



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS
BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

MARLOS MATHEUS GOMES DA SILVA

**AVALIAÇÃO DA SUBSTITUIÇÃO DO AÇO POR VERGALHÕES DE
FIBRA DE VIDRO EM CONCRETO ARMADO**

CARAÚBAS

2025

MARLOS MATHEUS GOMES DA SILVA

**AVALIAÇÃO DA SUBSTITUIÇÃO DO AÇO POR VERGALHÕES DE
FIBRA DE VIDRO EM CONCRETO ARMADO**

Monografia apresentada a
Universidade Federal Rural do Semi-
Árido como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Karina Estrela
Egídio, Prof.^a Me.

CARAÚBAS

2025

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

S586a Silva, Marlos Matheus Gomes da.
Avaliação da substituição do aço por vergalhões
de fibra de vidro em concreto armado / Marlos
Matheus Gomes da Silva. - 2025.
51 f. : il.

Orientadora: Karina Estrela Egídio.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil,
2025.

1. Desempenho. 2. Flexão. 3. Polímero. 4.
Tração. 5. Viabilidade. I. Egídio, Karina Estrela ,
orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo) autor(a).

Biblioteca Campus Caraúbas
Bibliotecária: Sarah Freire Bezerra
CRB: 15/1052

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

MARLOS MATHEUS GOMES DA SILVA

**AVALIAÇÃO DA SUBSTITUIÇÃO DO AÇO POR VERGALHÕES DE
FIBRA DE VIDRO EM CONCRETO ARMADO**

Monografia apresentada a
Universidade Federal Rural do Semi-
Árido como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Civil.

Defendida em: 09 / 12 / 2025.

BANCA EXAMINADORA

Karina Estrela Egídio, Prof.^a Me. (UFERSA)
Presidente

Eduardo Moraes de Medeiros, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

Renata de Oliveira Marinho, Prof.^a Me. (UNIFIP)
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por me conceder saúde, força e a oportunidade de chegar até aqui, permitindo-me evoluir a cada etapa deste ciclo acadêmico.

Agradeço profundamente à minha família, que sempre foi minha base e motivação, meu pai João Eleogildo da Silva, minha mãe Maria Ozineide Gomes Mota, minha filha Maria Antonella Queiroga Gomes, meu irmão Maicko Gomes da Silva, e aos meus pais de criação, minha tia Maria Lucineide da Silva Souza e José Maria de Souza, que, embora não estejam mais presentes fisicamente, sei que seguem felizes e orgulhosos pois parte desta conquista pertence a eles.

Sou imensamente grato também aos meus amigos, que estiveram comigo em cada etapa desta jornada e tornaram o caminho mais leve. Em especial, agradeço a Artur Vinicius, Jardel Silva, Marília Rhuama, Mariana Silva e Vitória Oliveira, que foram essenciais para que eu chegasse até aqui. vocês são fodas!

Agradeço à minha orientadora Karina Estrela, pela confiança depositada em mim e pela dedicação durante o desenvolvimento deste trabalho, e ao professor Francisco Neto, que não mediu esforços para me auxiliar sempre que precisei.

Registro também minha gratidão aos professores que contribuíram significativamente para meu crescimento acadêmico e pessoal: Brenno Dayano, Renata Marinho e todos aqueles que, de alguma forma, marcaram minha trajetória na Engenharia Civil.

Obrigado a todos por fazerem parte dessa experiência única em minha vida!

RESUMO

A busca por alternativas que atendam às demandas estruturais com maior eficiência, sustentabilidade, economia e qualidade estética tem impulsionado o estudo de novos materiais aplicáveis à engenharia civil. Entre essas possibilidades, destaca-se a substituição do aço convencional em elementos estruturais de concreto como vigas, pilares e lajes por materiais alternativos, como os vergalhões de fibra de vidro. Os vergalhões de polímero reforçado com fibra de vidro (GFRP/PRFV) surgem como opção promissora devido à sua elevada resistência à tração, baixo peso e estabilidade físico-química. Este trabalho tem como objetivo realizar uma análise comparativa entre vigas de concreto armado reforçadas com aço CA-50 e com barras de fibra de vidro, abordando propriedades mecânicas, comportamento estrutural e viabilidade econômica. Para isso, a metodologia utilizada foi a confecção de 7 corpos de prova prismáticos 15x15x55 (cm), no qual um foi armado com 4 barras de 10 mm de aço e os demais com 4, 5, 6 e 7 barras de PRFV, avaliando seus comportamentos físicos, mecânicos e econômico. Nos resultados obtidos, observou-se que, quanto ao surgimento de fissuras, a viga armada com aço não apresentou fissuras por flexão antes da ruptura, enquanto as vigas reforçadas com PRFV iniciaram o aparecimento de fissuras sob cargas a partir de 3,7 tf. Em relação à carga de ruptura, verificou-se que a viga de aço apresentou resistência 6,42% superior às vigas com PRFV. Também foi constatada baixa aderência entre os vergalhões de fibra e o concreto, evidenciada pelo escorregamento do material durante os ensaios. Por fim, a análise econômica mostrou que o uso do PRFV é 24,01% mais barato que o aço. Assim, embora o GFRP se apresente como um material promissor, ainda são necessários avanços normativos e pesquisas complementares para consolidar sua aplicação estrutural na construção civil.

Palavras-chave: Desempenho; Flexão; Polímero; Tração; Viabilidade.

ABSTRACT

The search for alternatives that meet structural demands with greater efficiency, sustainability, economy, and aesthetic quality has driven the study of new materials applicable to civil engineering. Among these possibilities, the replacement of conventional steel in concrete structural elements like beams, columns, and slabs with alternative materials, such as fiberglass rebar, stands out. Glass fiber reinforced polymer (GFRP) rebar emerges as a promising option due to its high tensile strength, low weight, and physical-chemical stability. This study aims to perform a comparative analysis between reinforced concrete beams reinforced with CA-50 steel and with fiberglass bars, addressing mechanical properties, structural behavior, and economic viability. For this purpose, the methodology used was the preparation of 7 prismatic specimens (15x15x55 cm), in which one was reinforced with 4 10 mm steel bars and the others with 4, 5, 6, and 7 GFRP bars, evaluating their physical, mechanical, and economic behaviors. The results showed that, regarding the emergence of cracks, the steel-reinforced beam did not present flexural cracks before failure, while the GFRP-reinforced beams initiated the appearance of cracks under loads starting at 3.7 tf. In relation to the ultimate load, it was found that the steel beam presented 6.42% higher resistance than the GFRP beams. Low adherence between the fiber rebar and the concrete was also observed, evidenced by the slippage of the material during the tests. Finally, the economic analysis showed that the use of GFRP is 24.01% cheaper than steel. Thus, although GFRP presents itself as a promising material, regulatory advances and complementary research are still necessary to consolidate its structural application in civil construction.

Keywords: Performance; Flexion; Polymers; Traction; Viability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação de vergalhões utilizados na produção de armaduras e seus diâmetros comerciais.	16
Figura 2: Diagrama tensão x deformação real dos aços brasileiros.	18
Figura 3: Vergalhão de fibra de vidro (GFRP/PRFV)	19
Figura 4: Comportamento tensão x deformação de materiais poliméricos.	22
Figura 5: Gráfico tensão de aderência x deslizamento.....	24
Figura 6: Fluxograma que representa os passos da metodologia aplicada na pesquisa.	26
Figura 7: Modelo de forma utilizado para confecção dos prismas.....	28
Figura 8: Detalhamentos da viga V1 armada em aço e V2, V3 armadas em fibra.	29
Figura 9: Detalhamento armaduras das vigas V4 e V5 armadas em fibra.	29
Figura 10: Detalhamento armaduras das vigas V6 e V7 armadas em fibra.	30
Figura 11: Fôrma com armadura preparada para recebimento do concreto.	31
Figura 12: Etapa representativa da pesagem dos materiais.	32
Figura 13: Slump test realizado no traço T1.	34
Figura 14: Corpos de prova prismáticos após a concretagem.	34
Figura 15: Local utilizado para cura úmida dos corpos de prova durante 28 dias.	35
Figura 16: Organização do corpo de prova para realização do ensaio de compressão axial.	36
Figura 17: Viga preparada para início do ensaio de flexão em quatro pontos.	37
Figura 18: Fluxograma que representa as etapas de caracterização dos resultados do trabalho.	38
Figura 19: Aparecimento de fissuras de flexão ocorrida nas vigas armadas com GFRP.	41
Figura 20: Rompimento angulado saindo do apoio para o centro.....	42
Figura 21: Rompimento total do corpo de prova.	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades mecânicas dos aços na tração, valores mínimos.....	17
Tabela 2: Relação entre η_1 e η na aderência.	18
Tabela 3: Propriedades de tração típicas em barras de aço e PRFV.	21
Tabela 4: Propriedade mecânica das barras de fibra de vidro.	23
Tabela 5: Propriedades dos materiais utilizados para cálculo do traço escolhido.....	27
Tabela 6: Resumo geral do traço utilizado.	27
Tabela 7: Resumo da quantidade de material em massa utilizado para cada concretagem.	32
Tabela 8: Processo de execução realizado para mistura de cada traço de concreto.	33
Tabela 9: Resultados de abatimento em cada um dos traços.....	38
Tabela 10: Resultados obtidos após ensaio de compressão axial dos corpos de prova cilíndricos.	39
Tabela 11: Valores obtidos em ensaio de flexão em 4 pontos para carga de ruptura dos corpos de prova.....	42
Tabela 12: Cargas de aparecimento de fissuras em cada corpo de prova.....	40
Tabela 13: Valores resumos obtidos para os vergalhões utilizados.	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FRP	Fiber Reinforced Polymer (Polímero Reforçado com Fibras)
PRFV	Polímero Reforçado com Fibra de Vidro
GFRP	Glass Fiber Reinforced Polymer (Polímero Reforçado com Fibra de Vidro)
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Polymer (Polímero Reforçado com Fibra de Carbono)
CA-25	Aço de armadura com resistência característica de 250 MPa
CA-50	Aço de armadura com resistência característica de 500 MPa
CA-60	Aço de armadura com resistência característica de 600 MPa
ACI	American Concrete Institute
IBRACON	Instituto Brasileiro do Concreto
f_y	Resistência característica ao escoamento do aço
f_{ctd}	Resistência de cálculo à tração do concreto
f_{bd}	Resistência de aderência de cálculo
GPa	Gigapascal
MPa	Megapascal
E.L.U	Estado Limite Último
E.L.S	Estado Limite de Serviço

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS	14
2.1 GERAL.....	14
2.2 ESPECÍFICOS	14
3 REFERENCIAL TEÓRICO	15
3.1 CONCRETO ARMADO.....	15
3.2 AÇO.....	15
3.2.1 Propriedades mecânicas do aço	16
3.2.1.1 Resistência a tração e compressão	16
3.2.1.2 Módulo de elasticidade e tensão de ruptura.....	17
3.2.1.3 Aderência.....	18
3.2.2 Massa específica	19
3.3 VERGALHÕES DE FIBRA DE VIDRO (GFRP/PRFV)	19
3.3.1 Propriedades mecânicas do PRFV	20
3.3.1.1 Resistência a tração e compressão	20
3.3.1.2 Módulo de elasticidade e tensão de ruptura.....	21
3.3.1.3 Aderência.....	23
3.3.1.4 Massa específica	24
3.4 USO DO PRFV NO BRASIL.....	24
4 METODOLOGIA.....	26
4.1 CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	27
4.1.1 Escolha do traço.....	27
4.1.2 Confecção das fôrmas.....	28
4.1.3 Confecção das armaduras	28
4.2 CONCRETAGEM	30
4.2.1 Preparação das fôrmas	30
4.2.2 Preparação e mistura do material.....	31
4.2.3 Slump test.....	
33	
4.2.4 Concretagem dos corpos de prova.....	34
4.2.5 Desforma e Cura dos Corpos de Prova.....	35
4.3 ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL DO CONCRETO	35

4.4 ENSAIO DE FLEXÃO EM 4 PONTOS	36
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
5.1 ENSAIOS.....	38
5.1.1 Slump test.....	38
5.1.2 Compressão axial do concreto	39
5.1.3 Ensaio de flexão em quatro pontos.....	40
5.1.3.1 Carga de aparecimento de fissuras.	40
5.1.3.2 Verificação de flecha	40
5.1.3.3 Carga de ruptura	41
5.1.3.4 Verificação da aderência do PRFV ao concreto	42
5.2 ANÁLISE DE CUSTO-BENEFÍCIO	43
5.3 SÍNTESE DOS RESULTADOS.....	44
6 CONCLUSÃO.....	46
REFERÊNCIAS	48

1 INTRODUÇÃO

O concreto armado é amplamente empregado na construção civil, resultante da união entre o concreto e o aço. Essa combinação permite reunir a resistência à compressão do concreto com a resistência à tração do aço, tornando possível o uso com máxima eficiência de cada propriedade específica dos materiais. Sua utilização é comum em estruturas como edifícios, pontes, lajes e fundações. Atualmente, a utilização do concreto armado é regulamentada pela ABNT NBR 6118:2023, que define critérios de dimensionamento, execução e controle das estruturas. Essa normatização possibilita a padronização dos processos construtivos, assegurando a qualidade, a segurança e a durabilidade das obras em engenharia civil.

Em relação aos custos de produção, o concreto armado apresenta variações significativas entre as diferentes regiões do Brasil. Em muitos casos, pode ser considerado um material de elevado custo, em função do preço dos insumos e da mão de obra especializada. Parte desse custo elevado, se deve às armaduras utilizadas nos elementos estruturais, que são comercializadas em vergalhões lineares de diferentes diâmetros e necessitam ser moldadas conforme as especificações do projeto. Visando reduzir os custos, aumentar a produtividade no canteiro de obra com um material mais leve e de melhor custo-benefício, uma alternativa a substituição do aço que compõe as armaduras de elementos estruturais em concreto por vergalhões de Polímero Reforçado com Fibra de Vidro (PRFV), ou Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP), cujas propriedades físicas se assemelham às do aço, permitindo que o resultado atenda adequadamente às solicitações do projeto, além de se obter elementos estruturais mais leves e menos robustos quando comparados aos produzidos de maneira tradicional.

Os PRFV destacam-se por sua alta resistência à tração e pela estabilidade frente a variações físico-químicas do ambiente. Eles suportam exposições a temperaturas e agentes químicos sem comprometer a integridade da estrutura, superando a resistência à tração do aço convencional. Entretanto, apresentam um módulo de elasticidade significativamente menor que o do aço, o que confere à estrutura um comportamento mais elástico, podendo gerar limitações em certos tipos de projeto, diferentemente do aço, que permite o escoamento da armadura.

Visando esse contexto, vale frisar que ainda não existe no Brasil uma norma técnica específica que regulamente o uso de vergalhões de fibra de vidro em estruturas de

concreto armado. Essa ausência de padronização normativa exige que os projetos que adotem o material sejam baseados em referências internacionais ou em estudos experimentais, reforçando a importância de pesquisas que forneçam dados consistentes para futuras regulamentações nacionais.

Assim, este trabalho tem como objetivo avaliar a possibilidade de substituição do aço por PRFV em elementos estruturais de concreto armado, por meio de uma caracterização quali-quantitativa de exemplares reforçados com ambos os materiais. A análise busca comparar seu comportamento mecânico, desempenho estrutural e aspectos construtivos, de forma a verificar a viabilidade prática do uso do PRFV como alternativa ao aço.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

Analisar a viabilidade de substituir vergalhões de aço por vergalhões de fibra de vidro (PRFV) no concreto armado, considerando aspectos relacionados à segurança e à viabilidade econômica.

2.2 ESPECÍFICOS

- Desenvolver protótipos de vigas em concreto armado com vergalhão de aço e fibra de vidro com bitola de 10 mm;
- Realizar ensaios de compressão para o concreto utilizado em cada protótipo;
- Realizar ensaios de flexão em 4 pontos em cada corpo de prova;
- Comparar os resultados obtidos em laboratório;
- Analisar o custo-benefício econômico em utilizar de cada tipo de vergalhão;
- Contribuir e incentivar o desenvolvimento de pesquisas na área.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 CONCRETO ARMADO

O concreto armado é um dos principais materiais da construção civil moderna, resultado da associação entre concreto e armaduras de aço. Essa combinação une a resistência à compressão do concreto à resistência à tração do aço, permitindo a execução de estruturas seguras, versáteis e duráveis. Sua ampla aplicação em edificações, pontes e demais elementos estruturais o torna essencial para obras de diferentes portes e finalidades. De acordo com Helene (1986), o concreto pode ser caracterizado como um material sólido e denso, resultante da mistura de cimento, agregados miúdos e graúdos, como areia e brita, com água.

Mehta e Monteiro (2008) definem o concreto como um material compósito, formado por uma pasta que aglomera partículas ou fragmentos de agregados. No caso do concreto de cimento hidráulico, o aglomerante resulta da combinação entre cimento hidráulico e água. Os agregados correspondem a materiais granulares, como areia, pedregulho, pedrisco, rocha britada, escória de alto-forno ou resíduos de construção e demolição, incorporados à pasta cimentícia para a produção de concreto ou argamassa.

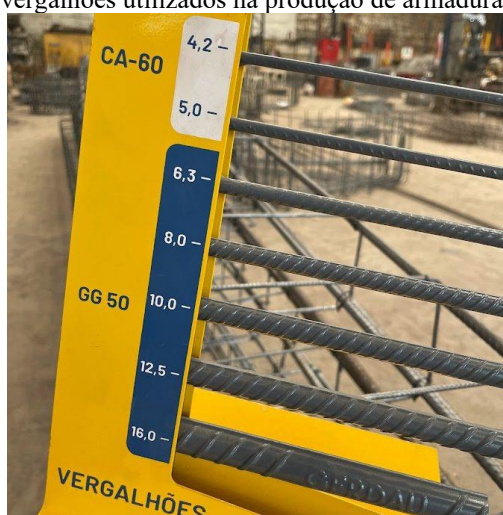
Segundo Chust (2023) O concreto, por si só, não se mostra apropriado como elemento estrutural de resistência, uma vez que sua capacidade de tração representa cerca de 10% da resistência à compressão. Em um concreto de classe C30, por exemplo, a resistência à compressão pode alcançar 30 MPa, enquanto a resistência à tração fica restrita a aproximadamente 3 MPa.

3.2 AÇO

Segundo Moraes (2005), o aço é um material metálico produzido em usinas siderúrgicas, composto essencialmente por ferro com até 2% de carbono. A incorporação de elementos como manganês, níquel, enxofre e silício permite modificar suas propriedades, tornando-o adequado a diferentes finalidades. No caso específico dos aços empregados em concreto armado, os teores de carbono normalmente variam entre 0,4% e 0,6%, faixa que proporciona um equilíbrio adequado entre resistência mecânica e ductilidade.

O aço empregado em estruturas de concreto armado deve atender aos requisitos rigorosos estabelecidos pela ABNT NBR 7480:2024. Esses aços são classificados de acordo com sua resistência característica ao escoamento, sendo os principais tipos o CA-25 (250 MPa), CA-50 (500 MPa) e CA-60 (600 MPa). No contexto brasileiro, o CA-50 é o mais utilizado, devido à sua superfície nervurada, que favorece a aderência ao concreto, além de apresentar um desempenho equilibrado, custo acessível e ampla disponibilidade no mercado. Por essas razões, ele se consolidou como a opção predominante nos projetos estruturais em concreto armado no país. A Figura 1 apresenta os tipos de vergalhões comumente utilizados na produção de armaduras.

Figura 1: Representação de vergalhões utilizados na produção de armaduras e seus diâmetros comerciais.



Fonte: Hembrafer, 2025.

Os vergalhões CA-50 possuem superfície nervurada, composta por relevos transversais e longitudinais que promovem o travamento mecânico com o concreto. A ABNT NBR 7480 (2024), estabelece os diâmetros padronizados de 6,3 mm a 40 mm e associa a cada bitola valores específicos de área de seção, massa linear e perímetro, adotando tolerâncias rigorosas para assegurar a intercambialidade e a confiabilidade do material na obra.

3.2.1 Propriedades mecânicas do aço

3.2.1.1 Resistência a tração e compressão

De acordo com a ABNT NBR 7480 (2024), os vergalhões destinados ao concreto armado devem atender às propriedades mecânicas apresentadas na Tabela 1, no qual é

apresentado o f_{yk} corresponde à resistência característica ao escoamento, f_{stk} representa a resistência característica à tração, ϵ_{uk} refere-se à deformação na ruptura, e ϕ indica o diâmetro nominal da barra ou do fio.

Tabela 1: Propriedades mecânicas dos aços na tração, valores mínimos.

Categoria	f_{yk} (Mpa)	f_{stk} (Mpa)	ϵ_{uk} em 10 ϕ (%)
CA-25	250	1,2 f_y	18
CA-50	500	1,1 f_y	8
CA-60	600	1,05 f_y	5

Fonte: Adaptada da ABNT NBR 7480, 2024.

O aço CA-50 possui resistência característica ao escoamento (f_{yk}) de 500 MPa e resistência à ruptura superior a 550 MPa, além de apresentar alongamento mínimo de 8% em 10 vezes o diâmetro, conforme a ABNT NBR 7480 (2024). Os aços CA-25 e CA-50 podem ser considerados como de alta ductilidade e os aços CA-60 podem ser considerados de ductilidade normal, conforme ABNT NBR 6118 (2023).

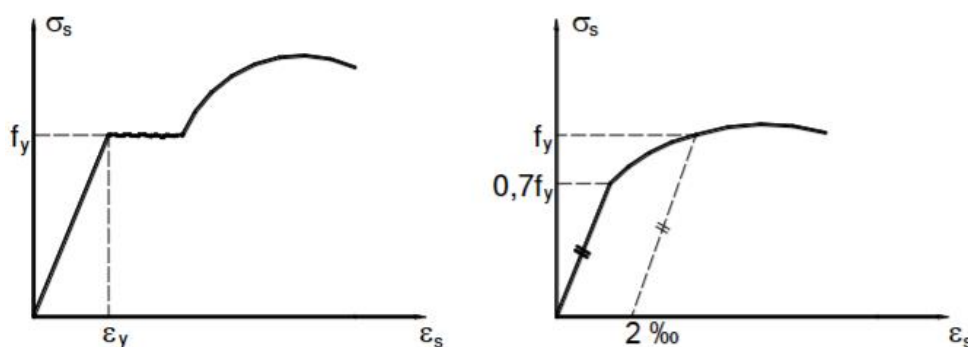
3.2.1.2 Módulo de elasticidade e tensão de ruptura

De acordo com Santos (2013), quando submetemos um corpo de prova de um determinado material a tensões crescentes de tração ou compressão, observa-se, de forma típica, que até um certo limite superior as tensões (σ) são proporcionais às deformações específicas correspondentes (ϵ). Santos também cita que a deformação específica é definida como o quociente entre o alongamento ou encurtamento do corpo de prova e seu comprimento inicial, esse comportamento linear é conhecido como Lei de Hooke ($\sigma = E \cdot \epsilon$). A constante de proporcionalidade (E) é uma propriedade característica do material e recebe o nome de módulo de elasticidade.

O módulo de elasticidade descreve a relação entre a tensão aplicada e a deformação gerada, funcionando como um parâmetro de rigidez do material quanto maior o módulo, menor será a deformação. Os diagramas tensão–deformação ($\sigma \times \epsilon$) dos aços laminados a quente (CA-25 e CA-50) e dos aços trefilados a frio (CA-60) apresentam comportamentos distintos. Enquanto os aços CA-25 e CA-50 exibem um patamar de escoamento bem definido, permitindo identificar claramente a tensão de início de escoamento (f_y), o mesmo não ocorre nos aços CA-60, que não apresentam esse trecho característico. Por essa razão, para o aço CA-60 adota-se uma tensão de escoamento

convencional, definida como a tensão correspondente a uma deformação residual de 2‰. Isso significa que, ao ser carregado até esse valor e posteriormente descarregado, o material não retorna completamente ao seu comprimento inicial, mantendo uma deformação permanente de 0,2%. Esse comportamento está de acordo com as definições apresentadas na ABNT NBR 7480 (2024) e pode ser representado na Figura 2 através do gráfico de tensão x deformação real dos aços brasileiros para as classes CA-25, CA-50 e CA-60.

Figura 2: Diagrama tensão x deformação real dos aços brasileiros.



a) CA-25 e CA-50;

b) CA-60.

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 7480, 2024.

3.2.1.3 Aderência

A caracterização da superfície de aderência das barras de aço destinadas a armaduras de concreto armado é definida pelo coeficiente de conformação superficial, determinado por meio do ensaio prescrito na ABNT NBR 7477 (1982). A NBR 7480 (2024) estabelece os valores mínimos desse coeficiente de acordo com a categoria do aço. Já a ABNT NBR 6118 (2023), avalia a conformação superficial por meio do coeficiente η_1 , cujo valor depende do tipo de superfície lateral da barra. As relações entre o coeficiente de conformação superficial e o coeficiente η_1 encontram-se apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2: Relação entre η_1 e η na aderência.

Superfície	η_1	η
Lisa (CA-25)	1	$\geq 1,0$
Entalhada (CA-60)	1,4	$\geq 1,5$
Nervurada (CA-50)	2,25	$\geq 1,5$

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 6118, 2023.

3.2.2 Massa específica

De acordo com a ABNT NBR 8800 (2024), o aço apresenta densidade de 7.850 kg/m^3 , esse dado é essencial tanto para a determinação do peso próprio de vigas, pilares e fundações metálicas, que integram as cargas permanentes do projeto estrutural, quanto para o planejamento logístico relacionado ao transporte e ao manuseio dos elementos.

3.3 VERGALHÕES DE FIBRA DE VIDRO (GFRP/PRFV)

Segundo Henin e Morcous (2021), no cenário atual da construção civil, marcado pela busca por materiais alternativos e de maior eficiência quando comparado aos convencionais, com isso, conhecidos como Polímero Reforçado com Fibra de Vidro (PRFV) do inglês Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP), têm ganhado destaque devido à resistência à corrosão, à oxidação e à tração. Em comparação ao aço, esses vergalhões podem ser até nove vezes mais leves, proporcionando maior facilidade de transporte, redução do peso próprio das estruturas e desempenho superior frente a ambientes agressivos. Os vergalhões de fibra de vidro são classificados como elementos estruturais compósitos, formados pela combinação de dois ou mais materiais, cujas propriedades variam conforme a proporção e a disposição de seus constituintes. A Figura 3 apresenta o vergalhão de fibra de vidro em diferentes diâmetros comerciais.

Figura 3: Vergalhão de fibra de vidro (GFRP/PRFV)



Fonte: South Safe, 2025.

Conforme descrito por Ota (2004), as fibras de vidro são produzidas a partir da combinação de óxidos de silício, alumínio, boro, cálcio e magnésio. Essa composição garante ao PRFV elevada resistência à tração, baixo coeficiente de dilatação térmica e boas propriedades elétricas, além de apresentar um custo considerado acessível.

Segundo Abbood *et al.* (2021), existem diversos tipos de fibras disponíveis no mercado, como carbono, vidro, aramida e basalto. Entretanto, a fibra de vidro é a mais empregada em aplicações industriais, sendo amplamente utilizada na engenharia civil por oferecer uma relação custo-benefício vantajosa. De forma geral, os vergalhões produzidos com fibra de vidro apresentam alta resistência mecânica à tração, boa resistência à água e a agentes químicos, além de custo relativamente baixo.

Os vergalhões de fibra de vidro, destacam-se como uma alternativa atrativa e inovadora. Formados por fibras de vidro incorporadas em resinas poliméricas, esses elementos apresentam elevada resistência à tração, baixo peso e total imunidade à corrosão, características que os tornam especialmente adequados para aplicação em ambientes de elevada agressividade (Attia *et al.*, 2020).

De acordo com Tavares (2006), as barras de PRFV são compósitos constituídos por fibras de reforço como: carbono, aramida e vidro impregnados com resina. Atualmente, sua produção é predominantemente realizada pelo processo de tração contínua, fundamental para assegurar a uniformidade e a qualidade do produto. Esse método garante uma distribuição homogênea das fibras e da matriz polimérica, resultando em barras de PRFV com as propriedades mecânicas desejadas.

A tendência de crescimento no uso dessas barras é destacada por Henin (2021), que atribui essa expansão às características essenciais, como leveza, resistência à corrosão, neutralidade eletromagnética e elevada resistência à tração. As referidas propriedades reforçam o potencial do material como substituto parcial ou total dos vergalhões de aço em situações específicas.

Conforme apontam Micelli e Nanni (2004), a expansão do uso de compósitos reforçados com fibras na engenharia civil evidencia a necessidade de um entendimento mais aprofundado sobre a durabilidade desses materiais quando expostos a ambientes agressivos.

3.3.1 Propriedades mecânicas do PRFV

3.3.1.1 Resistência a tração e compressão

Uma das principais vantagens do vergalhão de fibra de vidro é sua elevada resistência à tração. A resistência última desses vergalhões pode atingir valores até aproximadamente duas vezes superiores aos do aço CA-50, variando entre 400 e 1600 MPa, dependendo da composição adotada pelo fabricante (ACI 404.1R, 2025). A Tabela 3 apresenta características em relação a propriedades mecânicas de tração de barras de aço e barras de PRFV.

Tabela 3: Propriedades de tração típicas em barras de aço e PRFV.

	Aço	GFRP
Tensão de escoamento (MPa)	276 a 517	N/A
Resistência à tração (MPa)	483 a 690	483 a 1600
Módulo de elasticidade (GPa)	200	35 a 51
Deformação no escoamento (%)	0,14 a 0,25	N/A
Deformação na ruptura (%)	6,0 a 12,0	1,2 a 3,1

Fonte: Adaptado da ACI 440.1R, 2015.

De acordo Kasai (2022), barras de maior diâmetro tendem a apresentar uma resistência à tração nominal ligeiramente menor. Isso ocorre porque, em seções maiores, a distribuição de tensão entre as fibras do núcleo e da superfície da barra se comporta de maneira diferente.

Segundo, Moura (2016), a resistência à compressão de vergalhões de PRFV com diâmetro de 15,7 mm correspondia a 51,7% da resistência à tração do material, esse comportamento ocorre porque a resistência à tração é controlada pelas fibras de vidro, enquanto a resistência à compressão é determinada pela matriz polimérica.

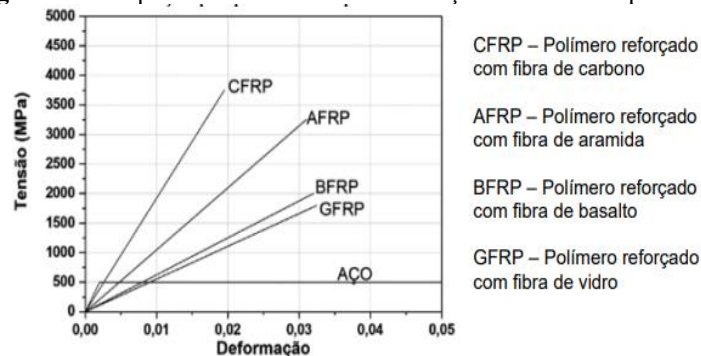
3.3.1.2 Módulo de elasticidade e tensão de ruptura

Segundo El-Hassan *et al.* (2018), uma propriedade relevante do PRFV é o seu módulo de elasticidade, que pode variar conforme o tipo de fibra empregada e o processo de fabricação adotado. Isso difere dos vergalhões convencionais de aço, cujo módulo de elasticidade pode ser considerado praticamente uniforme entre diferentes fornecedores.

De acordo com Mazzú (2021), a principal diferença entre as propriedades das barras de aço e das barras de PRFV está relacionada ao módulo de elasticidade e ao comportamento na ruptura. Os vergalhões de fibra apresentam módulo de elasticidade correspondente, em média, a 25% do módulo de elasticidade do aço. Além disso, seu modo de ruptura é frágil e ocorre sem patamar de escoamento, enquanto o aço apresenta

comportamento dúctil. A Figura 4 apresenta a representação gráfica dos gráficos de tensão x deformação de materiais poliméricos.

Figura 4: Comportamento tensão x deformação de materiais poliméricos.



Fonte: Mazzú, 2021.

ACI 440 1R (2015) afirma que diferentemente do aço, que é um material dúctil, o vergalhão de fibra apresenta comportamento elástico-linear até o momento da ruptura, isso significa que, ao atingir sua capacidade máxima, o vergalhão rompe de forma súbita e sem aviso prévio, caracterizando um comportamento frágil. Esse tipo de ruptura exige que as normas de projeto e a filosofia de dimensionamento adotem posturas mais conservadoras, de modo a garantir que a falha estrutural ocorra por mecanismos mais dúcteis, como o esmagamento do concreto na região comprimida, em vez da ruptura súbita da armadura.

De acordo com Stratus (2015), as barras de fibra de vidro apresentam resistência à tração significativamente superior ao aço convencional, podendo alcançar valores acima de 1000 MPa, superando com grande margem o aço CA-50 normalmente empregado na construção civil. Essa resistência, porém, depende do diâmetro do vergalhão: barras de maior seção tendem a apresentar maiores valores de resistência à tração. Isso ocorre porque as fibras localizadas na região central da barra são menos solicitadas em comparação com as fibras próximas à superfície, resultando em uma distribuição de tensões menos eficiente. A Tabela 4 a seguir apresenta propriedades relevantes sobre os PRFV em seus diferentes diâmetros comerciais.

Tabela 4: Propriedade mecânica das barras de fibra de vidro.

PROPRIEDADES	UN.	DIÂMETROS PADRÕES (mm)							
		φ6	φ10	φ12	φ14	φ18	φ20	φ25	φ32
Tensão nominal de tração	Mpa	1070	1047	989	953	903	876	831	727
Força de tração	Kgf	2500	5500	9300	12200	19100	22900	34010	42900
Coefficiente de Poisson		0,25	0,21	0,26	0,25	0,25	0,25	0,28	0,26
Módulo de elasticidade	Gpa	48	48	48	48	47	47	46	46
Tensão nominal de compressão	Mpa	553	541	494	483	514	516	505	493

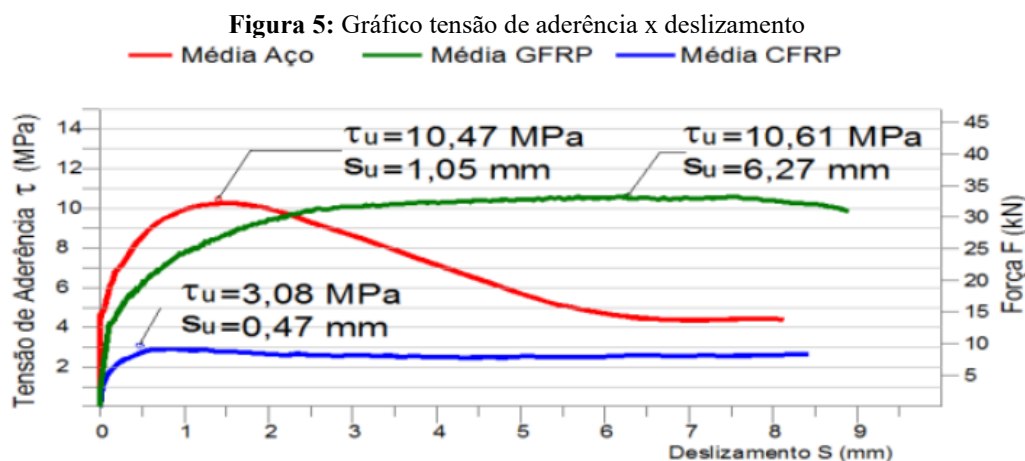
Fonte: Adaptado de Manual técnico Stratus, 2015.

3.3.1.3 Aderência

A aderência entre os vergalhões de polímero reforçado com fibras (PRFV) e o concreto é fundamental para que as tensões sejam transmitidas adequadamente entre ambos. De acordo com Mohamed *et al.* (2021), esse desempenho depende diretamente do tratamento superficial aplicado às barras, que podem receber fibras helicoidais, revestimento com areia, quartzo ou ainda nervuras formadas na própria matriz resinosa.

Bank (2006) destaca que o desempenho da aderência também é condicionado pelas propriedades mecânicas da barra, pelo seu processo de fabricação e pelas condições ambientais. Inicialmente, a transferência de esforços ocorre por adesão química entre o vergalhão e o concreto, a medida que a tensão aplicada aumenta, essa adesão perde eficiência e o atrito passa a ser o principal mecanismo resistente, seguido pelo engrenamento mecânico das nervuras com o concreto adjacente.

De acordo com Araújo (2017) apresentou um estudo que avaliou a aderência de barras de PRFV em estruturas de concreto. A investigação foi conduzida por meio de ensaios de arrancamento, utilizando três tipos de materiais para comparação, foram eles vergalhões de fibra de vidro, fibra de carbono (CFRP) e barras de aço. A Figura 5 apresenta o comportamento do vergalhão de fibra quando submetido a uma tensão, os resultados apresentam o deslizamento do material conforme aplicação de tensão.



Fonte: Araújo, 2017.

3.3.1.4 Massa específica

Os materiais compósitos reforçados com fibras têm ganhado espaço na engenharia civil devido às suas propriedades específicas, que combinam leveza, resistência mecânica e a intempéries. Nesse contexto, materiais como os vergalhões de fibra de vidro se destacam por apresentarem baixo peso, o que facilita significativamente o transporte, o manuseio e a instalação em obra. A densidade dos PRFV varia entre 1250 e 2100 kg/m³, representando cerca de 16% a 27% da densidade do aço, o que evidencia a expressiva redução de peso proporcionada por esse material, conforme ressalva Moura (2021).

3.4 USO DO PRFV NO BRASIL

Inicialmente desenvolvidos para a indústria aeroespacial no pós-Segunda Guerra Mundial, devido à combinação de leveza e elevada resistência, os compósitos de FRP rapidamente passaram a ser utilizados em outros setores, como o naval, automotivo e esportivo, na construção civil, seu uso ganhou destaque diante da necessidade de mitigar problemas de corrosão em estruturas de concreto armado, agravados especialmente pelo emprego de sais de degelo em pontes nos Estados Unidos a partir da década de 1950 (Naser *et al.*, 2019).

No Brasil, o interesse por pesquisas envolvendo barras de PRFV teve início na década de 1990, inicialmente por meio de iniciativas isoladas em Fortaleza - CE. Esse movimento ganhou continuidade com duas publicações apresentadas no III Congresso de Engenharia Civil, realizado em Juiz de Fora - MG, sendo a segunda delas uma introdução à dissertação de mestrado do autor Tavares (2006).

Atualmente não existe uma norma que regulamenta o uso de vergalhões de fibra de vidro em elementos estruturais, Couto (2007) afirma que se torna imprescindível conduzir estudos adicionais para uma avaliação mais aprofundada do comportamento desses materiais em relação ao concreto. Atualmente, os cálculos são realizados de forma análoga ao concreto armado convencional, complementados por recomendações de normas internacionais, como a ACI 440.1R-15.

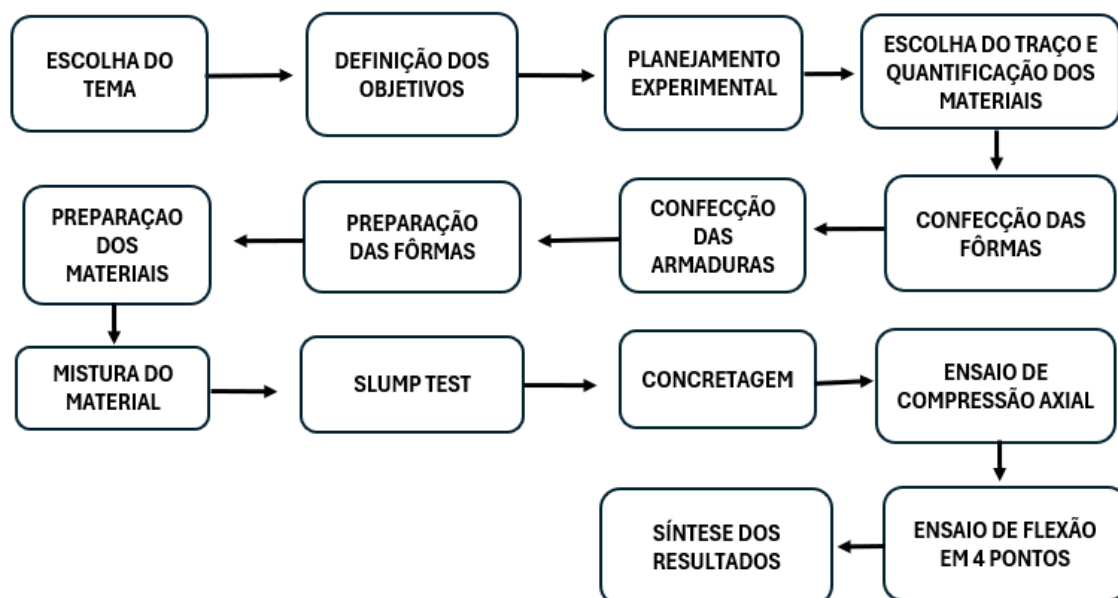
Segundo Moura (2021), embora os vergalhões de aço revestidos com epóxi tenham sido inicialmente a solução preferencial, a constatação de processos corrosivos nesses materiais e a crescente busca por alternativas não metálicas, especialmente para instalações de ressonância magnética na década de 1980, impulsionaram o avanço e a adoção dos vergalhões de polímero reforçado com fibra de vidro.

Abbood *et al.* (2021), afirma que o dimensionamento de estruturas reforçadas com PRFV deve considerar os estados limites. Na maior parte das situações, o projeto torna-se mais crítico no estado limite de serviço, diferentemente do que ocorre em estruturas convencionais com barras de aço, devido ao comportamento frágil característico das barras. Já as armaduras metálicas são dimensionadas de modo que o aço atinja o escoamento antes do esmagamento do concreto, fazendo com que a falha seja controlada pelo próprio concreto ou pela ruptura das barras.

4 METODOLOGIA

O desenvolvimento do projeto iniciou-se com a definição do tema e dos objetivos a serem alcançados. Na sequência, foi realizada uma pesquisa bibliográfica para identificar a metodologia mais adequada para aplicação no trabalho, feito isso optou-se por uma pesquisa do tipo caracterização quali-quantitativa, na qual, a partir da comparação entre resultados obtidos em ensaios laboratoriais, foi possível avaliar os parâmetros necessários para atingir os objetivos propostos. A Figura 6 apresenta um fluxograma que sintetiza todas as etapas metodológicas adotadas ao longo da pesquisa.

Figura 6: Fluxograma que representa os passos da metodologia aplicada na pesquisa.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Finalizado a etapa teórica da pesquisa, foi dado início na parte prática, no qual se foi realizada a confecção e concretagem dos corpos de prova no Laboratório de Materiais da UFERSA, campus Caraúbas, durante o primeiro semestre do ano de 2025.

Em seguida, após o período necessário para a cura do concreto, foram realizados os ensaios de resistência à compressão no mesmo laboratório. Concluída essa etapa, os corpos de prova prismáticos foram encaminhados ao Laboratório de Engenharias da UFRN, campus Natal, para a realização dos ensaios de flexão em quatro pontos.

4.1 CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Foram confeccionados sete corpos de prova prismáticos, identificados como V1, V2, V3, V4, V5, V6 e V7, sendo apenas o V1 armado com vergalhões de aço, enquanto os demais utilizaram barras de PRFV. A etapa de concretagem precisou ser dividida em três misturas distintas (T1, T2 e T3) devido à limitação de volume da betoneira, o que exigiu a produção de sucessivas “betonadas” para atender todo o conjunto de vigas. Para cada uma dessas misturas foram moldados quatro corpos de prova cilíndricos, identificados como CP1, CP2, CP3 e CP4, totalizando 12 unidades, permitindo assim o controle da resistência à compressão correspondente a cada traço utilizado.

4.1.1 Escolha do traço

Para a confecção dos concretos, adotou-se o traço 1:2:2 com relação água/cimento 0,55, prevendo um concreto classe de consistência S50 de acordo com a NBR 8953:2015. O traço, baseado nas propriedades dos materiais da Tabela 5, resultou em consumo de cimento de 423 kg/m³, teor de argamassa de 72%, argamassa seca de 60% e abatimento estimado de 80 mm, adequado ao adensamento e à moldagem dos corpos de prova. A Tabela 6 apresenta o resumo do traço utilizado.

Tabela 5: Propriedades dos materiais utilizados para cálculo do traço escolhido.

PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

Material	Massa específica (KG/m ³)	Massa unitária (Kg/m ³)
Cimento	3140,00	960,00
Areia	2650,00	1520,00
Brita	2700,00	1750,00

Fonte: Autoria própria, 2025.

Tabela 6: Resumo geral do traço utilizado.

RESUMO - TRAÇO

Cimento	Areia	Brita	a/c
1,00	2,00	2,00	0,55
Teor de argamassa (%)	Teor de argamassa seca (%)	Consumo de Cim (kg/m ³)	Percas consideradas por concretagem %
72%	60%	423,02	25%

Fonte: Autoria própria, 2025.

4.1.2 Confeção das fôrmas

Na fabricação das formas dos corpos de prova prismáticos foram utilizadas chapas de madeirite plastificado, barras roscadas de 10 mm, porcas tipo borboleta, pregos e parafusos. Devido às limitações dimensionais do equipamento utilizado nos ensaios, obrigatoriamente optou-se pela produção de fôrmas padronizadas com dimensões pré-definidas de acordo com as dimensões especificadas para o uso da máquina de realização do ensaio de flexão.

Para sua confecção, foram empregadas chapas de madeirite plastificado, caibros de madeira e barras roscadas, todo o processo de carpintaria foi desenvolvido com auxílio de um profissional da área para então obter a melhor qualidade possível nos moldes. Ao todo, foram produzidas 7 fôrmas com dimensões de 15 x 15 x 55 cm de acordo com as limitações técnicas de dimensões do equipamento utilizado para ensaio. A Figura 7 a seguir apresenta um modelo representativo das fôrmas utilizadas no processo.

Figura 7: Modelo de forma utilizado para confecção dos prismas.



Fonte: Autoria própria, 2025.

4.1.3 Confeção das armaduras

Para a confecção das armaduras foram utilizados vergalhões de aço CA-50 e de fibra de vidro, ambos com diâmetro de 10 mm. Os (GFRP) foram adquiridos da empresa TopFiber, o que assegura a qualidade e a eficiência das propriedades mecânicas do material, enquanto os vergalhões em aço foram adquiridos no mercado local de Caraúbas - RN.

A viga V1 foi armada com a configuração mínima de uma viga comum, com quatro barras de aço CA-50, sendo adotada como referência para comparação nos ensaios. Nas vigas V2 a V7, as armaduras longitudinais principais foram compostas por vergalhões de fibra de vidro, com armaduras contendo quatro, cinco, seis e sete barras respectivamente em cada viga, um aumento gradativo de 1 barra por viga. Enquanto as armaduras transversais (estribos) foram confeccionadas com barras de aço CA-50 de 6,3 mm. As Figuras 8, 9 e 10 a seguir apresentam o detalhamento construtivo de cada modelo de viga utilizado na pesquisa.

Figura 8: Detalhamentos da viga V1 armada em aço e V2, V3 armadas em fibra.

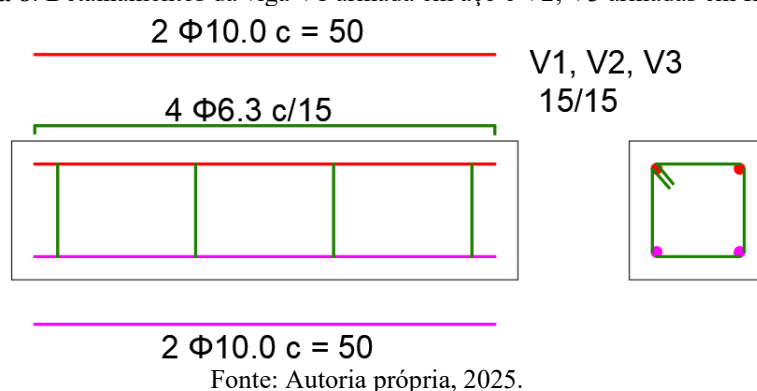


Figura 9: Detalhamento armaduras das vigas V4 e V5 armadas em fibra.

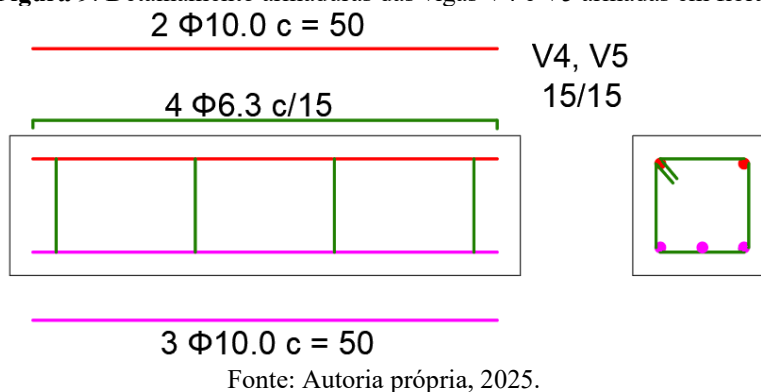
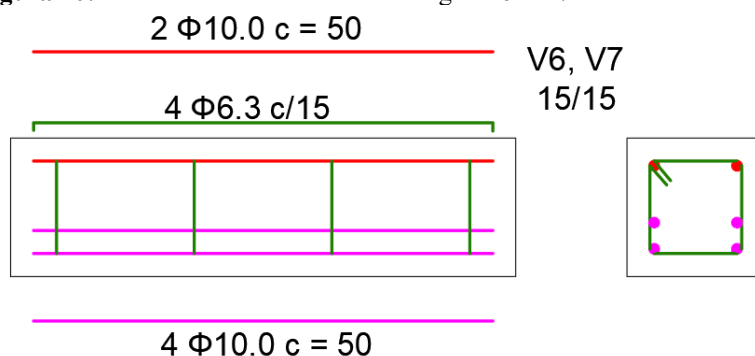


Figura 10: Detalhamento armaduras das vigas V6 e V7 armadas em fibra.



Fonte: Autoria própria, 2025.

4.2 CONCRETAGEM

4.2.1 Preparação das fôrmas

Com o objetivo de garantir uma execução adequada do processo de concretagem, as fôrmas foram preparadas antecipadamente para o recebimento do concreto. Nessa etapa, foram verificadas todas as dimensões e realizado o travamento das estruturas, evitando possíveis aberturas durante o lançamento do material. Em seguida, aplicou-se silicone nas frestas remanescentes, com a finalidade de impedir a perda de umidade do concreto fresco. Após a secagem do silicone foi então aplicado óleo desmoldante no interior das fôrmas, assegurando uma desmoldagem adequada dos corpos de prova.

O mesmo procedimento foi realizado para os corpos de prova cilíndricos, sendo aplicada apenas a camada de desmoldante em seu interior.

Posteriormente as armaduras foram locadas em cada uma das fôrmas respeitando os espaçamentos mínimos exigidos pela NBR 6118:2023, no projeto em questão foi utilizado um espaçamento de 2,5 cm entre a armadura e a camada externa de concreto. A Figura 11 apresenta as fôrmas preparadas para a concretagem.

Figura 11: Fôrma com armadura preparada para recebimento do concreto.



Fonte: Autoria própria, 2025.

4.2.2 Preparação e mistura do material

Para dar início à etapa de concretagem, realizou-se a separação e pesagem dos materiais. Devido à limitação de volume da betoneira, a moldagem dos corpos de prova foi dividida em três traços distintos: T1, T2 e T3. Os traços T1 e T2 produziram dois corpos de prova prismáticos e quatro cilíndricos cada, acrescentando-se 25% de material para compensar perdas. O traço T3 foi destinado à produção de três corpos de prova prismáticos e quatro cilíndricos, também com acréscimo de 25% para eventuais desperdícios. A Tabela 7 apresenta o resumo dos traços utilizados.

Tabela 7: Resumo da quantidade de material em massa utilizado para cada concretagem.**QUANTIDADE DE CADA MATERIAL EM MASSA (T1, T2)**

volume total (com percas em m ³)	cimento (Kg)	areia (Kg)	brita (Kg)	água (L)	Teor de argamassa	Teor de argamassa seca	Consumo. Cim (kg/m ³)
0,0388	16,41	32,82	32,82	9,02	72%	60%	423,02

QUANTIDADE DE CADA MATERIAL EM MASSA (T3)

volume total (com percas em m ³)	cimento (Kg)	areia (Kg)	brita (Kg)	água (L)	Teor de argamassa	Teor de argamassa seca	Consumo. Cim (kg/m ³)
0,0543	22,95	45,90	45,90	12,62	72%	60%	423,02

Fonte: Autoria própria, 2025.

Na etapa de separação e pesagem dos materiais, todo o agregado coletado passou por triagem para remover impurezas e partículas indesejadas. Em seguida, realizou-se a pesagem dos componentes conforme as proporções definidas para cada traço. A Figura 12 apresenta os materiais utilizados no concreto sendo devidamente pesados para a preparação das misturas.

Figura 12: Etapa representativa da pesagem dos materiais.

Fonte: Autoria própria, 2025.

Por fim, houve a separação de cada um em recipientes individuais para facilitar o controle das proporções. Concluída essa etapa, deu-se início ao processo de mistura dos materiais, resultando na obtenção do concreto com as características desejadas.

Concluída a etapa de pesagem e separação dos materiais, iniciou-se o processo de mistura dos componentes em uma betoneira estacionária de 150 L. O procedimento foi executado de forma idêntica para cada traço, garantindo uniformidade e homogeneidade na composição do concreto. A Tabela 8 a seguir apresenta o passo a passo do processo de mistura adotado para os traços T1, T2 e T3.

Tabela 8: Processo de execução realizado para mistura de cada traço de concreto.

ETAPAS PARA MISTURA DO CONCRETO			
PASSOS	DESCRIÇÃO DA ETAPA EXECUTIVA	QUANTIDADE ADICIONADA	
		T1, T2	T3
1º Passo	Umidificar a betoneira	-	-
2º Passo	Adição de 100% do Agregado graúdo (Brita)	32,82 Kg	45,90 Kg
3º Passo	Adição de 50% de água	4,51 Kg	6,31 Kg
4º Passo	Ligar a betoneira e misturar por 3 Minutos	-	-
5º Passo	Adicionar 100% do cimento aos poucos.	16,41 Kg	22,95 Kg
6º Passo	Misturar por 3 minutos	-	-
7º Passo	Adicionar 100% do agregado miúdo (Areia) aos poucos	32,82 Kg	45,90 Kg
8º Passo	Misturar por 3 minutos	-	-
9º Passo	Adicionar os 50% restantes de água	4,51 Kg	6,31 Kg
10º Passo	Misturar até homogeneizar	-	-

Fonte: Autoria própria, 2025.

4.2.3 Slump test

Para avaliar as características do concreto, além da verificação tátil e visual, foi realizado o ensaio de abatimento de tronco de cone (Slump Test), conforme ilustrado na Figura 13, para cada um dos traços produzidos. Todo o processo foi realizado conforme o processo citado pela NBR 16889:2020, esse ensaio possibilitou analisar o nível de abatimento e trabalhabilidade em cada traço, além de verificar a homogeneidade quando relacionado os três.

Figura 13: Slump test realizado no traço T1.



Fonte: Autoria própria, 2025.

4.2.4 Concretagem dos corpos de prova

Nos corpos de prova prismáticos, o preenchimento e o adensamento foram realizados manualmente, conforme orienta a ABNT NBR 5738:2015.

Após essa etapa, procedeu-se ao nivelamento da superfície com colher de pedreiro, e os corpos de prova foram encaminhados para a cura, seguindo os cuidados necessários para garantir o desempenho adequado do material. A Figura 14 apresenta os corpos de prova imediatamente após a concretagem.

Figura 14: Corpos de prova prismáticos após a concretagem.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Para os corpos de prova cilíndricos padrões para ensaios de compressão axial, a concretagem também seguiu as recomendações da NBR 5738:2015. Cada molde foi preenchido em duas camadas, aplicando-se 12 golpes com soquete manual em cada uma delas, garantindo o adensamento adequado do concreto e a eliminação de possíveis vazios. No total foram moldados 12 corpos de prova desse modelo, quatro para cada traço.

4.2.5 Desforma e Cura dos Corpos de Prova

A etapa final antes da realização dos ensaios consistiu na desmoldagem dos corpos de prova e na aplicação do processo de cura úmida do concreto. Durante as primeiras 48 horas, os corpos de prova foram mantidos em ambiente protegido e umidificados diariamente, garantindo a manutenção da umidade necessária para o início da hidratação do cimento. Após esse período inicial, procedeu-se à retirada das fôrmas e à identificação individual de cada exemplar para controle e rastreabilidade.

Concluída a desforma, todos os corpos de prova foram submersos em tanque de água, onde permaneceram até completar os 28 dias de cura. Somente após esse período foram realizados os ensaios previamente definidos. A Figura 15 a seguir apresenta o local de cura dos corpos de prova durante esse período.

Figura 15: Local utilizado para cura úmida dos corpos de prova durante 28 dias.



Fonte: Autoria própria, 2025.

4.3 ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL DO CONCRETO

Concluído o período de 28 dias de cura, teve início a etapa experimental da pesquisa com a realização dos ensaios de compressão axial de acordo com a NBR

5738:2015. Esses ensaios foram conduzidos na prensa hidráulica disponível no Laboratório de Engenharia da UFERSA Campus Caraúbas. A máquina forneceu os resultados em unidades de força (kN), sendo necessária a conversão desses valores para tensão de compressão do concreto (f_c), por meio de cálculo simples utilizando a Equação 1. A Figura 16 apresenta a organização do corpo de prova na prensa no momento de realização do ensaio de compressão axial.

$$\alpha = 10 \times (F/A) \quad (\text{Equação 1})$$

α = Tensão de resistência a compressão do concreto (Mpa);

F = Força aplicada na ruptura do corpo de prova (KN);

A = Área de seção do corpo de prova cilíndrico (cm²).

Figura 16: Organização do corpo de prova para realização do ensaio de compressão axial.



Fonte: Autoria própria, 2025.

4.4 ENSAIO DE FLEXÃO EM 4 PONTOS

O ensaio de flexão em quatro pontos constituiu na etapa experimental destinado a determinar a carga de fissuração inicial e a carga máxima de ruptura das vigas. Seu objetivo foi caracterizar o desempenho da viga de referência em aço (V1) com o das vigas armadas com vergalhões de PRFV. O ensaio foi conduzido em uma prensa hidráulica no laboratório de engenharia civil da UFRN, aplicando-se carregamento vertical em uma viga bi-apoiada, com forças distribuídas em dois pontos espaçados a 15 cm. A Figura 17 apresenta o arranjo experimental utilizado para a execução do ensaio.

Figura 17: Viga preparada para início do ensaio de flexão em quatro pontos.



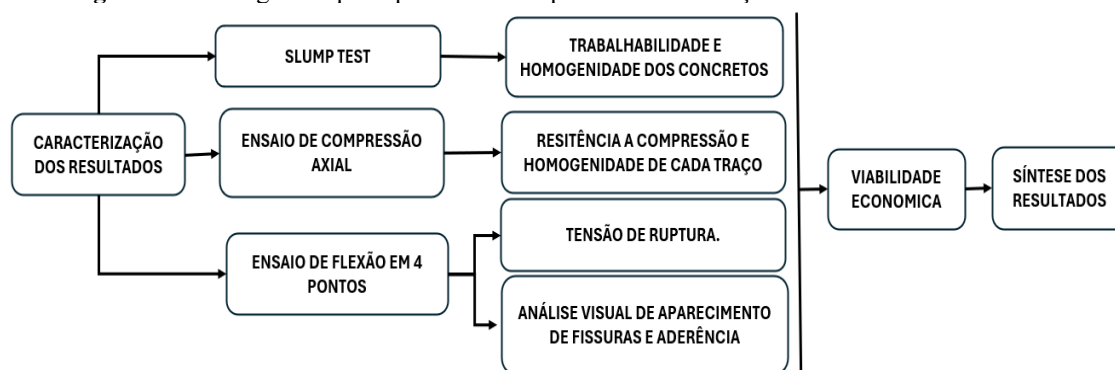
Fonte: Autoria própria, 2025.

Os corpos de prova foram rompidos na seguinte ordem: V1, V2, V3, V4, V5, V6 e V7, iniciando pela viga de referência V1, armada com vergalhões de aço. O ensaio permitiu determinar a carga de ruptura de cada elemento além de que por meio de observação visual foi possível identificar o modo de falha, comportamento estrutural e a carga de início de fissuração de cada viga.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados da pesquisa foram organizados em duas etapas, contemplando a caracterização qualitativa e quantitativa dos resultados obtidos através dos ensaios experimentais e a viabilidade econômica do uso de cada material. A Figura 18 apresenta as etapas que compõem o processo de obtenção e análise dos resultados deste trabalho.

Figura 18: Fluxograma que representa as etapas de caracterização dos resultados do trabalho.



Fonte: Autoria própria, 2025.

5.1 ENSAIOS

5.1.1 Slump test

Com resultados colhidos no slump teste foi possível verificar a homogeneidade entre os traços e com isso a obtenção de resultados conclusivos nas etapas experimentais. Como foi necessário a realização de três traços distintos de concreto (T1, T2 e T3) foram realizados 3 testes de slump, os resultados obtidos neles foram bem semelhantes com abatimentos próximos a 80 mm, assim como era esperado na etapa de planejamento no qual foi pré-estabelecido um abatimento de 80 mm para cada concretagem, uma vez que a dosagem dos materiais foi proporcional para cada um dos traços. A Tabela 9 apresenta os resultados de abatimentos obtidos nos testes.

Tabela 9: Resultados de abatimento em cada um dos traços.

TRAÇO	ABATIMENTO (mm)
T1	78,0
T2	83,0
T3	87,0
MÉDIA	82,5

Fonte: Autoria própria, 2025.

No geral, o abatimento médio do concreto utilizado foi de 82,5 mm, permitindo sua classificação como classe S50, conforme a NBR 8953:2015, que engloba valores entre 50 e 100 mm. Esse comportamento indica um concreto com boa trabalhabilidade, adequado para a concretagem de diversos elementos estruturais e fundações. O resultado obtido está de acordo com o que havia sido previamente estabelecido na etapa de definição do traço para a moldagem dos corpos de prova.

5.1.2 Compressão axial do concreto

Após a realização do ensaio de compressão em cada corpo de prova, foi possível determinar a resistência à compressão dos três traços utilizados na confecção das vigas. A Tabela 10 apresenta os resultados obtidos individualmente, bem como as médias correspondentes a cada traço analisado.

Tabela 10: Resultados obtidos após ensaio de compressão axial dos corpos de prova cilíndricos.

TRAÇO	CP	FORÇA DE RUPTURA (KN)	TENSÃO DE RUPTURA (Mpa)	TENSÃO DE RUPTURA MÉDIA (Mpa)
T1	CP1	163,03	20,768	18,216
	CP2	126,50	16,115	
	CP3	141,85	18,070	
	CP4	140,6	17,911	
T2	CP1	148,36	18,899	18,811
	CP2	134,68	17,157	
	CP3	140,02	17,837	
	CP4	167,62	21,353	
T3	CP1	142,48	18,150	18,587
	CP2	160,41	20,434	
	CP3	138,54	17,648	
	CP4	142,21	18,116	

Dimensões do corpo de prova utilizado: Diâmetro = 10; Comprimento = 20 (cm)

Fonte: Autoria própria, 2025.

Com relação aos resultados obtidos, observou-se que os valores de resistência para cada traço foram bem semelhantes, ocorrendo pouca variação de resistência entre os traços analisados, comprovando assim que a homogeneidade entre os traços foi alcançada, dessa maneira não influenciando no desempenho individual de cada viga ensaiada.

5.1.3 Ensaio de flexão em quatro pontos

Para esse procedimento experimental foram registrados os valores de carga máxima atingida, aparecimento e evolução de fissuras, além das flechas correspondentes a cada corpo de prova.

5.1.3.1 Carga de aparecimento de fissuras.

Com o surgimento das primeiras fissuras em cada viga, foi possível identificar a carga correspondente ao início da fissuração para cada corpo de prova. A Tabela 12 apresenta os valores obtidos para a carga de início de fissuras em cada viga.

Tabela 11: Cargas de aparecimento de fissuras em cada corpo de prova prismático.

CORPO DE PROVA	CARGA DE APARECIMENTO DE FISSURAS (tf)	CARGA MÉDIA POR MODELO DE ARMADURA (tf)
V1	Não foi constatado fissuras	Não foi constatado fissuras
V2	3,80	3,70
V3	3,60	
V4	4,00	4,20
V5	4,40	
V6	4,90	5,05
V7	5,20	

Fonte: Autoria própria, 2025.

Com base nos resultados, pôde-se concluir que as vigas armadas com PRFV apresentaram formação antecipada de fissuras quando comparadas à viga de referência armada com aço, comportamento coerente com o menor módulo de elasticidade do material compósito. Entretanto, foi verificado que, ao aumentar a quantidade de barras na viga, maior é carga suportada antes do aparecimento de fissuras, o que pode ser atribuído ao acréscimo da área de contato entre as armaduras e o concreto. Esse aumento favorece a transferência de esforços e contribui para a melhoria da aderência entre o PRFV e a matriz cimentícia, refletindo em um desempenho estrutural mais eficiente.

5.1.3.2 Verificação de flecha

Além dos ensaios mecânicos, também foi realizada uma caracterização visual do comportamento das vigas durante o carregamento. Observou-se que não houve deformações excessivas, uma vez que a flecha não foi perceptível a olho nu, indicando

que os elementos mantiveram sua rigidez até níveis de carga próximos à ruptura. A Figura 19 ilustra um comportamento comum entre as vigas (com exceção da V1), evidenciando o aparecimento de fissuras típicas de flexão antes da ruptura, embora sem apresentar deformações visíveis ao observador.

Figura 19: Aparecimento de fissuras de flexão ocorrida nas vigas armadas com GFRP.



Fonte: Autoria própria, 2025.

5.1.3.3 Carga de ruptura

Na etapa de ensaio dos corpos de prova prismáticos todos os corpos de prova romperam a partir da região próxima aos apoios em direção ao centro, formando uma superfície inclinada com aproximadamente 45° (Figura 20), comportamento típico de ruptura por cisalhamento. A Tabela 11 apresenta os valores de carga de ruptura obtidos em cada ensaio.

Figura 20: Rompimento angulado saindo do apoio para o centro.

Fonte: Autoria própria, 2025.

Tabela 12: Valores obtidos em ensaio de flexão em 4 pontos para carga de ruptura dos corpos de prova prismático.

CORPO DE PROVA	CARGA DE RUPTURA (tf)	CARGA MÉDIA (tf)
V1	7	7
V2	6,8	6,5
V3	6,2	
V4	6,3	6,4
V5	6,5	
V6	6,7	6,75
V7	6,8	

Fonte: Autoria própria, 2025.

Os valores de ruptura obtidos nos ensaios apresentaram pequena variação entre os diferentes modelos de vigas analisados. A diferença entre a maior e a menor resistência média foi de aproximadamente 6,42%. Essa reduzida variação está associada, principalmente, à deficiência das armaduras transversais, uma vez que todas as vigas foram armadas de forma idêntica no que se refere aos estribos, o que contribuiu para a ocorrência de rupturas por cisalhamento antes do esgotamento da capacidade resistente à flexão.

5.1.3.4 Verificação da aderência do PRFV ao concreto

Como etapa complementar ao ensaio, as vigas foram levadas ao rompimento completo, mantendo-se a aplicação de carga mesmo após ultrapassarem o Estado Limite Último (ELU). Esse procedimento permitiu avaliar a aderência entre o vergalhão de fibra de vidro e o concreto. A análise visual evidenciou que o PRFV não apresentou uma boa aderência ao concreto, uma vez que foram observados sinais de ‘escorregamento’ durante a tração do elemento. Esse comportamento indica um desempenho negativo do compósito quanto à ancoragem, reforçando seu potencial para futuras investigações sobre o tema. A Figura 21 apresenta o aspecto final das vigas após o rompimento completo.

Figura 21: Rompimento total do corpo de prova.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Na imagem apresentada, observam-se ranhuras ao longo do vergalhão, evidenciando que houve deslizamento relativo entre a fibra e o concreto. Esse comportamento confirma a baixa aderência do material à matriz cimentícia.

5.2 ANÁLISE DE CUSTO-BENEFÍCIO

Para avaliar a viabilidade de substituir os vergalhões de aço por barras de PRFV, foi realizada uma análise de viabilidade econômica. Para isso, compararam-se os preços do vergalhão de aço de 10 mm, disponibilizado pela Gerdau empresa amplamente reconhecida no mercado nacional, com o valor dos vergalhões de fibra de vidro de mesmo diâmetro adquiridos da empresa TopFiber, em agosto de 2025.

Os vergalhões de fibra de vidro foram adquiridos por R\$ 348,00 o rolo com 100 m, resultando em um custo unitário de aproximadamente R\$ 3,48/m. Já para o vergalhão de aço, foi levantado no comércio local um preço médio de 55,00 R\$ por barra de 12,00 m, correspondendo a um valor unitário de 4,58 R\$/m. A Tabela 13 apresenta um resumo dos valores e parâmetros obtidos, relacionando tanto o preço unitário por metro de cada material quanto o custo por metro da viga pronta. Para esse cálculo, considerou-se apenas o total de barras longitudinais presentes em cada modelo de viga. De modo geral, observou-se uma diferença de 24,01% entre os materiais em qualquer comparação direta.

Tabela 13: Valores resumos obtidos para os vergalhões utilizados.

PREÇO (R\$/m)		CUSTO- BENEFÍCIO PRFV
VERGALHÃO DE AÇO (10 mm)	VERGALHÃO GFRP (10 mm)	
4,58	3,48	24,01 %
VIGA	PREÇO POR METRO LINEAR DE VIGA (R\$/metro de viga)	
	VERGALHÃO PRFV (10 mm)	VERGALHÃO DE AÇO (10 mm)
V1, V2, V3	13,92	18,33
V4, V5	17,40	N/A
V6, V7	20,88	N/A

Fonte: Autoria própria, 2025.

Em relação ao custo direto, no qual é considerado unicamente o valor bruto de cada vergalhão, observa-se que o uso do PRFV é mais econômico quando comparado ao aço. Foi identificada uma diferença de 24,01% no preço, representando uma redução significativa no valor do material. Vale destacar que todos os valores foram considerados sem a inserção do valor do frete, uma vez que ele é variável para cada região.

5.3 SÍNTESE DOS RESULTADOS

Ao término da etapa experimental, foi possível identificar diferenças relevantes entre as vigas armadas com barras de PRFV e a viga de referência armada com aço. Um dos aspectos mais significativos foi o comportamento relacionado ao aparecimento de fissuras, em que todas as vigas com reforçadas com fibra apresentaram fissuração visível durante o carregamento, enquanto a viga armada em aço não apresentou fissuras perceptíveis nesse estágio. Esse resultado confirma que a carga necessária para o início

da fissuração é menor quando utilizada armadura em PRFV, fato coerente com o menor módulo de elasticidade desse material. Esses achados corroboram Teixeira (2024), que também constatou que vigas armadas com vergalhões de fibra iniciam deslocamentos e fissurações antes das equivalentes armadas com aço.

Outro ponto relevante observado foi o comportamento de aderência entre as barras de PRFV e o concreto. Durante o rompimento completo das vigas, verificou-se indícios de perda de aderência entre o vergalhão e o concreto, efeito consistente com o que é descrito pela ACI 440.1R (2015), que destaca que, sob tensões de tração elevadas, pode ocorrer o deslizamento da barra de PRFV dentro do elemento estrutural. Esse comportamento evidencia a necessidade de maior investigação sobre o desempenho da ligação PRFV concreto, especialmente em situações de solicitações intensas.

Economicamente, a utilização do vergalhão de fibra de vidro pode representar uma alternativa viável, porém a decisão não deve considerar apenas o custo do material, aspectos como desempenho estrutural, eficiência em serviço e aceitação no mercado também influenciam diretamente essa escolha. Apesar do PRFV apresentar potencial de economia, o aço ainda se destaca como material predominante, mesmo com custo unitário mais elevado. Esse entendimento está alinhado com Câmara (2025), que destaca que a análise de custo isolada não é suficiente para definir o custo-benefício entre aço e PRFV. Para uma avaliação completa, é necessário considerar fatores adicionais, como comportamento mecânico, durabilidade, mão de obra especializada e aplicabilidade prática.

Por fim, verificou-se que todas as vigas analisadas apresentaram ruptura por cisalhamento. Esse fenômeno é descrito por Pinheiro *et al.* (2010), que afirma que a ruptura por cisalhamento está diretamente relacionada à deficiência da armadura transversal em suportar as tensões decorrentes da força cortante.

6 CONCLUSÃO

Mediante ao exposto, o estudo analisou o comportamento estrutural de vigas armadas com barras de fibra de vidro em comparação com vigas convencionais armadas com aço CA-50, ambas utilizando barras de 10 mm como armaduras principais. Para isso, foram desenvolvidos corpos de prova prismáticos e cilíndricos, executados ensaios de resistência à compressão axial e flexão em quatro pontos, além de análise tátil visual em cada experimento, no qual foram abordados parâmetros como: abertura de fissuras, aderência e modo de ruptura. Todo o processo experimental foi conduzido de acordo com normas técnicas vigentes para cada cenário, garantindo confiabilidade aos resultados.

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que as tensões de ruptura apresentaram valores próximos entre si, sendo observada uma diferença de aproximadamente 6,42% entre a viga armada com aço e as vigas armadas com PRFV. Verificou-se que todos os exemplares romperam por cisalhamento, o que evidencia um déficit nas armaduras transversais. Essa limitação poderia ser corrigida ainda na etapa de confecção das armaduras, por meio do aumento ou reforço dos estribos, especialmente nas regiões próximas aos apoios. Dessa forma, seria possível evitar o rompimento prematuro por cisalhamento e permitir que o comportamento à flexão se manifestasse de maneira mais representativa.

Aprofundando no ponto de análise visual, foi possível observar que as barras de fibra deslizavam dentro do concreto à medida que as vigas eram solicitadas até o rompimento total. Esse comportamento evidencia uma deficiência significativa na aderência entre o vergalhão e o concreto, característica essa, que não ocorre com barras de aço, as quais apresentam ligação muito mais eficiente com a matriz cimentícia.

Com base na análise econômica, constatou-se que o PRFV apresenta um custo competitivo em comparação ao aço. No entanto, avaliar apenas o preço do material isoladamente não garante que sua adoção seja a alternativa mais vantajosa.

A escolha entre vergalhões de fibra e de aço deve levar em conta fatores como vida útil, desempenho, aceitação no mercado, normatização e outros aspectos que influenciam a aplicação de um material novo na construção civil. Considerando esses elementos, observa-se que, apesar do potencial do PRFV, o vergalhão de aço ainda se destaca no uso estrutural por apresentar comportamento mais previsível, maior

confiabilidade e parâmetros normativos bem estabelecidos, consolidando-o como a solução mais adequada para a maioria das aplicações atuais.

Por fim, após toda a etapa de desenvolvimento do trabalho, foi possível constatar uma grande deficiência de estudos específicos nessa área, além da ausência de normatização adequada e da limitada disponibilidade desse material no mercado da construção civil. Esses fatores abrem espaço para pesquisas futuras que contribuam para solucionar tais desafios por meio de análises comparativas entre os dois materiais. Trabalhos dessa natureza podem auxiliar diretamente no avanço das normas técnicas para projetos de estruturas de concreto armado utilizando vergalhões de fibra de vidro no Brasil.

Diante dos resultados obtidos, recomenda-se que estudos futuros avancem para análises do comportamento à flexão em escala real de vigas reforçadas ou totalmente armadas com PRFV, permitindo comparar, com maior fidelidade, o desempenho estrutural desses elementos em condições mais próximas da prática. Além disso, investigações aprofundadas sobre o comportamento de aderência entre o concreto e as barras de PRFV devem ser conduzidas, uma vez que este parâmetro influencia diretamente a transferência de esforços e o desempenho global das estruturas. Essas análises podem fornecer uma compreensão mais completa da viabilidade do uso do PRFV em substituição ao aço em diferentes contextos construtivos.

REFERÊNCIAS

ABBOOD et al. **Properties evaluation of fiber reinforced polymers and their constituent materials used in structures: A review**. Materials Today: Proceedings, v. 43, 2021.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 440.1R: Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars**. Michigan: ACI, 2015.

ARAÚJO. **Estudo experimental da aderência entre o concreto e barras de aço, de compósito de fibras de vidro e de compósito de fibras de carbono**. 2017. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7477: Barras e fios de aço destinados a armaduras – Determinação da massa por metro**. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7480: Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado – Especificação**. Rio de Janeiro, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto**. Rio de Janeiro, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8953: Concreto para fins estruturais – Classificação**. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16889: Materiais compósitos reforçados com fibras – Determinação das propriedades mecânicas**. Rio de Janeiro, 2020.

ATTIA et al. **Flexural behavior of basalt fiber-reinforced concrete slab strips reinforced with BFRP and GFRP bars**. Composite Structures, v. 21, 2019.

BENMOKRANE et al. **Laboratory assessment and durability performance of vinyl-ester, polyester and epoxy glass-FRP bars for concrete structures**. Composites Part B, 2021.

CÂMARA. **Análise comparativa entre o uso de aço e vergalhões de fibra de vidro (GFRP) no concreto armado**. Natal, 2025

CARVALHO; FIGUEREDO FILHO. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**. 5. ed. São Paulo, 2023.

COUTO. **Comportamento da aderência entre o concreto e barras de fibra de vidro impregnada por polímero**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

EL-HASSAN et al. **Durability of glass fiber-reinforced polymer bars conditioned in moist seawater-contaminated concrete under sustained load**. *Construction and Building Materials*, v. 175, 2018.

HELENE; ANDRADE. **Concreto de cimento Portland**. In: ISAIA, G. C. (org.). *Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais*. São Paulo: IBRACON, 2007.

HENIN; MORCOUS. **Bond behavior of helically wrapped sand-coated deformed glass fiber-reinforced polymer (GFRP) bars in concrete**. *Construction and Building Materials*, v. 288, 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO. **CT-303: Estruturas de concreto armado com barras de polímero reforçado com fibras (FRP)**. São Paulo, 2021.

KASAI et al. **Análise comparativa entre vigas de concreto armado em aço e em polímero reforçado com fibra de vidro (GFRP)**. 2023. Projeto Final de Curso (Engenharia Civil), 2023.

MAZZU; DALFRÊ; PARSEKIAN. **Corrosão atenuada: procedimentos para o dimensionamento à flexão e ao cisalhamento de vigas de concreto armadas com barras de FRP segundo o ACI 440.1R (2015)**. ABECE, 2021.

MEHTA; MONTEIRO. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: IBRACON, 2008.

MICELLI; NANNI. **Durability of FRP rods for concrete structures**. *Construction and Building Materials*, v. 18, n. 7, 2004.

MORAIS; REGO. **Aços para concreto armado**. In: ISAIA, G. C. (ed.). *Concreto: ensino, pesquisa e realizações*. São Paulo: IBRACON, 2005.

MOURA. **Análise da durabilidade de armaduras poliméricas reforçadas com fibras de vidro submetidas ao ambiente alcalino e a elevadas temperaturas**. 2021. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2021.

OTA. **Análise de compósitos de polipropileno e fibras de vidro utilizados pela indústria automotiva nacional**. 2004. Dissertação – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

SANTOS et al. **Análise do módulo de elasticidade estático e dinâmico para diferentes dosagens de concreto.** 2013.

STRATUS. **Especificações e características de vergalhões em fibra de vidro, estribos e estruturas armadas.** São José dos Campos, 2015.

TAVARES. **Análise teórica e experimental de vigas de concreto armadas com barras não metálicas de GFRP.** 2006. Dissertação – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

TEIXEIRA. **Viabilidade técnica da substituição do vergalhão de aço pelo vergalhão de fibra de vidro em vigas de concreto armado submetidas à flexão.** 2024. Trabalho acadêmico, 2024.