementos com grande área superficial, como lajes e pavimentos de concreto (FIB Bulletin 40, 2007).

A forma como as barras são unidas nos cruzamentos da tela (por soldagem térmica, amarração ou aderência) também influencia diretamente o comportamento estrutural e a capacidade de carga do elemento reforçado. Dentre estes cruzamentos, os mais comuns no mercado são o posicionamento justaposto (Figura 7a) e em forma de nó-inglês (Figura 7b). Neste último caso, a seção da barra na direção secundária é dividida ao meio, formando um espaço o qual é passada a barra de GFRP da direção principal.

Figura 7: Telas de GFRP (a) com barras justapostas e em (b) nó-inglês.



Fonte: (a) Ernest Maier, 2024; e (b) Autor, 2026.

A utilização do nó-inglês apresenta como vantagens o ganho de produção na fabricação, a ocupação de menos espaço de armazenamento, a facilitação da logística e a montagem em obra com menor mão de obra. A forma de armazenamento e condução é feita em rolos, como mostrado na Figura 8.

Figura 8: Rolo de tela de fibra de vidro armazenado em fábrica.



Fonte: Composite Tech, 2025.

A caracterização das telas de GFRP ainda não é normatizada, o que limita o entendimento do comportamento de estruturas armadas com elas, mesmo apresentando características semelhantes às barras de GFRP isoladas. Os estudos presentes na literatura nacional e internacional acerca de telas de GFRP ainda são escassos, sendo que parte dos publicados tem informações que são insuficientes para elaboração de recomendações normativas que atendam a projetos, dimensionamento e caracterização de elementos estruturais com este produto. Um fato que mostra isso é de existirem apenas duas normas publicadas na literatura brasileira [ABNT NBR 17196 (2025) e ABNT NBR 17201(2025)] e que apenas atendem às barras de GFRP.

Por isso a importância de estudos, que caracterizam o comportamento de telas de GFRP, a fim de mitigar incertezas que comprometem a segurança das estruturas armadas com as mesmas.

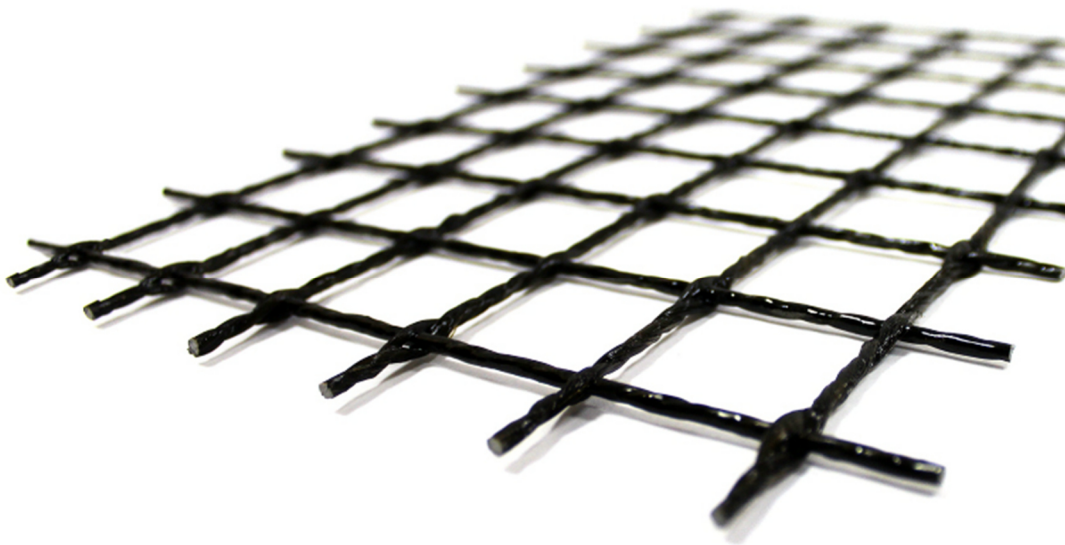
2.3 Aplicações e estudos com telas de GFRP

Estudos recentes acerca do uso de telas de GFRP em elementos estruturais de concreto armado, utilizando-a como alternativa ao aço, estão em crescente desenvolvimento.

Matthys e Taerwe (2000) estudaram o comportamento estrutural de lajes de concreto sob flexão unidirecional, apresentando resultados experimentais e analíticos detalhados, com foco na garantia de um comportamento eficiente em

condições de serviço. Para a pesquisa, foram utilizadas telas de GFRP do tipo NEFMAC, como a da Figura 9, fabricadas com fibras contínuas e impregnadas. Os tipos de telas testadas incluíram o tipo C, feito com fibras de carbono, e o tipo H, uma mistura de fibras de carbono e vidro. A laje de referência, reforçada com telas de aço, apresentou uma carga última de 26,5 kN e uma deflexão de 190 mm, enquanto as lajes reforçadas com telas de GFRP, projetadas para ter rigidez comparável, apresentaram cargas últimas significativamente mais altas (variando de 66,5 kN a 96,5 kN) e deflexões últimas entre 210 mm e 270 mm.

Figura 9: Tela NEFMAC produzida no Brasil.

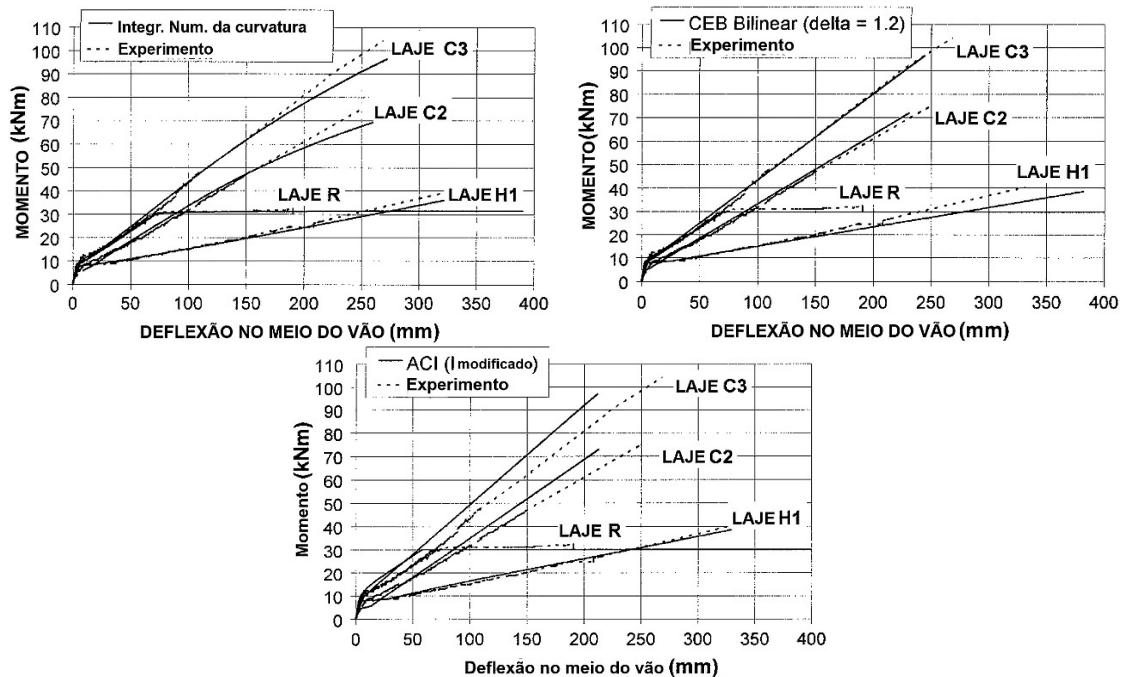


Fonte: Haizergroup, 20--.

Ainda foram comparados as curvas de Momento-Deflexão, obtidas pelos métodos de integração da curvatura $1/r$, bilinear CEB (CEB, 1985) e da ACI 318 (ACI, 1995), como mostra a Figura 10. As lajes C2 e C3 foram armadas com telas de fibras de carbono, enquanto que a laje H1 foi armada com uma mistura de carbono e vidro. A laje R é a laje de referência, armada com barras de aço.

As curvas mostram um comportamento conservador, reduzindo a carga máxima que a laje deveria suportar, através do método de curvatura, o que também acontece no método bilinear nas lajes analisadas. Em contrapartida, há uma superestimação das resistências das lajes quando analisadas através do método ACI em comparação aos resultados obtidos durante o experimento.

Figura 10: Comparação das curvas experimentais de Momento-Deflexão com as curvas obtidas por diferentes métodos de cálculo



Fonte: Adaptado de Matthys e Taerwe, 2000a

Os autores concluíram que o projeto de lajes com telas de GFRP deve ser governado por critérios de serviço, como o controle de deflexão, devido ao baixo módulo de elasticidade do GFRP, o que limita a utilização de sua alta resistência à tração. Na Figura 11 são comparadas os aspectos finais das lajes armadas com telas de aço (acima) e telas de GFRP (abaixo), que apresentou um deformada evidente, após a ruptura, em virtude das deformações permanentes das barras de aço, o que não ocorre com as telas de GFRP, que apresentam um comportamento elástico-linear.

Figura 11: Laje com telas de aço sobre a laje com telas de GFRP, após atingirem a ruptura.



Fonte: Matthys e Taerwe, 2000a

A pesquisa anterior foi expandida pelos mesmos autores para o funcionamento em lajes de concreto armado com telas de FRP (Matthys e Taerwe, 2001), com foco em lajes de piso plano e certas configurações de decks de pontes. Um total de 17 ensaios de punção foram realizados em lajes quadradas. A pesquisa utilizou telas de aço (barras com nervuras) e também telas de FRP de diferentes tipos, incluindo telas de carbono (*CFRP Carbon-Stress*) com diâmetro de 5 mm e telas NEFMAC dos tipos C (fibras de carbono) e H (uma mistura de fibras de vidro e carbono).

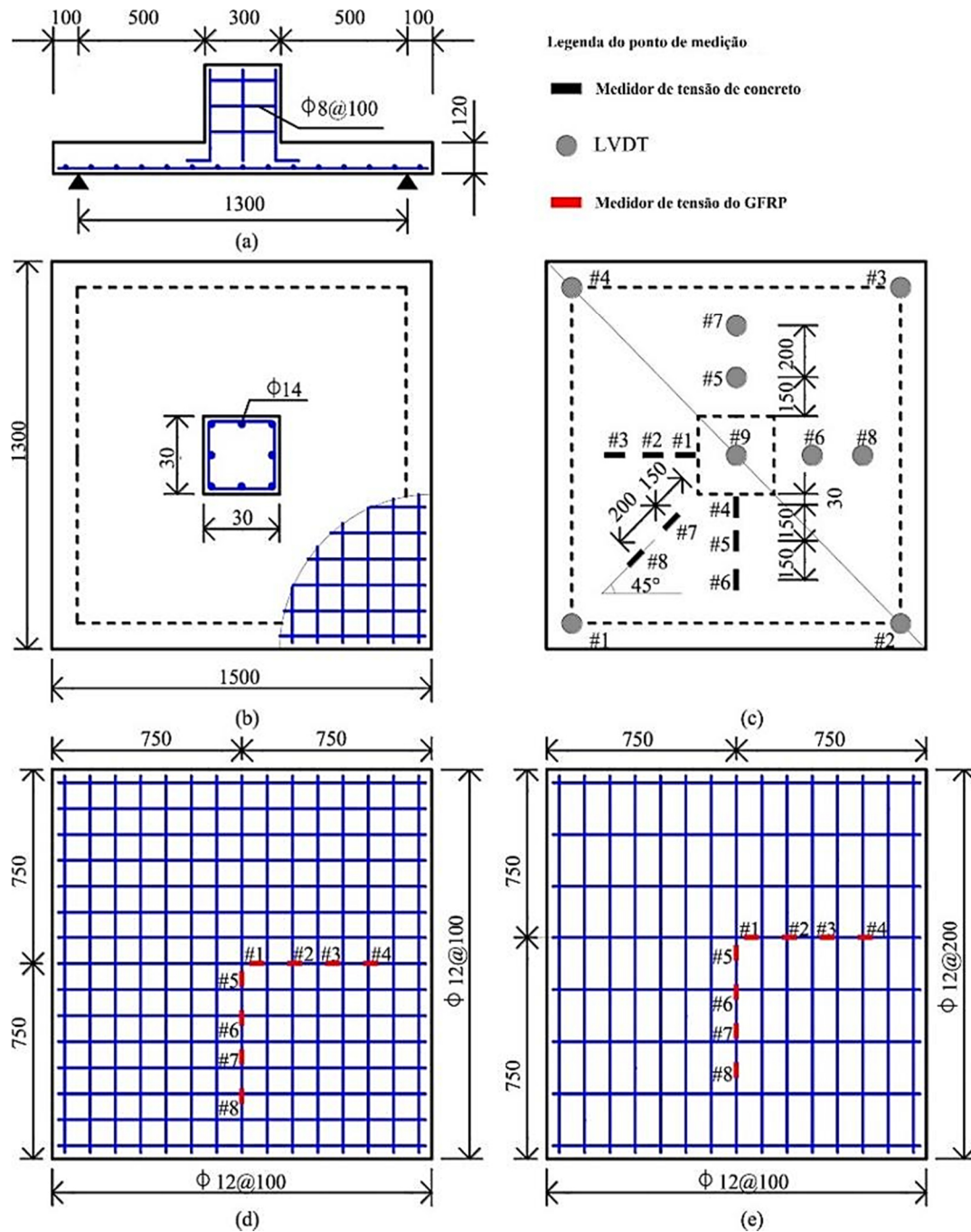
Os autores demonstram que para atingir uma resistência ao funcionamento comparável às lajes de referência com telas de aço, as lajes com telas de FRP necessitaram de uma maior rigidez à flexão, obtida por meio de uma maior taxa de reforço ou maior espessura da laje, a fim de satisfazer os critérios de serviço. Os estudos analíticos indicaram que os modelos baseados em códigos existentes, como o MC90 e o Eurocode 2, superestimaram a resistência de lajes com telas de FRP de baixo módulo de elasticidade, a menos que a rigidez axial do reforço fosse considerada através da taxa de reforço equivalente ($\rho \cdot E_r / E_c$), sendo ρ a taxa de armadura longitudinal, E_r o módulo de elasticidade do material da armadura e E_c o módulo de elasticidade do concreto. A incorporação dessa modificação nos modelos de código resultou em previsões seguras e consistentes.

Wu *et al.* (2025) estudaram experimentalmente o desempenho ao funcionamento de 12 lajes de concreto armado com telas de GFRP sob cargas concentradas, sendo seus arranjos mostrados na Figura 12. Os resultados mostraram que o aumento da resistência à compressão do concreto de 30 MPa para 50 MPa resultou em um aumento da carga, antes da fissuração, em 33% e a carga máxima, antes da ruptura, em 11%. Além disso, um aumento de 46% e 52% na taxa de reforço aumentou a capacidade de carga máxima em, apenas, 5% e 7%, respectivamente.

A análise dos resultados demonstrou que as lajes armadas com telas GFRP apresentaram uma ruptura típica por cisalhamento por punção, sem esmagamento do concreto ou ruptura das barras de GFRP, não controlada por flexão. A distribuição uniforme das grades de GFRP foi mais eficaz na melhoria do desempenho das lajes do que o simples aumento da taxa de reforço, pois

promoveu um desempenho mais eficaz entre concreto e armadura. A pesquisa concluiu que é fundamental considerar a contribuição das barras de GFRP na capacidade de cisalhamento por punção, levando em conta tanto a taxa quanto à disposição da armadura.

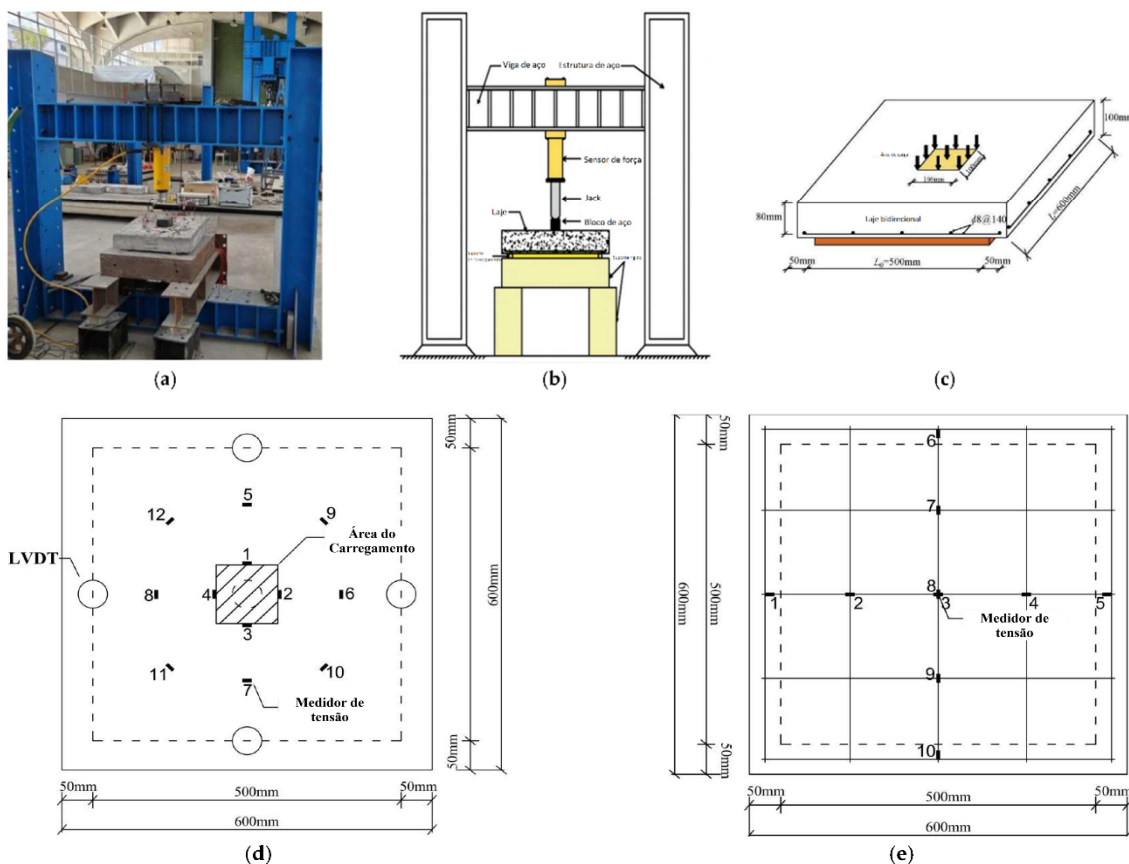
Figura 12: Elementos estruturais estudados (unidade: mm): (a) Dimensões da amostra (vista frontal); (b) Dimensões da amostra (vista superior); (c) Disposição dos extensômetros de concreto e LVDTs; (d) Tela de GFRP com malha quadrada (AXX) e pontos de medição de GFRP; (e) Tela de GFRP com malha retangular (SXX) e pontos de medição de GFRP.



Fonte: Adaptado de Wu *et al.* (2025)

Xie *et al.* (2025) também avaliaram a performance estrutural de lajes de concreto armado com barras de GFRP, comparando-as com aquelas armadas com barras de aço convencional, avaliando capacidade de carga, propagação de fissuras e absorção de energia. Embora não se refira explicitamente a "telas" no sentido de pré-fabricadas, o ensaio de lajes é parametrizado e valida o desempenho do sistema de armadura de GFRP (Figura 13), que pode ser tanto em barras individuais quanto em telas.

Figura 13: (a) Configuração do teste de flexão, (b) Sistema de ensaio; (c) Layout de laje GFRP bidirecional com barras reforçadas; (d) e (e) Arranjo dos medidores de tensão.



Fonte: Adaptado de Xie *et al.*, 2025.

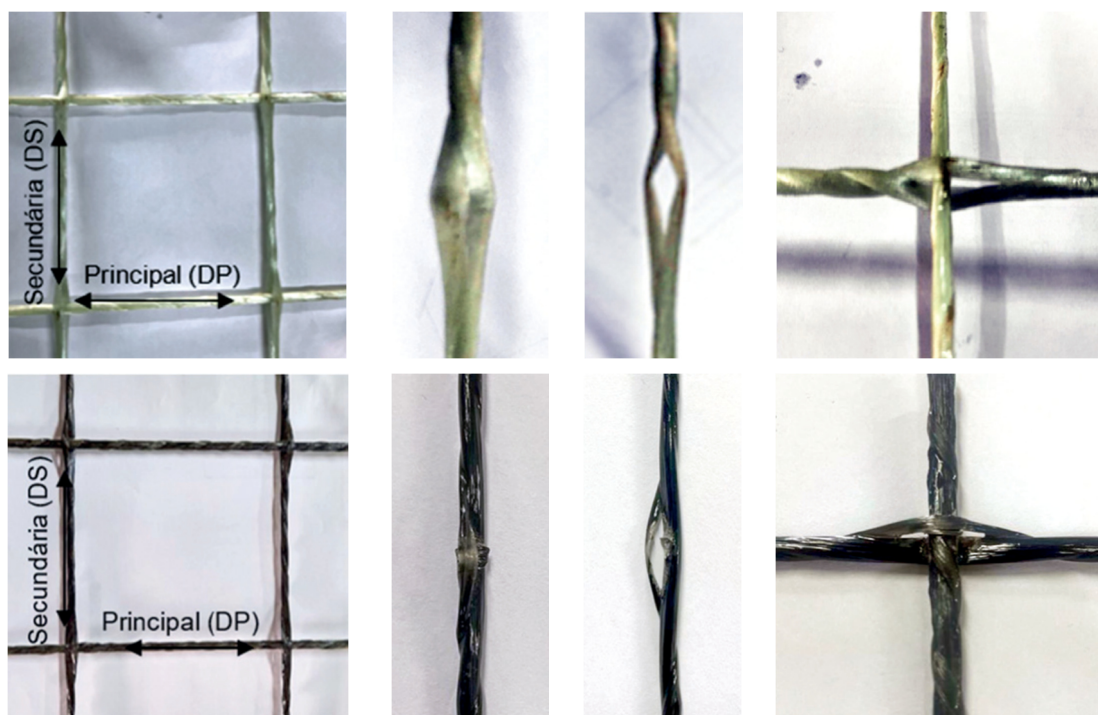
A pesquisa demonstrou que as lajes armadas com telas de GFRP alcançaram uma capacidade de carga comparável ao das lajes armadas com telas de aço. Essas lajes exibiram propagação de fissura progressiva e uma resistência do sistema 17% maior do que sistemas não reforçados com fibra. O estudo confirmou que as lajes armadas com telas de GFRP atendem a critérios estruturais importantes, como capacidade de flexão e resistência a fissuras.

Relativamente à caracterização de telas de GFRP, o estudo recente realizado por Dalfre e Mazzu (2025) avaliaram as características destas telas

aplicadas às estruturas de concreto armado. Neste trabalho destacaram-se as lacunas nos projetos de normas (PN) brasileiros de caracterização que haviam na época, bem como a que a área efetiva definida pela norma é inferior ao limite mínimo definido pelo PN.

O estudo concentrou-se em definir a resistência à tração e o diâmetro efetivo das telas de GFRP nas duas direções: principal e secundária; considerando a presença ou não de nós, onde a ausência de nós define a direção principal. O estudo teve como corpos de prova duas telas que continham dois tipos diferentes de nós: (i) telas que possuíam a distribuição de fibras em uma escala de 50/50 com barras dispostas acima e abaixo das barras da direção principal; e (ii) telas que continham uma distribuição não-uniforme, mostradas na Figura 14.

Figura 14: Nós tipo 1 (acima) e nós do tipo 2 (abaixo) das telas utilizadas na pesquisa.

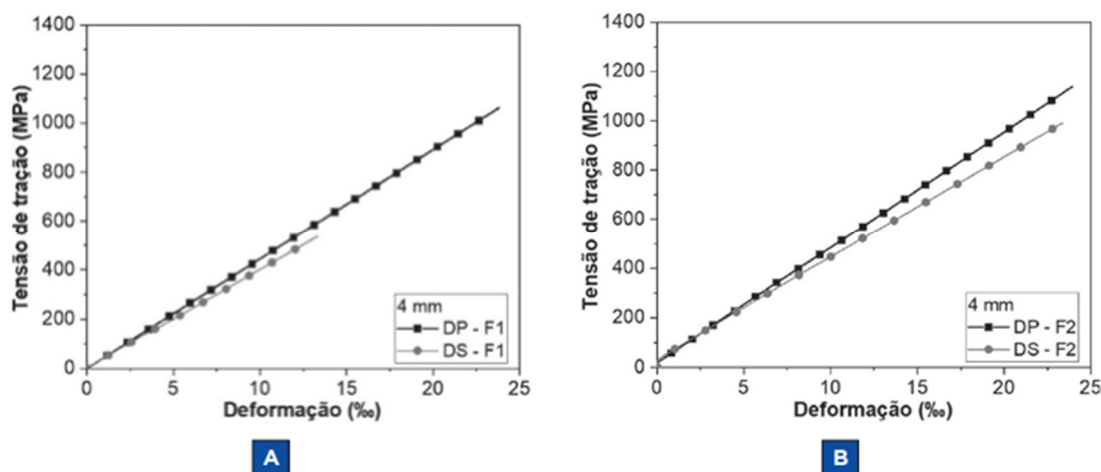


Fonte: Dalfre e Mazzu, 2025.

Neste estudo, verificaram que os nós interferem diretamente nas propriedades mecânicas entre as direções das telas, como mostrado na Figura 15, onde se compara os resultados das direções principais (DP) e secundárias (DS) das telas de nós do tipo 1 (F1) e nós do tipo 2 (F2), de diferentes fabricantes. Os resultados deste estudo indicaram decréscimos de resistência à tração, no módulo de elasticidade e na deformação final das telas de GFRP em média 50%,

9,9% e 44%, respectivamente, na direção secundária (com nós) das telas comparando com a direção principal (sem nós) nas telas das duas fabricantes.

Figura 15: Curvas experimentais tensão vs. deformação das telas de diferentes fabricantes



Fonte: Dalfre e Mazzu, 2025.

Com estes resultados, concluiu-se a necessidade de uma normatização que defina a direção com nós como pior cenário para o dimensionamento em favor da segurança de estruturas armadas com telas de GFRP.

Desta maneira, verifica-se que há poucos estudos na literatura nacional e internacional acerca do comportamento e aplicações de telas de GFRP.

2.4 Recomendações normativas para o uso de telas de FRP

As normas estabelecem um fundamento técnico sólido para a utilização de telas de FRP em várias aplicações, sendo essenciais para assegurar a confiabilidade e segurança desses materiais nas engenharias contemporâneas. Há normas técnicas, como a parte 4 da ISO 10406-1 (2015), que ainda estão em fase de elaboração e comentários.

No contexto nacional, foram apresentadas em 2025 as normas 17196 e 17201, ambas pela ABNT. A NBR 17196 (ABNT, 2025a) estabelece os critérios para o projeto e dimensionamento de estruturas de concreto armado que utilizam barras de FRP, como o GFRP, como armadura passiva, garantindo a segurança estrutural e durabilidade em cenários específicos da construção civil. Suas recomendações detalham os cálculos no Estado Limite Último (ELU) e de Serviço (ELS), o correto detalhamento de armaduras (ancoragem, espaçamento) e verificações a ações dinâmicas.

Enquanto isso, a NBR 17201 (ABNT, 2025b) estabelece os requisitos técnicos e os rigorosos métodos de ensaio necessários para a qualificação e especificação das barras de FRP, que serão utilizadas como armaduras em estruturas de concreto, garantindo assim que o material possua a resistência, módulo de elasticidade e durabilidade (especialmente em meio alcalino) exigidos para aplicação segura na construção civil. Ela exige dos fabricantes a comprovação, por meio de testes padronizados (como os de tração, cisalhamento e aderência), a confiabilidade dos lotes fabricados.

Não foi possível verificar a existência de normas brasileiras ou estrangeiras que normatizem o projeto ou a caracterização de telas de GFRP até o momento deste estudo. Portanto, projetos construídos com estes produtos são inviabilizados ou utilizam das características das barras isoladas para seu dimensionamento, sendo que isto pode comprometer a segurança por não ser normativo. Isso acrescenta a necessidade do estudo para caracterização das telas de GFRP.

2.5 Conclusões gerais

Como visto, as telas de GFRP são uma inovação com bastante potencial para armaduras em concreto armado de zonas com alta agressividade, como ambientes industriais ou marinhos, reduzindo custos com manutenção e garantindo aumento da vida útil das estruturas de concreto, além de alta resistência à tração das barras de FRP comparadas às de aço. Outro ponto é sua leveza, o que pode diminuir as dimensões da estrutura, tornando mais viável sua implementação.

Apesar deste potencial, pontos importantes para dimensionamento das estruturas de concreto armado com telas de GFRP ainda necessitam de atenção e definição normativa. O baixo módulo de elasticidade resulta em maior atenção aos critérios de atendimento ao ELS, principalmente com deformações excessivas das estruturas de concreto. Quanto ao ELU, recomenda-se a consideração de que a inelasticidade seja dirigida pelo esmagamento do concreto, em virtude do comportamento frágil das barras de GFRP.

Somado a tudo isso, a baixa quantidade de estudos que avaliam o comportamento das estruturas de concreto armado com materiais não metálicos impacta diretamente na caracterização do comportamento das telas de FRP.

Cabe destacar ainda que, elementos de concreto armados com telas de GFRP exibem vantagens em relação às convencionais com aço, como elevada resistência à tração e um menor peso (resultando em peças estruturais de menores dimensões, ganho de produção e redução de mão de obra); contudo, a falta de códigos normativos dificulta a aplicação na construção civil. A ausência de recomendações normativas para caracterização das telas e dimensionamento de elementos estruturais, reduz a aplicação e diminui a segurança dos projetistas em estruturas convencionais, promovendo a corrente utilização do aço convencional.

Com esses pontos, as telas de FRP, que são consideradas uma inovação, necessitam de mais estudos acerca da caracterização das propriedades mecânicas e comportamento para sua devida aplicação, que garantam segurança, durabilidade e confiança das estruturas de concreto armado.

3. METODOLOGIA

3.1 Considerações gerais

Neste capítulo, serão descritas as etapas de preparação e execução dos ensaios normativos de caracterização das telas de GFRP, a partir da descrição dos corpos de prova, equipamentos e dos detalhes dos métodos adotados.

Como não há ensaio normatizado para as telas de GFRP, os testes de caracterização foram feitos de acordo com a norma ABNT NBR 17201 (2025), que determina todas as metodologias para caracterização das propriedades, para garantia de conformidade das barras de GFRP em relação aos parâmetros mínimos de aceitabilidade. A metodologia consiste em avaliar as barras que compõem os provetes obtidos das telas de GFRP, permitindo uma melhor adequação com o necessário para a realização dos ensaios experimentais e comparação com os parâmetros de qualidade da norma, tanto na direção principal, quanto na direção secundária; método que é característico em estudos com telas de GFRP.

Os ensaios de caracterização realizados consistiram na determinação do diâmetro efetivo (ABNT NBR 17201, parte 02), determinação de teor de fibra (ABNT NBR 17201, parte 10) e ensaio de tração para determinação do módulo de elasticidade e resistência à tração (ABNT NBR 17201, parte 03). Cada um destes ensaios, além da preparação dos corpos de prova, será descrito no decorrer deste capítulo.

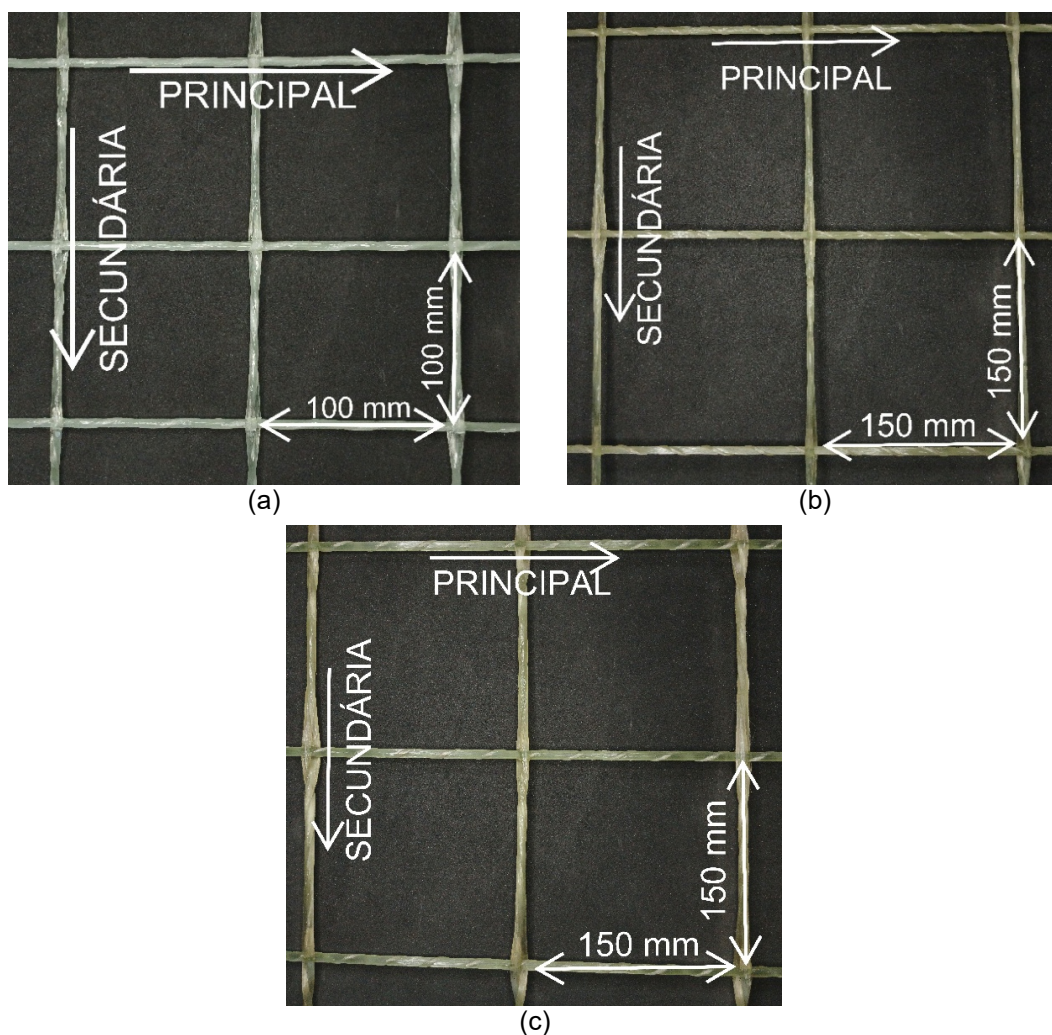
3.2 Preparação dos provetes

Todas as telas de GFRP utilizadas neste estudo foram doadas pela mesma fabricante que por motivos de autorização, será omitido seu nome neste estudo, que possui a expertise na produção de diversos produtos relativos aos FRPs, com destaque as barras e telas.

Em todos os ensaios normativos, as barras das telas de GFRP foram consideradas na direção principal, que são aquelas que passam no interior dos laços, e na direção secundária, que são aquelas com aberturas, denominadas de laços (ou seja, nós cuja barra é dividida, por cima e por baixo da barra principal) para passagem das barras principais. Além disso, o espaçamento

entre as barras das direções principal e secundária é diferente a partir do diâmetro: nas telas de 4 mm, o espaçamento entre barras é de 100 mm; na tela de 5 mm e 6 mm, o espaçamento é de 150 mm. Essas características são apresentadas na Figura 16.

Figura 16: Indicação de direções e espaçamentos de barras na telas com barra de diâmetro nominal de (a) 4 mm; (b) 5 mm; e (c) 6 mm.



Fonte: Autor, 2026.

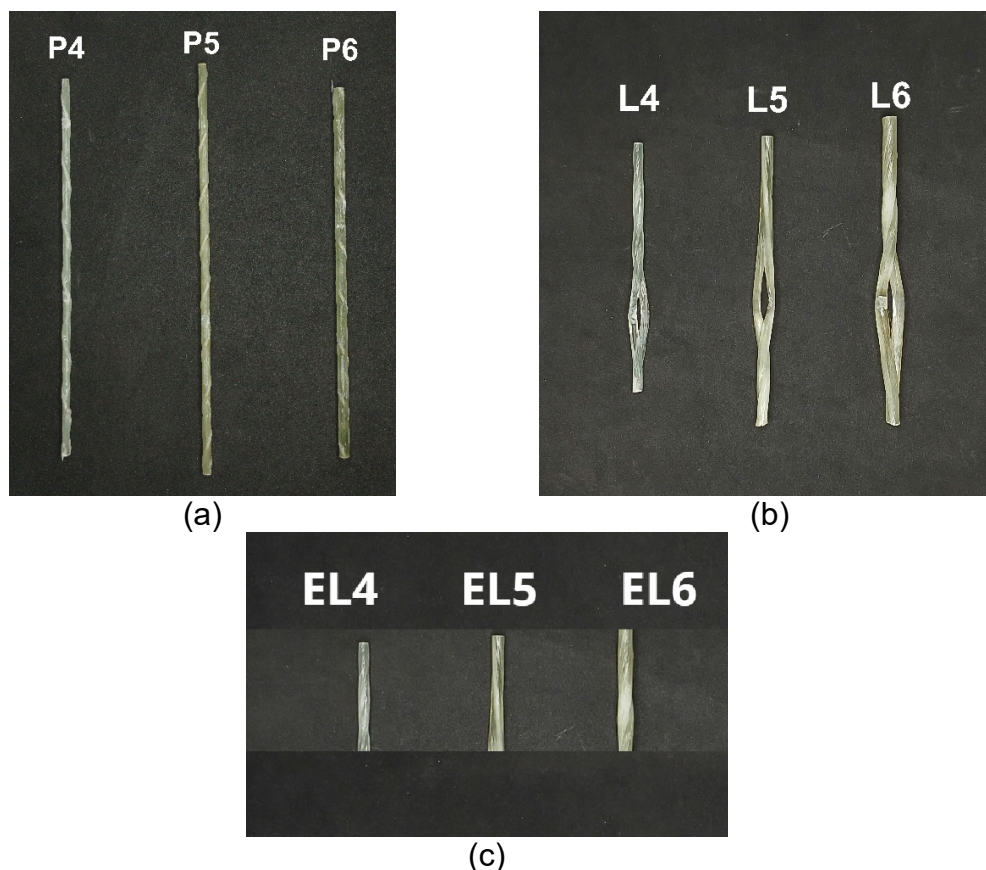
a. Nomenclatura dos provetes

Para uma melhor identificação dos provetes, considerou-se a seguinte nomenclatura: as telas foram identificadas pela letra “T” seguida do seu diâmetro nominal correspondente, como, por exemplo, T4 para telas de 4 mm. Enquanto que, as barras das telas foram identificadas de acordo com o diâmetro nominal, sendo utilizados os diâmetros de 4, 5 e 6 milímetros; e sua posição na tela, sendo P, para a barra na direção principal; EL, para barra entre laços na direção secundária; e L, para barras com laços na direção secundária.

b. Descrição visual das barras das telas

As barras da tela T4 apresentam coloração verde mais clara e nervuras, formadas por fibras enroladas de forma helicoidal, na direção principal; enquanto que na direção secundária, dois cordões de fibras se entrelaçam até o nó, onde há um espaçamento para passagem da barra principal e que não apresentam acabamento superficial com nervuras. O mesmo acontece com as T5 e T6. As diferenças entre elas, além do diâmetro nominal, é a coloração que vai escurecendo comparada à T4 e as fibras de vidro são mais visíveis através da resina, principalmente na direção secundária, podendo ser devido a tempo de cura diferente entre os diâmetros ou apenas escolha estética do fabricante já que as telas possuem o mesmo tipo de resina. A Figura 17 apresenta os provetes para as diferentes telas de GFRP.

Figura 17: Provetes das direções principal (a), e secundárias na zona de laços (b) e entrelaços (c) das telas T4, T5 e T6.



Fonte: Autor, 2026.

Os laços consistem na região de encontro das duas direções nas telas de GFRP. Nestes pontos, a barra na direção secundária divide a seção em duas partes iguais para passagem da barra na direção principal. Este é a região de

maior atenção deste estudo quanto ao comportamento mecânico das telas de GFRP. O detalhe deste laço pode ser visto na Figura 18.

Figura 18: Detalhe do laço de uma tela de GFRP.



Fonte: Autor, 2026.

c. Preparação dos provetes

Foram obtidos dois tipos de provetes: (i) para os ensaios de determinação do diâmetro efetivo e do teor de fibras; e (ii) para a determinação das propriedades mecânicas (resistência à tração e módulo de elasticidade longitudinal).

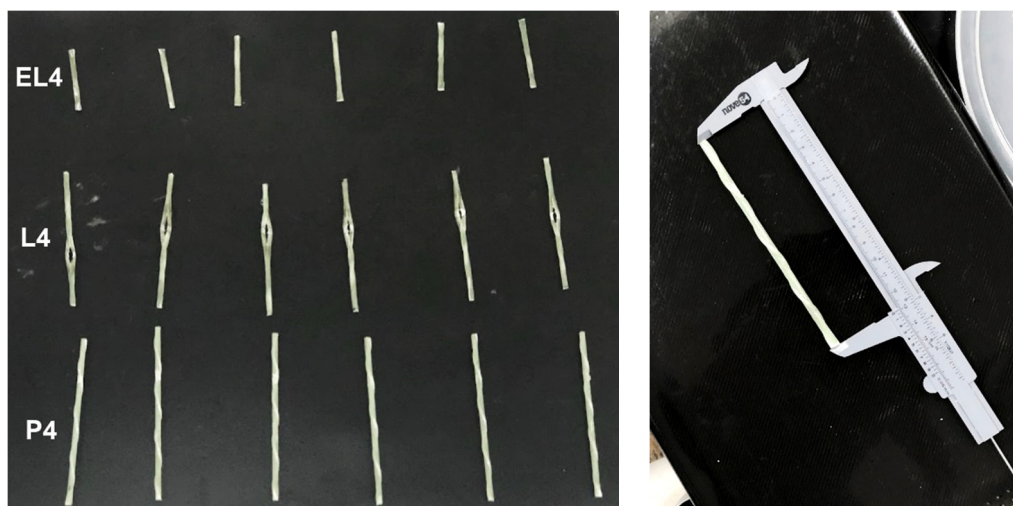
Os comprimentos dos provetes para os ensaios de diâmetro efetivo e de teor de fibras foram medidos com um paquímetro em três posições na direção longitudinal das barras de GFRP e obtendo-se os tamanhos médios descritos na Tabela 2, atendendo ao mínimo de 7 provetes exigido pela norma (ABNT, 2025b).

Tabela 2: Comprimento médio, em milímetros, dos provetes das telas de GFRP, utilizados nos ensaios de diâmetro efetivo e teor de fibra.

Telas de 4 mm						Telas de 5 mm				Telas de 6 mm			
P1	129,0	L1	108,27	EL1	51,6	P1	122,7	EL1	87,7	P1	120,7	EL1	99,5
P2	127,9	L2	110,5	EL2	60,7	P2	109,9	EL2	83,1	P2	121,7	EL2	102,7
P3	129,1	L3	108,4	EL3	59,4	P3	122,4	EL3	84,1	P3	120,1	EL3	97,6
P4	129,7	L4	109,1	EL4	61,3	P4	111,0	EL4	86,1	P4	122,0	EL4	106,1
P5	129,1	L5	107,0	EL5	60,8	P5	113,1	EL5	87,1	P5	122,3	EL5	93,5
P6	133,8	L6	110,1	EL6	51,8	P6	120,9	EL6	91,6	P6	120,4	EL6	101,3
P7	127,5	L7	110,1	EL7	52,1	P7	120,5	EL7	87,7	P7	120,3	EL7	99,5
P8	129,8	L8	109,8	EL8	52,5	-	-	-	-	-	-	-	-

Os segmentos de barras retirados das telas de GFRP de 4 mm (Figura 19) foram utilizados nos experimentos de determinação de teor de fibra e diâmetro efetivo. Somente na T4 foi possível retirar o laço íntegro, na direção secundária, para definição de diâmetro efetivo e teor de fibra, devido à escassez de telas de 5 e 6 mm disponíveis para corte.

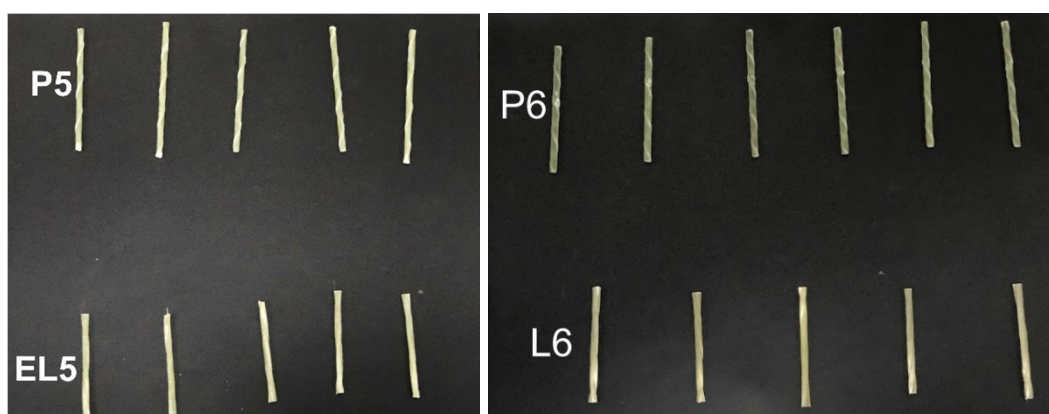
Figura 19: Segmentos de barras: EL4, L4 e P4 (à esquerda); e paquímetro utilizado para medir o comprimento (à direita).



Fonte: Autor, 2026.

Os segmentos P e EL das T5 e T6, que são mostradas na Figura 20, possuem um comprimento maior devido ao espaçamento da malha das telas ser maior que nas T4. Todos estes provetes foram, igualmente, utilizados no ensaio de determinação de diâmetro efetivo e teor de fibra neste estudo.

Figura 20: Provetes P5 e EL5 (à esquerda); e provetes P6 e EL6 (à direita).



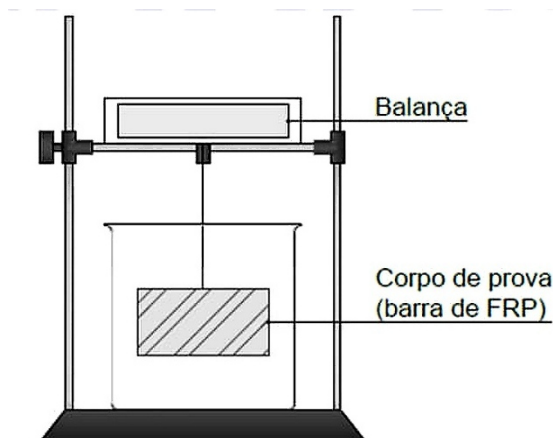
Fonte: Autor, 2026.

Todas os segmentos de barras, mesmo após o corte, não apresentaram nenhuma fissura ou desprendimento de resina, garantida a integridade exigida em norma para os ensaios.

3.3 Determinação do diâmetro efetivo.

Seguindo as recomendações da parte 2 da ABNT NBR 17201 (2025), a caracterização do diâmetro efetivo deve ser obtido a partir das massas dos segmentos de barras nas condições seca e imersa, utilizando um dispositivo (balança hidrostática), que simule o princípio de Arquimedes (Figura 21).

Figura 21: Exemplo de balança hidrostática para determinação do diâmetro efetivo



Fonte: ABNT NBR 17201, 2025.

Foi feita uma adaptação da balança hidrostática em uma balança analítica, com precisão de 1 décimo, por meio do uso de uma cesta telada, que permitia a pesagem da massa dentro da água, reproduzindo o princípio de Arquimedes. A cesta submersa permitia a colocação do provete de GFRP, com vista à obtenção da massa imersa, expresso em miligramas (mg), como mostrado na Figura 22.

Figura 22: Balança analítica e recipiente com água utilizados para obter o diâmetro efetivo.



Fonte: Autor, 2026.

O procedimento de medição fora da água, mostrado na Figura 23, foi repetido para os 8 provetes de P, EL e L da T4 e os 7 provetes de P e EL das T5 e T6.

Figura 23: Medição de massa do provete de 4 mm.



Fonte: Autor, 2026.

Após a primeira medição, o mesmo corpo de prova foi imerso na água e, então, realizada a medida da segunda massa, como apresentado na Figura 24. O mesmo procedimento foi repetido com todos os corpos de prova de diferentes diâmetros e tipos deste estudo.

Figura 24: Provete de 4 mm imerso para medição de Massa 2.



Fonte: Autor, 2026.

O valor do diâmetro efetivo (ϕ_{ef}) foi calculado a partir da Equação 1, com o desvio padrão, expresso em milímetros (mm), de acordo com a norma ABNT NBR 17201 – Parte 2 (2025).

$$\phi_{ef} = \sqrt{\frac{4 \cdot (m_1 - m_2)}{\pi \cdot \rho \cdot \ell}} \quad \text{Equação 1}$$

Onde,

m_1 é a massa aparente de um corpo de prova ao ar, expressa em miligramas (mg);

m_2 é a massa aparente do mesmo corpo de prova imerso em água, expressa em miligramas (mg);

ρ é a densidade da água (considerada igual a 1 mg/mm³);

ℓ é o comprimento médio do corpo de prova, expresso em milímetros (mm).

A área efetiva (A_{ef}) é determinada pela Equação 2, e o seu resultado é expresso em milímetros quadrados (mm²). Os resultados obtidos foram comparados com os parâmetros normativos da ABNT NBR 17201 – Parte 1 (2025).

$$A_{ef} = \frac{\pi \cdot \phi_{ef}^2}{4} \quad \text{Equação 2}$$

3.4 Determinação do teor de fibra pelo método da combustão.

Para determinar o teor de fibras foram consideradas as recomendações da parte 10 da norma ABNT NBR 17201 (2025). A caracterização foi iniciada a partir da determinação da massa dos cadinhos limpos e secos em uma balança analítica com precisão de quatro casas decimais, como mostrado na Figura 25, após a secagem e resfriamento. Na secagem dos cadinhos utilizou-se uma mufla a uma temperatura de 500 °C, por 10 min, e logo após, foram resfriados à temperatura ambiente no dessecador.

Figura 25: Pesagem de cadinho após secagem em estufa.



Fonte: Autor, 2026.

Os cadinhos foram identificados de acordo com os corpos de prova, como o exemplo “EL3 – 6” da Figura 26, onde “EL” refere-se à barra “entre laços”, 3 é a sequência do corpo de prova e 6 é o diâmetro da tela da qual a barra veio, em milímetros (mm).

Figura 26: Identificação de cadinhos após pesagem em balança analítica.



Fonte: Autor, 2026.

O primeiro registro foi da massa (m_{lr}) em gramas, dos cadinhos. Cada corpo de prova foi colocado em um recipiente individual, como mostrado na

Figura 27, e secado na estufa de secagem ventilada à temperatura de $50\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ por um período de 24 horas.

Figura 27: Corpos de prova nos cadinhos.



Fonte: Autor, 2026.

Os cadinhos com os corpos de prova foram resfriados à temperatura ambiente no dessecador e pesados novamente. O registro, em gramas, da massa do conjunto (cadinho mais corpo de prova) (m_{2r}) foi feito logo em seguida, como mostrado na Figura 28.

Figura 28: a) Cadinhos, no dessecador, após saírem da estufa; b) Cadinhos com corpos de prova sendo pesados em balança analítica.



(a)



(b)

Fonte: Autor, 2026.

Após isso, o cadinho e o corpo de prova foram colocados no forno-mufla, mostrado na Figura 29, à temperatura de $565\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ por um período mínimo de 6 horas, garantindo que toda a matriz polimérica fosse consumida.

Figura 29: Forno-mufla utilizado no ensaio de teor de fibras.



Fonte: Autor, 2026.

Após 6 horas de combustão, o recipiente foi resfriado com os corpos de prova até atingir a temperatura ambiente e, assim, pesado, registrando, em gramas, a massa do conjunto fibra mais cadinho (m_3). A seguir é mostrado na Figura 26 o aspecto das fibras, além dos cadinhos com as fibras e a pesagem do conjunto.

Figura 30: Conjunto fibra mais cadinho sendo pesado (à direita); e as fibras de vidro sem a resina após combustão (à esquerda).



Fonte: Autor, 2026.

O teor de fibra de vidro, M_{fibra} , é determinado, em porcentagem (%), para cada corpo de prova, pela Equação 3.

$$M_{fibra} = \frac{(m_3 - m_{1r})}{(m_{2r} - m_{1r})} \quad \text{Equação 3}$$

onde:

m_{1r} é a massa do recipiente ou cadinho seco, expressa em gramas (g);

m_{2r} é a massa total do recipiente ou cadinho seco e do corpo de prova seco, expressa em gramas (g);

m_3 é a massa total do recipiente ou cadinho contendo os resíduos de fibras após a queima, expressa em gramas (g).

Após isso, o valor médio foi calculado para definição do teor de fibra de cada corpo de prova. Os resultados obtidos foram comparados com os parâmetros normativos da NBR 17201 – Parte 1 (ABNT, 2025b).

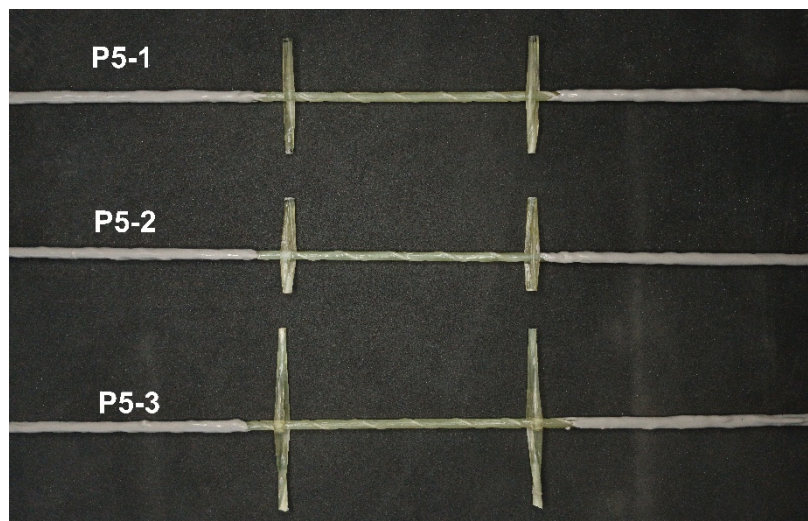
3.5 Determinação da resistência à tração e do módulo de elasticidade.

Este ensaio foi adaptado da NBR 17201 - parte 4 (ABNT, 2025b), a qual detalha a metodologia do ensaio de tração de barras de GFRP. Como não há ensaio específico para telas e na região de São Luís não há equipamento de tração com aperto pneumático (para o travamento das extremidades dos provetes cujas extremidades devem ser protegidas com tubos de aço preenchido com argamassa expansiva, como recomendado pela norma), criou-se um sistema de ancoragem por chapas metálicas, tanto na direção principal quanto na secundária. Todos os detalhes das etapas serão descritos nas próximas seções.

a. Preparação dos provetes

Nesta etapa, as telas foram demarcadas para serem cortadas, ao ponto de permitirem o vão livre e a ancoragem recomendados na NBR 17201 (ABNT, 2025b). Após o corte, mostrado o exemplo da T4 na Figura 31 das armaduras nas direções principal (P4) e secundária (L4), foram retirados os segmentos da outra direção na zona de ancoragem, para melhor aderir ao sistema de chapas.

Figura 31: Provetes das direções principal com adesivo epóxi.



Fonte: Autor, 2026.

Após alguns testes preliminares, foi observado a ruptura da armadura principal nos pontos de contato da chapa. Devido a isso, foi adicionada uma camada de adesivo epóxi na região de ancoragem, para proteção da região e permitir com que a ruptura ocorresse no vão livre, o que validaria o ensaio, de acordo com as recomendações normativas.

b. Adaptação da ancoragem por chapas metálicas.

A NBR 17201 (ABNT, 2025b) recomenda a ancoragem por tubos preenchidos com graute ou argamassa, como referido anteriormente, preservando um vão livre de 40 vezes o diâmetro nominal da barra. Por limitações de infraestrutura, para realização do ensaio com este tipo de ancoragem elaborou-se um protótipo composto por 2 chapas de aço, em cada extremidade do provete, com um sulco no meio das chapas que permitia a passagem para as barras, que seriam apertadas com parafusos, aumentando a aderência do sistema, como ilustrado na Figura 32.

Figura 32: Sistema de ancoragem com chapas de aço.



Fonte: Autor, 2026.

As vantagens do uso de chapas de aço consistiram na utilização em equipamentos que apresentem aperto mecânico; na redução do tempo de preparação, pois com tubos de aço preenchidos por argamassa exigia um período de cura; e no reuso para múltiplos ensaios seguidos, além de serem utilizadas para mais de um diâmetro nominal. As chapas produzidas para este ensaio de telas são apresentadas na Figura 33.

Figura 33: Chapas metálicas produzidas para ensaio de tração.



Fonte: Autor, 2026.

c. Ensaio das telas de GFRP.

Para os ensaios de tração, as provetes foram inseridos nas chapas e apertadas por parafusos até se fixarem, de modo que este não escorregasse nem rotacionasse durante todo o ensaio, como mostrado na Figura 34. O vão livre entre as chapas foi aquele recomendado na NBR 17201 – Parte 4 (ABNT, 2025b), de 40 vezes o diâmetro nominal.

Figura 34: Barra L4 fixada nas chapas metálicas.

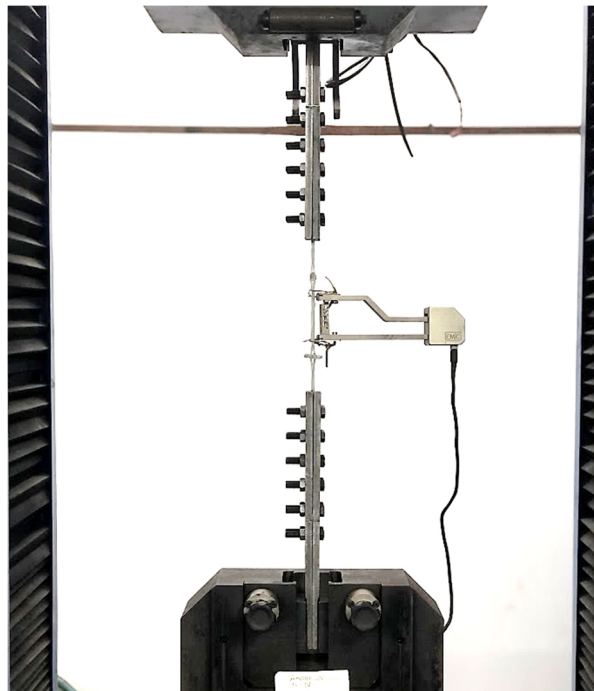


Fonte: Autor, 2026.

Após preparado o provete, este foi fixado em uma máquina de ensaio de tração do modelo EMIC DL-30000, com a utilização de LVDT da mesma marca (Figura 35), permitindo a obtenção do módulo de elasticidade longitudinal e da resistência à tração das barras das telas de GFRP nas direções principal e

secundária. Os ensaios de tração foram realizados no Laboratório de Ensaios Mecânicos do Instituto Federal do Maranhão – Campus Monte Castelo. Foram realizados ensaios quase estáticos, com uma velocidade 2,0 mm/min, para que a ruptura das barras ocorresse entre 1 min a 10 min, de acordo com as recomendações normativas.

Figura 35: Provete instalado em máquina de ensaio de tração.



Fonte: Autor, 2026.

d. Expressão dos resultados.

A resistência à tração (f_t) das barras das telas de GFRP, em qualquer direção, foi calculada dividindo-se a força máxima atingida pela área efetiva da seção transversal, conforme a Equação 4.

$$f_t = \frac{P}{A_{ef}} \quad \text{Equação 4}$$

Onde

P é a força máxima, expressa em newtons (N);

A_{ef} é a área efetiva da seção transversal da barra de FRP, expressa em milímetros quadrados (mm²)

O diâmetro efetivo da barra de FRP foi determinado neste mesmo estudo de acordo com a ABNT NBR 17201-2 (2025).

O módulo de elasticidade (E_f), expresso em megapascal (MPa), foi calculado de acordo com a Equação 5.

$$E_f = \frac{(P_1 - P_2)}{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \cdot A_{ef}} \quad \text{Equação 5}$$

onde

P_1 é a força que constitui uma deformação de 0,003, expressa em newtons (N);

P_2 é a força que constitui uma deformação de 0,001, expressa em newtons (N);

ε_1 é a deformação específica de 0,003;

ε_2 é a deformação específica de 0,001.

A norma NBR 17201 – Parte 03 (2025b) recomenda que para barras que sofram deformação específica inferior a 0,006, considera-se P_1 igual a 50 % da força última e P_2 igual a 25 % da força última.

A deformação específica (ε), medida com o auxílio de LVDT, foi calculada de acordo com a Equação 6.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad \text{Equação 6}$$

onde

ΔL é a medida da variação de comprimento registrada pelo clip-gauge no momento de aplicação de uma força, expressa em milímetros (mm);

L é a dimensão inicial do comprimento livre, considerado o campo de leitura do clip-gauge, expressa em milímetros (mm).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Considerações iniciais

Este capítulo contempla a apresentação e discussão dos resultados obtidos com os ensaios realizados a partir da metodologia do capítulo anterior. Nos seguintes tópicos estão apresentados os valores obtidos em cada um dos ensaios de diâmetro efetivo, área efetiva da seção transversal, teor de fibras de vidro e caracterização mecânica, além de discussões acerca dos resultados obtidos após as análises realizadas neste estudo.

4.2 Diâmetro e área efetiva

A partir do ensaio normativo, obtiveram-se os valores da Tabela 3 para os corpos de prova ensaiados na direção principal da tela de 4 mm. Na direção secundária da tela de 4 mm, foram ensaiados tanto provetes com laços íntegros quanto a região de entrelaços, cujos valores encontram-se apresentados nas Tabelas 4 e 5, respectivamente.

Tabela 3: Diâmetros e áreas efetivas da direção principal das telas de 4 mm.

Barras	Massa 1 (seco) (g)	Massa 2 (imerso) (g)	ϕ_{efe} (mm)	A_{efe} (mm ²)
4P-1	4,4	2,4	4,44	15,50
4P-2	4,3	2,2	4,57	16,42
4P-3	4,3	2,4	4,33	14,71
4P-4	4,4	2,2	4,65	16,96
4P-5	4,4	2,4	4,44	15,50
4P-6	4,5	2,4	4,47	15,69
4P-7	4,1	2,3	4,24	14,12
4P-8	4,3	2,3	4,43	15,40

Tabela 4: Diâmetros e áreas efetivas dos laços da direção secundária das telas de 4 mm.

Barras	Massa 1 (seco) (g)	Massa 2 (imerso) (g)	ϕ_{efe} (mm)	A_{efe} (mm ²)
4L-1	3,3	1,6	4,47	15,70
4L-2	3,2	1,6	4,29	14,48

4L-3	3,2	1,7	4,20	13,84
4L-4	3,3	1,7	4,32	14,66
4L-5	3,2	1,6	4,36	14,95
4L-6	3,2	1,6	4,30	14,53
4L-7	3,3	1,6	4,43	15,44
4L-8	3,2	1,5	4,44	15,49

Tabela 5: Diâmetros e áreas efetivas entrelaços da direção secundária das telas de 4 mm.

Barras	Massa 1 (seco) (g)	Massa 2 (imerso) (g)	ϕ_{efe} (mm)	A_{efe} (mm²)
4EL-1	1,6	0,8	4,44	15,51
4EL-2	1,7	0,8	4,34	14,82
4EL-3	1,7	0,8	4,39	15,15
4EL-4	1,8	0,8	4,56	16,32
4EL-5	1,8	0,8	4,58	16,46
4EL-6	1,5	0,7	4,44	15,45
4EL-7	1,5	0,7	4,42	15,35
4EL-8	1,6	0,8	4,41	15,24

A seguir, estão os valores obtidos para barras da direção principal (Tabela 6) e entrelaços da direção secundária (Tabela 7) da tela de 5 mm.

Tabela 6: Diâmetros e áreas efetivas da direção principal das telas de 5 mm.

Barras	Massa 1 (seco) (g)	Massa 2 (imerso) (g)	ϕ_{efe} (mm)	A_{efe} (mm²)
5P-1	5,5	3,0	5,09	20,38
5P-2	5,0	2,7	5,16	20,94
5P-3	5,5	3,0	5,10	20,42
5P-4	5,0	2,5	5,35	22,52
5P-5	5,1	2,6	5,31	22,11
5P-6	5,4	2,8	5,23	21,50
5P-7	5,4	3,0	5,04	19,92

Tabela 7: Diâmetros e áreas efetivas da direção secundária das telas de 5 mm.

Barras	Massa 1 (seco) (g)	Massa 2 (imerso) (g)	ϕ_{efe} (mm)	A_{efe} (mm²)
5EL-1	3,6	1,8	5,11	20,53
5EL-2	3,5	1,8	5,10	20,47
5EL-3	3,5	1,6	5,36	22,60
5EL-4	3,6	1,8	5,16	20,90
5EL-5	3,6	1,8	5,13	20,67
5EL-6	3,8	1,9	5,14	20,75

Finalmente, nas Tabelas 8 e 9 estão os resultados obtidos dos ensaios com a tela de 6 mm na para direção principal e secundária, respectivamente.

Tabela 8: Diâmetros e áreas efetivas da direção principal das telas de 6 mm.

Barras	Massa 1 (seco) (g)	Massa 2 (imerso) (g)	ϕ_{efe} (mm)	A_{efe} (mm²)
6P-1	7,5	4,0	6,08	29,01
6P-2	7,7	3,6	6,55	33,70
6P-3	7,7	4,3	6,00	28,31
6P-4	7,7	3,6	6,54	33,62
6P-5	7,7	3,7	6,45	32,71
6P-6	7,6	3,5	6,58	34,05
6P-7	7,6	3,9	6,26	30,76

Tabela 9: Diâmetros e áreas efetivas da direção secundária das telas de 6 mm.

Barras	Massa 1 (seco) (g)	Massa 2 (imerso) (g)	ϕ_{efe} (mm)	A_{efe} (mm²)
6EL-1	5,7	2,9	5,99	28,15
6EL-2	6,0	2,7	6,40	32,12
6EL-3	5,7	2,7	6,25	30,73
6EL-4	6,2	2,9	6,29	31,10
6EL-5	5,4	2,6	6,18	29,96
6EL-6	5,9	3,0	6,04	28,62

A diferença de casas decimais se dá pela balança analítica só possuir uma casa decimal de precisão, enquanto que no cálculo do diâmetro efetivo e

da área efetiva foram utilizadas mais casas, porém reduzidas a apenas duas de precisão, que seriam o suficiente para entendimento dos resultados.

Para uma melhor análise dos resultados, na Tabela 10 são apresentados os valores médios e desvios-padrão de cada diâmetro nominal em relação ao diâmetro e áreas transversais efetivas nas suas diferentes direções e regiões.

Tabela 10: Diâmetros e áreas efetivas das diferentes telas de GFRP (média $\pm$ desvios-padrão)

Barras	ϕ_{efe} (mm)	A_{efe} (mm ²)	Barras	ϕ_{efe} (mm)	A_{efe} (mm ²)	Barras	ϕ_{efe} (mm)	A_{efe} (mm ²)
4P	4,44 $\pm$ 0,13	15,50 $\pm$ 0,89	5P	5,16 $\pm$ 0,12	20,94 $\pm$ 0,97	6P	6,45 $\pm$ 0,24	32,71 $\pm$ 2,37
4L	4,34 $\pm$ 0,09	14,81 $\pm$ 0,63	5L	-	-	6L	-	-
4EL	4,43 $\pm$ 0,08	15,40 $\pm$ 0,57	5EL	5,13 $\pm$ 0,10	20,71 $\pm$ 0,81	6EL	6,22 $\pm$ 0,16	30,34 $\pm$ 1,52

Todas as barras de diferentes diâmetros nominais apresentaram valores de área de seção transversal compreendidos entre os valores mínimo e máximo recomendados pela parte 1 da NBR 17201 (ABNT, 2025b), em ambas as direções.

Houve uma redução de 0,10 mm² e 0,70 mm² dos valores de área da seção transversal da direção principal em relação à região de entrelaços e de laços, respectivamente, para a tela T4. A maior redução ocorreu para a região do laço na direção secundária, isso pode ter acontecido devido à divisão da seção transversal para criação de laços e passagem das barras principais.

Para a tela T5, não houve uma alteração significativa no diâmetro e na área efetivas entre as direções principal e secundária. Finalmente, para a tela T6, ressalta-se a redução de pouco mais que 2,00 mm² na área efetiva da direção secundária quando comparada à direção principal. Supõe-se que isso tenha ocorrido devido à passagem do laço ser maior na tela T6 e, por isso, essa diferença de área da seção transversal.

4.3 Teor de Fibra pelo método da combustão

Com o ensaio dos provetes, foram obtidos os seguintes resultados para as telas T4, T5 e T6 descritos nas Tabelas 11, 12 e 13, respectivamente, tanto na direção principal quanto na secundária, entrelaços (apenas Tela T4) e dos laços.

Tabela 11: Teor de fibra de tela T4.

Barras	Massa 1 (g)	Massa 2 (g)	Massa 3 (g)	Teor de fibra (%)
4P-1	22,7338	24,7859	24,3541	78,96
4P-2	27,9033	30,0548	29,6080	79,23
4P-3	23,9711	26,0442	25,6100	79,06
4EL-1	27,7254	30,1577	29,6425	78,82
4EL-2	17,8686	20,0561	19,5747	77,99
4EL-3	32,0295	34,1725	33,7133	78,57
4L-1	37,3898	39,6622	39,1026	75,37
4L-1	37,0408	39,4075	38,8353	75,82

Tabela 12: Teor de fibra de tela T5.

Barras	Massa 1 (g)	Massa 2 (g)	Massa 3 (g)	Teor de fibra (%)
5P-1	25,8691	28,1241	27,6533	79,12
5P-2	28,1749	30,4244	29,9445	78,67
5P-3	27,6311	29,9308	29,4425	78,77
5EL-1	26,1463	28,2409	27,8021	79,05
5EL-2	22,5370	24,5876	24,1574	79,02
5EL-3	25,8800	27,8352	27,4177	78,65

Tabela 13: Teor de fibra de tela T6.

Barras	Massa 1 (g)	Massa 2 (g)	Massa 3 (g)	Teor de fibra (%)
6P-1	27,7805	30,4216	29,8342	77,76
6P-2	24,3571	26,6821	26,1506	77,14
6P-3	22,0210	24,5975	24,0141	77,36
6P-4	17,4177	19,7437	19,2181	77,40
6EL-1	28,2505	31,1749	30,4810	76,27
6EL-2	27,6928	30,5836	29,9270	77,29

Na Tabela 14 são apresentados os valores médios e desvios-padrão de teor de fibra de vidro cada diâmetro nominal nas suas diferentes direções e regiões.

Tabela 14: Teor de fibras de vidro das diferentes telas de GFRP (média $\pm$ desvios-padrão)

Barras	Teor de fibras (%)	Barras	Teor de fibras (%)	Barras	Teor de fibras (%)
4P	79,06±0,14	5P	78,77±0,24	6P	77,38±0,26
4L	75,60±0,32	5L	-	6L	-
4EL	78,57±0,42	5EL	79,02±0,23	6EL	76,78±0,71

Todas as telas T4, T5 e T6, tanto na direção principal quanto na secundária, testadas neste estudo, estão em conformidade com a NBR 17201 – Parte 1 (ABNT, 2025b), que determina um teor de fibra aceitável igual ou maior a 75%. Observa-se uma pequena redução de 4,5% entre a direção principal e a região do laço na direção secundária para a tela T4, acompanhando a redução do diâmetro efetivo (Tabela 10) e atingindo um valor muito próximo ao mínimo normativo, o que pode resultar em uma redução da resistência nesta região, como verificado nos ensaios de tração desta tela. Nas telas T5 e T6 não houve alteração maior que 1% quando se comparadas as direções principal e secundária.

Com estes resultados, conclui-se que o processo de fabricação desta amostragem é adequado pois é mantido um padrão de qualidade, no qual não há variação significativa entre os diâmetros e direções das telas; entretanto, destacando-se a redução de quantidade de fibras na região do laço na direção secundária.

4.4 Caracterização mecânica

A partir dos ensaios de resistência à tração, foram obtidos a resistência das barras na direção secundária, os módulos de elasticidade longitudinal e as deformações específicas em ambas as direções das telas T4, T5 e T6, como apresentados nas Tabelas 15, 16 e 17. Todas as curvas experimentais obtidas de cada barra das referidas telas estão apresentadas no ANEXO I.

Para que a ruptura seja considerada como válida, o provete deve exibir ruptura no vão livre, ou seja, no espaço fora das chapas, onde não há contato com a região de ancoragem da máquina de ensaio. Desta forma, como os provetes da direção principal romperam na região de contato com as chapas em

todos os testes, o valor de sua carga final atingida não é a capacidade real da resistência à tração da tela analisada.

Tabela 15: Tensão de tração, módulo de elasticidade e deformação dos provetes da tela T4.

Barras	f_t (MPa)	E_t (GPa)	ε_t (‰)
4P-1*	750,05	57,23	13,10
4P-2*	873,15	57,44	15,20
4P-3*	937,67	52,74	17,78
4L-1	495,90	39,00	12,70
4L-2	564,20	37,61	15,00
4L-3	592,75	34,04	17,41

Legenda: f_t – tensão máxima de tração; E_t – Módulo de elasticidade axial; ε_t – deformação específica;
*Ruptura inválida

Tabela 16: Tensão de tração, módulo de elasticidade e deformação dos provetes da tela T5.

Barras	f_t (MPa)	E_t (GPa)	ε_t (‰)
5P-1*	859,85	51,50	16,70
5P-2*	1019,48	53,96	18,89
5P-3*	961,85	52,73	18,24
5L-1	745,79	50,85	14,67
5L-2	602,20	47,86	12,58
5L-3	639,60	45,62	14,02
5L-4	706,41	45,54	15,51

Legenda: *Ruptura inválida

Tabela 17: Tensão de tração, módulo de elasticidade e deformação dos provetes da tela T6

Barras	f_t (MPa)	E_t (GPa)	ε_t (‰)
6P-1*	587,18	46,83	12,54
6P-2*	827,50	46,52	17,79
6L-1	472,39	38,32	12,33
6L-2	490,36	39,85	12,31
6L-3	496,12	41,42	11,98

Legenda: *Ruptura inválida

Na Tabela 18, estão apresentados em uma tabela resumo, os valores médios e desvios-padrão de teor de fibra de vidro cada diâmetro nominal nas

suas diferentes direções e regiões. Não calculou-se o desvio padrão da resistência para a direção principal das telas, pois não foi atingida a carga máxima suportada pelas barras, em virtude da ruptura inválida.

As análises dos valores de resistência máxima não podem ser feitas comparativamente entre as direções principal e secundária, pois não houve nenhuma ruptura válida na direção principal, em virtude das diversas rupturas no interior das chapas, o que as tornou inválidas. Desta maneira, tais valores foram, em ambas as direções, comparados com o mínimo normativo, que é de 800 MPa, de acordo com a parte 1 da norma NBR 17201 (ABNT, 2025b).

Tabela 18: Propriedades mecânicas das diferentes telas de GFRP (média $\pm$ desvios-padrão)

Barras	f_t (MPa)	$f_t/f_{t,min}$ (%)	E_t (GPa)	$E_t/E_{t,min}$ (%)	ε_t (‰)
4P*	853,2	106,70	55,81 $\pm$ 2,66	124,01	16,80 $\pm$ 4,56
4L	551,0 $\pm$ 49,75	68,87	36,89 $\pm$ 2,56	81,97	15,30 $\pm$ 3,49
5P*	947,06	118,38	52,73 $\pm$ 1,23	117,18	18,24 $\pm$ 4,43
5L	673,50 $\pm$ 64,66	84,19	46,34 $\pm$ 1,32	102,98	15,24 $\pm$ 4,76
6P*	827,50	103,44	46,68 $\pm$ 0,22	103,72	17,73 $\pm$ 5,22
6L	486,29 $\pm$ 12,38	59,05	39,86 $\pm$ 1,55	88,59	11,85 $\pm$ 2,95

*Legenda: $f_{t,min}$ – resistência à tração mínima exigida em norma; $E_{t,min}$ – módulo de elasticidade longitudinal mínimo exigido em norma; ε_t – deformação específica; *Ruptura inválida*

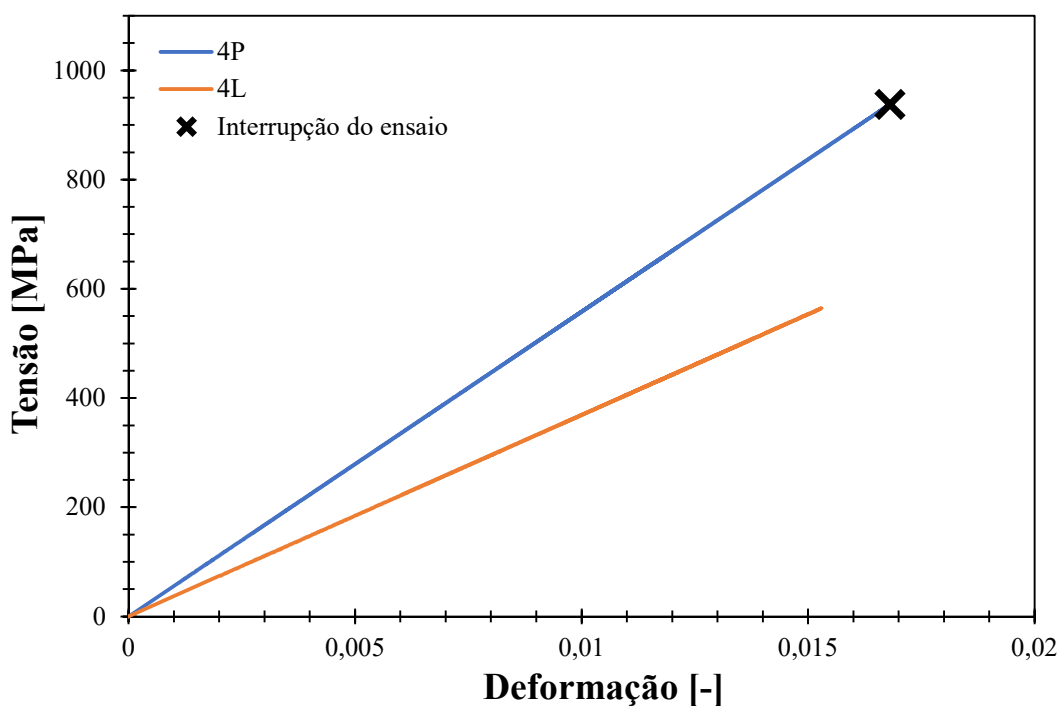
O elevado valor de desvio padrão na caracterização mecânica pode ter ocorrido, em virtude do baixo número amostral neste estudo ou, também, pela mínima variação que aconteceu no teor de fibras.

Todos os valores de resistência à tração na direção principal estiveram acima do mínimo normativo que é de 800 MPa da NBR 17201 – Parte 1 (ABNT, 2025b), mesmo não sendo possível avaliar a real resistência nesta direção, em virtude da ruptura prematura. Para a direção secundária, todos os valores ficaram abaixo do mínimo normativo, com uma redução de até 41,0% para a tela T5. Este comportamento resistente inferior, comparativamente à direção principal, se dá em virtude da redução da seção transversal na região do laço, promovendo um enfraquecimento e concentração de tensão.

O módulo de elasticidade médio obtido das telas foi de até 55,8 GPa (24,0% acima do mínimo normativo de 45 GPa) na direção principal e de até 46,3 GPa (3,7% acima do mínimo normativo) na direção secundária. Entretanto, a direção secundária é marcada por módulos de elasticidade menor que o mínimo em todos os demais provetes nesta direção, atingindo uma redução de até 18%, como verificado na tela T4. Este comportamento confirma o baixo módulo de elasticidade, porém demonstrando uma menor rigidez das barras na direção secundária pela presença dos laços, aumentando a deformação das barras com menores resistências.

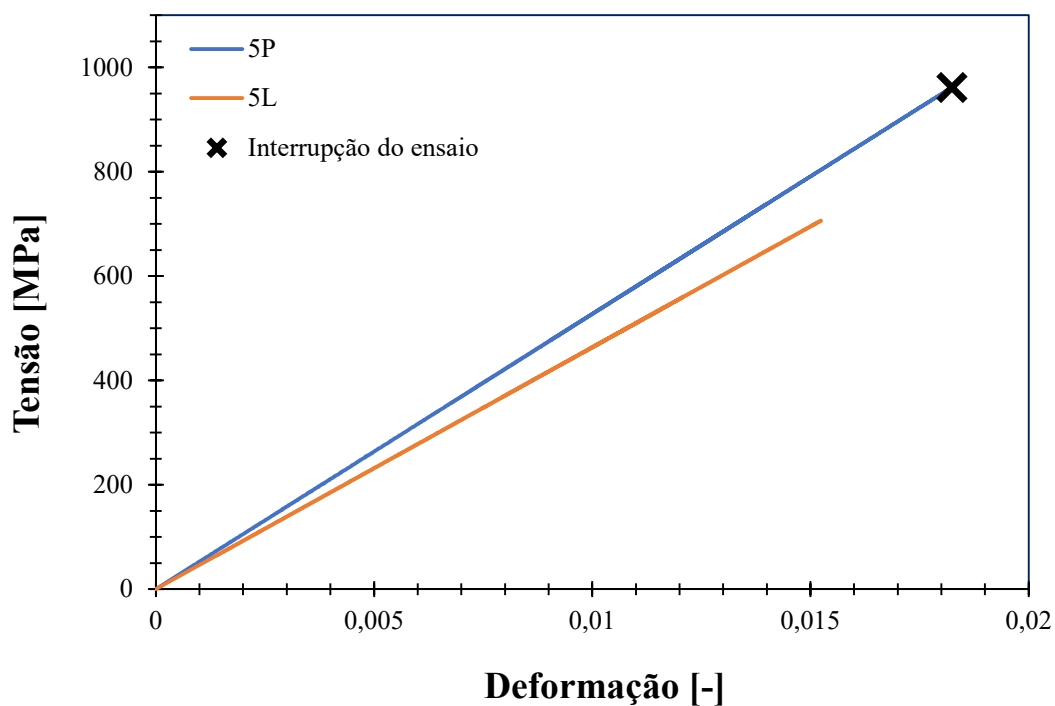
A partir dos valores médios das propriedades mecânicas foram elaboradas as curvas tensão *versus* deformação específica para cada diâmetro nominal das telas, como podem ser verificadas nas Figuras 36 a 38.

Figura 36: Curva de tensão *versus* deformação da tela T4 na direções principal e secundária.



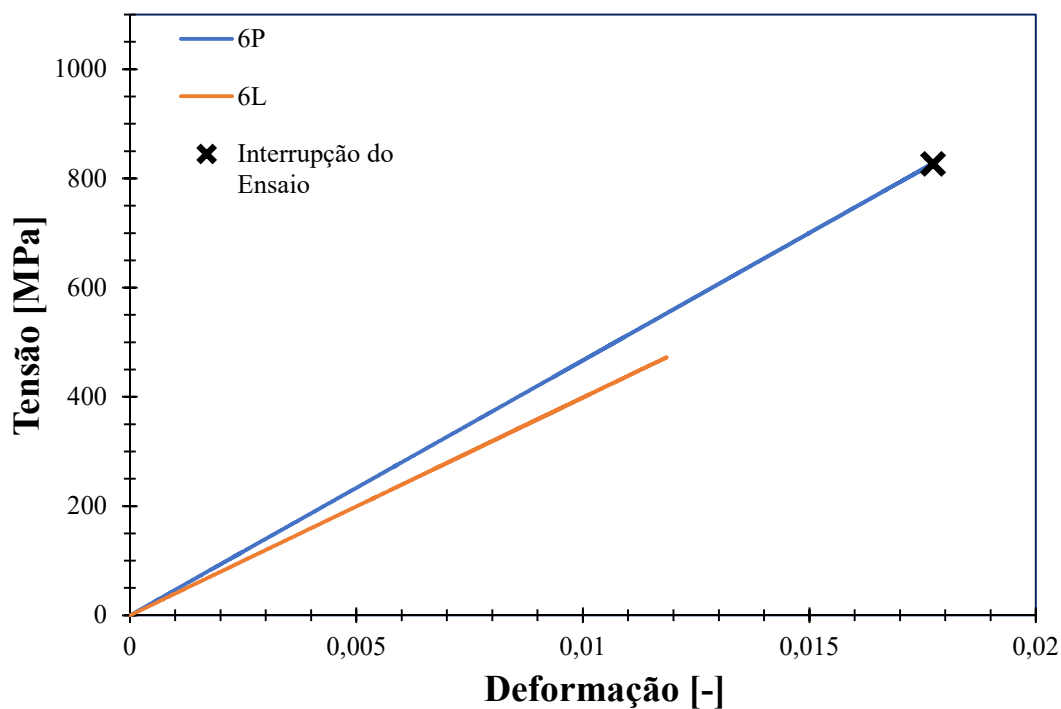
Fonte: Autor, 2026.

Figura 37: Curva de tensão *versus* deformação da tela T5 na direções principal e secundária.



Fonte: Autor, 2026.

Figura 38: Curva de tensão *versus* deformação da tela T6 na direções principal e secundária.



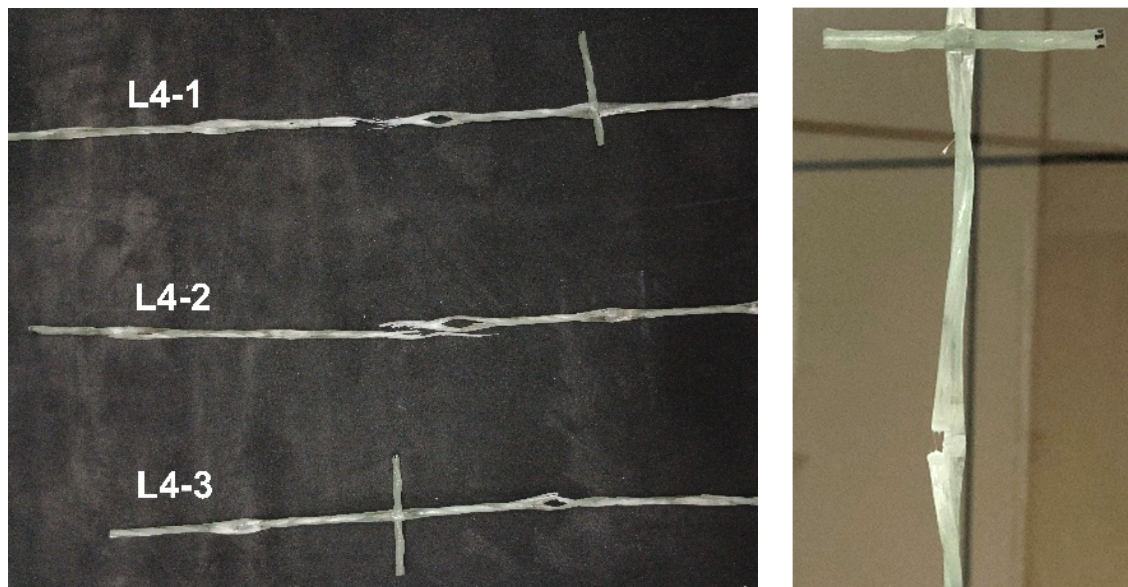
Fonte: Autor, 2026.

Estes gráficos comprovam a diferença entre os módulos de elasticidade, o qual tende a ser menor na direção secundária que na principal. Isso reforça a

influência dos laços nesta direção, que aumenta a tendência de deformação das barras em menores tensões, quando comparadas à direção principal.

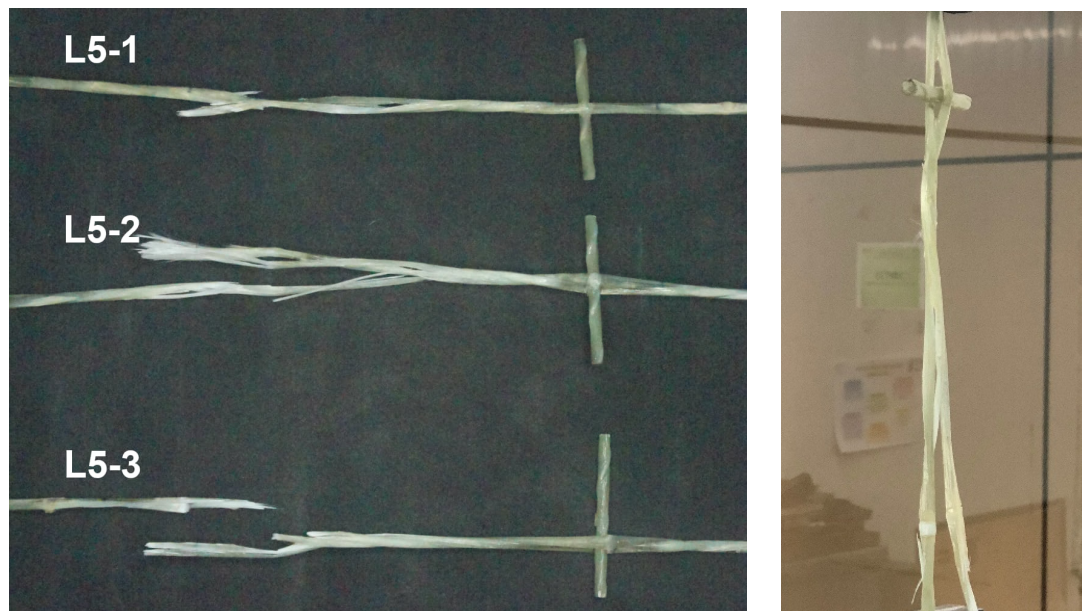
As Figuras 38 a 40 apresentam os modos de ruptura válidos na direção secundária, para as barras das telas T4, T5 e T6, respectivamente.

Figura 39: Modos de ruptura dos provetes da T4 (à esquerda) e detalhe da ruptura (à direita).



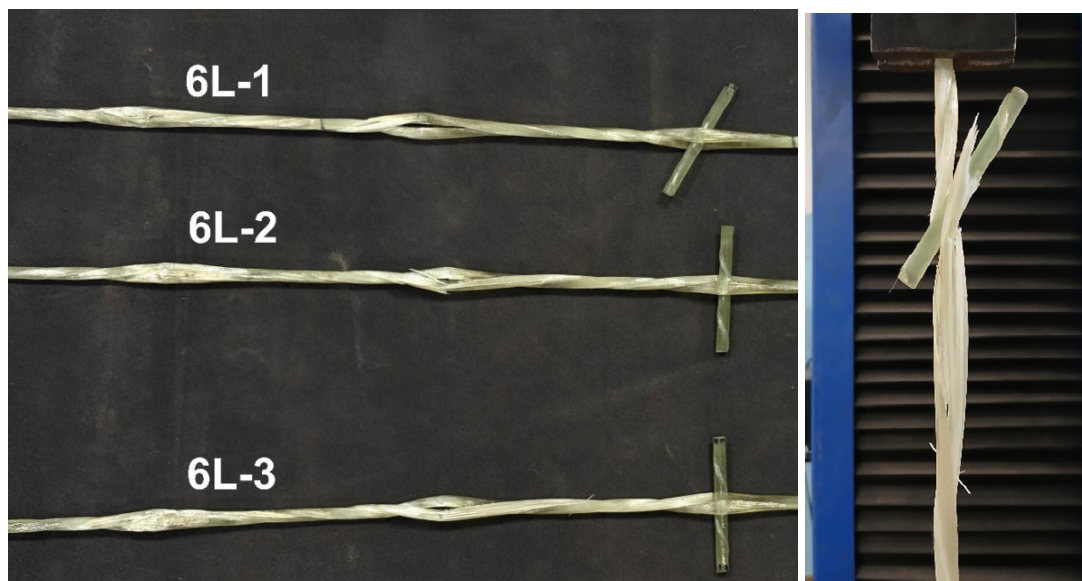
Fonte: Autor, 2026.

Figura 40: Modos de ruptura dos provetes da T5 (à esquerda) e detalhe da ruptura (à direita).



Fonte: Autor, 2026.

Figura 41: Modos de ruptura dos provetes da T6 (à esquerda) e detalhe da ruptura (à direita).



Fonte: Autor, 2026.

Todas as barras exibiram uma ruptura frágil com a significativa percepção sonora do “estalar” de fibras se rompendo antes da falha. Notou-se, igualmente, que ao longo do ensaio, na direção secundária, houve um movimento de rotação das barras principais, devido a uma tendência de fechamento do laço quando tensionado, ou seja, o alinhamento das fibras que estão encurvadas para a formação do laço. Este movimento pode favorecer o surgimento de tensões transversais, que tendem a fraturar a resina e diminuir a resistência à tração, bem como aumentar a deformabilidade, o que resulta em um menor módulo de elasticidade. A partir das figuras, pode-se perceber que as falhas ocorreram no ponto em que inicia a divisão da seção transversal para a criação da laço, o que pode ter resultado no enfraquecimento da região, como anteriormente referido.

4.5 Considerações finais

Os resultados obtidos nos ensaios mostraram que ao caracterizar as direções das telas de GFRP e compará-las, suas propriedades apresentam diferenças importantes.

Os diâmetros e áreas efetivas reduzem quando se leva em conta a direção da tela analisada. As telas T4, T5 e T6 apresentaram uma redução de 4%, 2% e 6%, respectivamente, quando se compara as áreas efetivas da direção principal

para a direção secundária. Todos os provetes atenderam à área mínima exigida pela NBR 17201 – Parte 1 (ABNT, 2025b).

Quanto ao teor de fibra, não houve alteração significativa entre as direções das telas analisadas, demonstrando que o padrão de fabricação desta marca está adequado nas duas direções, pois todos os corpos de prova estão em conformidade com a NBR 17201 – Parte 1 (ABNT, 2025b).

Relativamente à resistência à tração, as telas T4, T5 e T6 na direção secundária exibiram valores inferiores em 19%, 16% e 41%, respectivamente, em relação ao mínimo recomendado na NBR 17201 – Parte 1 (ABNT, 2025b). Na direção principal, não foi possível obter o valor real da resistência máxima à tração, devido aos ensaios exibirem ruptura inválida.

No que tange aos módulos de elasticidade, a direção principal das telas T4, T5 e T6 apresentaram valores superiores em 24%, 17% e 3%, respectivamente, em relação ao mínimo exigido na NBR 17201 – Parte 1 (ABNT, 2025b). Já na direção secundária, a tela T4 exibiu um valor inferior em 18% em relação ao mínimo normativo, enquanto que as telas T5 e T6 mostraram valores superiores em 2% e 3%, respectivamente, em relação ao mínimo normativo.

Portanto, evidencia-se que a direção secundária em termo de propriedades mecânicas exibe um comportamento inferior à direção principal, mesmo que atenda às recomendações normativas em termos de área transversal efetiva e teor de fibras de vidro.

5. CONCLUSÃO

A busca por soluções para estruturas de concreto armado em ambientes agressivos como zonas litorâneas é um desafio. Neste caminho, surgem materiais como os polímeros reforçados com fibras de vidro (GFRP) que não sofrem com o ataque por corrosão desses ambientes, diferente das armaduras de aço convencionais. As telas de GFRP que são o objeto de estudo deste trabalho demonstraram ser uma solução alternativa a este desafio, porém ainda enfrentam a escassez de estudos que determinam seu comportamento mecânico e normas de dimensionamento de estruturas armadas com as mesmas, o que delimita seu uso e aumenta a dificuldade dos projetistas em adotar essa alternativa.

A motivação deste estudo foi dada principalmente pela escassez, até o momento de elaboração deste trabalho, de estudos acerca do comportamento das telas de GFRP, o que posterga a publicação de normativas para ensaio das telas e dimensionamento de estruturas armadas com GFRP. Com objetivo de caracterizar estas telas, este estudo focou principalmente nas características mecânicas e conformidades de fabricação, utilizando como parâmetros os requisitos das normas aplicadas para barras de GFRP como forma de contornar a ausência na literatura brasileira de normas específicas para telas de GFRP até o presente momento.

A alternativa de metodologia para o ensaio de tração das telas de GFRP com chapas metálicas reutilizáveis demonstrou ser eficaz para a obtenção do módulo de elasticidade das direções principal e secundária, e para resistência à tração da tela secundária, sendo necessário ainda ajustes experimentais, como uso de graute ou argamassa na região de ancoragem, para a obtenção de rupturas válidas na direção principal.

Por ainda não haver normas que determinam como deve ser elaborado o ensaio de telas de GFRP e poucos trabalhos na literatura acerca do seu comportamento, este estudo chega à conclusão de que ainda há muito a ser feito para determinar o comportamento mecânico das telas de GFRP. Porém os resultados obtidos já demonstram que a direção que possui laços, ou seja, a secundária, apresenta redução em área efetiva, resistência à tração e módulo de elasticidade das telas de GFRP. A direção secundária apresentou uma

redução de 41% e 18% em relação ao mínimo normativo para a resistência à tração e módulo de elasticidade longitudinal, respectivamente, o que demonstra um comportamento inferior a ser considerado.

Por isso, os resultados permitem as seguintes recomendações:

(i) Atentar-se ao dimensionamento e verificação de segurança das telas de acordo com o comportamento das barras na direção secundária, visando, assim, a segurança das estruturas de concreto armado com telas de GFRP.

(ii) Em caso de utilização das chapas de aço nos ensaios de tração, verificar o contato entre as chapas e o provete da direção principal, utilizando argamassa ou graute nas extremidades das barras, para aumentar a resistência neste ponto, a fim de obter uma ruptura na zona livre e, assim, tornar o ensaio válido.

(iii) Observar o comportamento das barras da direção secundária quando tracionadas, quanto à tendência à rotação da armadura principal por fechamento do laço e, se isso influencia na resistência da direção principal a esforços transversais, quando aplicados em elementos estruturais, como lajes.

Para trabalhos futuros recomenda-se as seguintes temáticas:

(i) Caracterização da aderência das telas de GFRP via ensaio de arrancamento, por meio do ensaio normatizado para barras;

(ii) Estudo experimental com lajes de concreto armado com telas de GFRP com aplicação de carga na direção principal e secundária;

(iii) Modelação numérica em programa de elementos finitos com estudo paramétrico variando o espaçamento entre as malhas, resistência à tração e aderência entre as barras das telas e concreto.

Em suma, este trabalho atende às lacunas técnicas sobre o uso de telas de GFRP no cenário brasileiro, resultando na obtenção de dados que auxiliarão a elaboração de futuras normas e incentivarão o uso seguro deste produto em elementos estruturais em ambientes de elevada agressividade ambiental, como as zonas litorâneas.

REFERÊNCIAS

ACI COMMITTEE 440. *Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars*. ACI 440.1R-15. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 2015.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). *Building code requirements for structural concrete and commentary*. ACI 318M-95 and ACI 318RM-95. Farmington Hills, Mich., 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 17196:2025: Projeto de estruturas de concreto armado com barras de polímero reforçado com fibras (FRP). Rio de Janeiro, 2025a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 17201:2025: Barras de polímero reforçado com fibras (FRP) destinadas a armaduras para estruturas de concreto armado. Rio de Janeiro, 2025b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7481:2023 – Tela de aço soldada nervurada para armadura de concreto – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2023a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: projeto de estruturas de concreto: procedimento. Rio de Janeiro, 2023b.

BENMOKRANE, B. *Recent developments of FRP bars as internal reinforcement in concrete structures & field applications*. In: *INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUSTAINABLE CONSTRUCTION MATERIALS AND TECHNOLOGIES*, Las Vegas, 2016. Anais [...]. p. 1–10.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. CSA S806-12: *Design and construction of building components with fibre-reinforced polymers*. Mississauga: CSA, 2021 .

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON (CEB). *Manual cracking and deformations*. CEB Bull. d'Information N. 158-E. Lausanne, Suíça, 1985.

COMPOSITE TECH. Composite Tech, 2025. Por que a Composite-Tech é líder global em equipamentos de produção de GFRP. Disponível em: <https://composite-tech.com/pt/2025/08/11/why-composite-tech-is-the-global-leader-in-gfrp-production-equipment/>. Acesso em: 21 jan. 2026.

CLARK, J. *Structural Design of Polymer Composites: EUROCOMP design code and handbook*. Londres: E&FN Spon, 1996.

DALFRÉ, G. M.; MAZZÚ, A.; FERREIRA, F. . Discussões sobre o dimensionamento de vigas de concreto armadas à flexão com barras de GFRP. *Concreto & Construções*, São Paulo, v. 101, p. 79-86, jan./mar. 2021.

DALFRÉ, G. M.; ALVES, A.; MAZZU, A.; JUNIOR, L. . Protocolo de degradação acelerado de FRPs com sistema de aquecimento e aquisição de dados automático com uso da plataforma Arduino. *Brazilian Journal of Science*, São Carlos, v. 1, n. 7, p. 66-81, jul. 2022 (p. 1)

DALFRÉ, G. M.; MAZZU, A. A importância da caracterização mecânica bidirecional de telas de GFRP. *Concreto & Construções*, v. 118, n. 118, 2025.

ERNEST MAIER. 2024. Disponível em: <https://ernestmaier.com/>. Acesso em: 28 jun. 2025.

FIB. fib Bulletin 40: *FRP reinforcement in RC structures*. Lausanne: fib, 2007.

HAIZERGROUP. Haizer telas: malha em PRFV para reforço. Curitiba, [20--?]. Disponível em: <https://www.haizergroup.com.br/haizertelas>. Acesso em: 27 nov. 2025.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 10406-1:2015: *Fibre-reinforced polymer (FRP) reinforcement of concrete – Test methods – Part 1: FRP bars and grids*. Geneva: ISO, 2015.

MATTHYS, S.; TAERWE, L.. *Concrete Slabs Reinforced with FRP Grids. I: One-Way Bending*. *Journal of Composites for Construction*, v. 4, n. 3, p. 145–161, 2000.

NANNI, A. *FRP reinforcement for concrete structures*. In: *PROCEEDING OF THE FIBER REINFORCED PLASTIC REINFORCEMENT FOR CONCRETE STRUCTURES*, Detroit, MI, 1993. ACI SP-138. American Concrete Institute. p. 31–48.

OLIVEIRA, L. O. de S. B.; SOUZA, R. H. F. de; TEIXEIRA, B. de A. C. Utilização de armaduras não metálicas no Brasil. In: *CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS*, 10., 2018, Rio de Janeiro. Anais [...]. Rio de Janeiro, 2018. p. 1-9.

SOLYOM, S.; BALÁZS, G. L. *Bond of FRP bars with different surface characteristics*. *Construction and Building Materials*, v. 264, 2020. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119839.

STRATUS. Stratus FRP. 2024. Processo de Pultrusão. Disponível em: <https://www.stratusfrp.com/artigo/vergalhao-em-fibra-de-vidro-para-construcao-civil>. Acesso em: 7 jun. 2025.

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

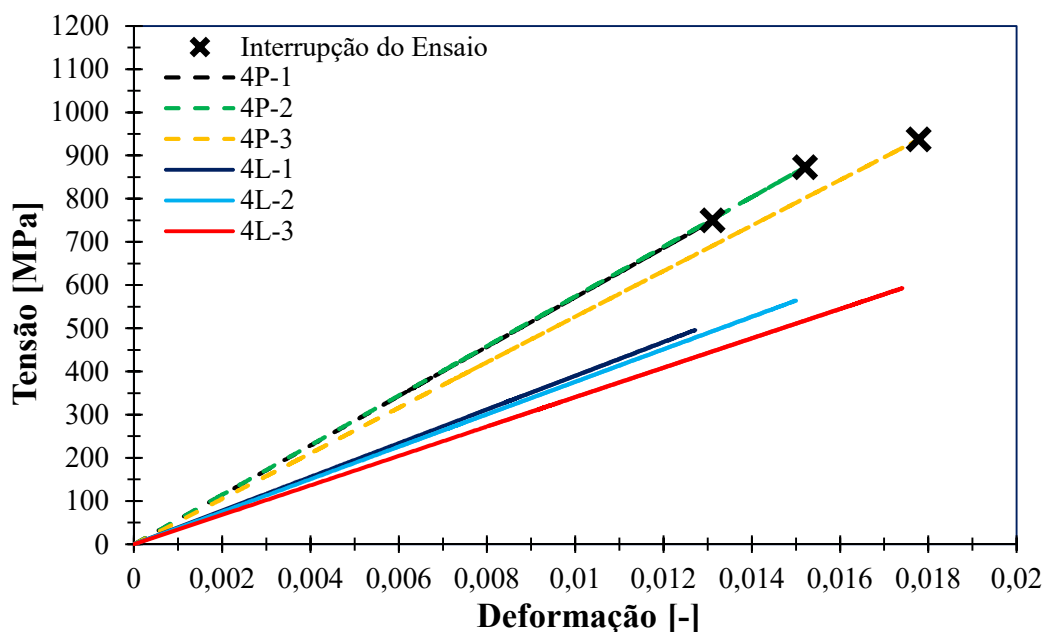
WU, Xi X. FAN c, Z. XIE a, M. SUN a, H. QIAN a, C. WANG. *Experimental study on punching performance of concrete slab reinforced with GFRP grids*. *Structures*, v. 76, p. 108974, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.108974>. Acesso em: 7 jun. 2025.

XIE, F.; W. TIAN; S. LI; P. DIEZ; S. ZLOTNIK; A. G. GONZALEZ. *Experimental Study on the Structural Performance of Glass-Fiber-Reinforced Concrete Slabs Reinforced with Glass-Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) Bars: A Sustainable Alternative to Steel in Challenging Environments*. Polymers, Basel, v. 17, n. 1068, p. 1-14, 15 abr. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym17081068>. Acesso em: 3 ago. 2025.

ANEXO I

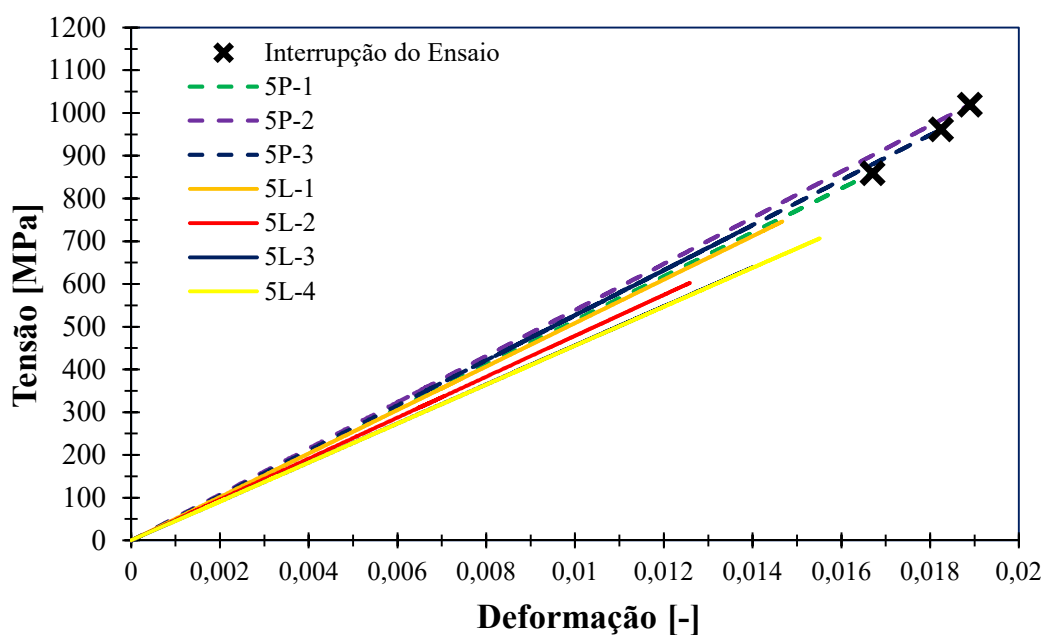
Neste anexo encontram-se os gráficos de curvas tensão *versus* deformação específica de cada provete das telas T4, T5 e T6. Estes gráficos serviram como base para elaboração das curvas médias. Nestes gráficos estão os provetes com ensaios da direção principal interrompidos em seu valor final, como indicado, e os provetes com ensaios validados na direção secundária.

Gráfico 1: Curvas de tensão *versus* deformação da tela T4 na direções principal e secundária.



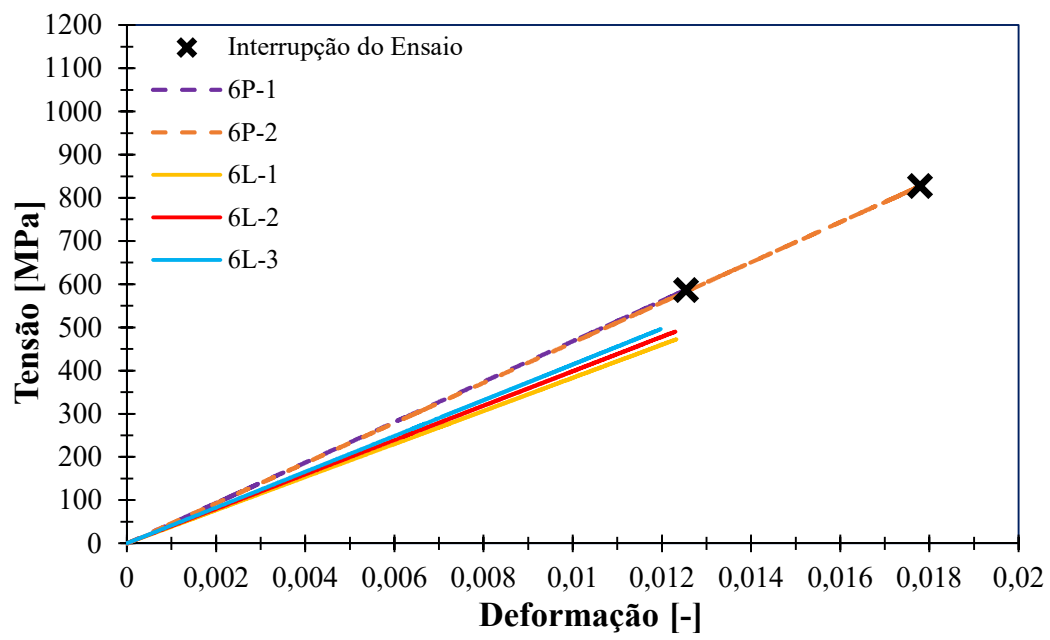
Fonte: Autor, 2026.

Gráfico 2: Curvas de tensão *versus* deformação da tela T5 na direções principal e secundária.



Fonte: Autor, 2026.

Gráfico 3: Curvas de tensão *versus* deformação da tela T6 na direções principal e secundária.



Fonte: Autor, 2026.