Análise Experimental de Vigas de Concreto Armado com Barras de GFRP

Gabriela Charnovski Dotto[1]; Gustavo Savaris[1]; Manuele Regina Harnisch[1]; Fernando Nunes Cavalheiro[2]; Rodnny Jesus Mendoza-Fakhye[1]; Thiago Alex Hemkemeier[1]

[1]Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo-PR, Brasil
(gsavaris@utfpr.edu.br)
[2]Universidade de Vigo, Vigo, Espanha

Resumo: A corrosão das armaduras de aço é um dos principais problemas que afeta a vida útil de estruturas de concreto armado. Como alternativa ao uso do aço, destacam-se as barras de polímero reforçado com fibra de vidro (GFRP), cuja principal característica é a elevada resistência à corrosão. O presente estudo aborda o comparativo do dimensionamento desses elementos com base na norma brasileira ABNT NBR 17196. Além disso, a pesquisa busca analisar experimentalmente a resistência à flexão das vigas. Foram ensaiadas três vigas moldadas com barras de GFRP, que apresentaram ruptura por flexão e comportamento compatível com os modelos normativos. Os resultados experimentais foram superiores aos estimados pela norma, em torno de 10%, o que demonstra uma margem de segurança. Os resultados experimentais validam a aplicação do GFRP como alternativa ao aço convencional em elementos estruturais.

Palavras-chave: Concreto armado; GFRP; Flexão; Vigas; Ensaios experimentais

INTRODUÇÃO

O concreto armado consolidou-se como um dos materiais estruturais mais utilizados na construção civil moderna, especialmente em obras de infraestrutura como pontes, viadutos e passarelas. Sua ampla adoção decorre da combinação entre a elevada resistência à compressão do concreto e a capacidade do aço de resistir a esforços de tração, resultando em um material estrutural eficiente e economicamente viável. Entretanto, estruturas de pontes estão continuamente expostas a agentes agressivos, como umidade, variações térmicas e atmosferas marinhas, que aceleram processos de deterioração. Entre os mecanismos de degradação mais críticos destaca-se a corrosão das armaduras, frequentemente associada ao cobrimento inadequado, à carbonatação do concreto ou à penetração de íons cloreto, que comprometem a integridade estrutural e reduzem significativamente a vida útil das obras (Murthy et al., 2020).

Diante desse cenário, a busca por materiais alternativos ao aço tem se intensificado nas últimas décadas, com o objetivo de mitigar manifestações patológicas relacionadas à corrosão e reduzir custos de manutenção. Entre as soluções investigadas, os polímeros reforçados com fibras (FRP) têm se destacado como uma alternativa promissora. Esses materiais são classificados conforme o tipo de fibra incorporada, como fibra de aramida (AFRP), basalto (BFRP) e fibra de vidro (GFRP), cada qual apresentando propriedades mecânicas e químicas específicas que influenciam seu desempenho estrutural (Dalfré et al., 2020). A crescente utilização de FRP em obras de infraestrutura reflete não apenas seu potencial técnico, mas também uma tendência global de adoção de materiais mais duráveis e sustentáveis.

Entre os diferentes tipos de FRP, as barras poliméricas reforçadas com fibra de vidro (GFRP) têm ganhado destaque devido ao seu equilíbrio entre desempenho mecânico, custo e disponibilidade comercial. Essas barras apresentam elevada resistência à tração, baixa densidade, excelente resistência à corrosão e boa durabilidade em ambientes agressivos. Segundo Heizer (2024), as barras de GFRP são produzidas por meio do processo de pultrusão, no qual fibras contínuas são impregnadas com uma matriz polimérica composta por resina, endurecedor e pigmentos. A matriz tem papel fundamental na transferência de esforços entre as fibras, na proteção contra impactos e na resistência às variações ambientais, garantindo o desempenho global do compósito. Apesar dessas vantagens, o material apresenta comportamento frágil e módulo de elasticidade significativamente inferior ao do aço, o que influencia diretamente o comportamento estrutural dos elementos em que é empregado (Carneiro et al., 2021; Dutra et al., 2021).

O baixo módulo de elasticidade das barras de FRP implica que vigas de concreto armado reforçadas com esse material tendem a apresentar maiores deformações e fissuras com aberturas mais

pronunciadas quando comparadas às vigas tradicionais com aço. Assim, o estado limite de serviço (ELS) frequentemente se torna o critério determinante no dimensionamento, superando o estado limite último (ELU) em importância. Esse comportamento exige atenção especial ao controle de flechas e fissuração, bem como ao detalhamento adequado das armaduras, para garantir o desempenho estrutural e a durabilidade da obra (Murthy et al., 2020).

As diretrizes para o dimensionamento de elementos de concreto armado com barras de GFRP estão presentes em diversas normas internacionais, como o ACI 440.1R, o CSA S806 e o fib Bulletin 40. No contexto brasileiro, a publicação da NBR 17196 (ABNT, 2025) representa um marco importante, ao estabelecer critérios específicos para o uso de FRP como armadura em estruturas de concreto. Embora muitas das hipóteses clássicas do modelo de cálculo para concreto armado com aço permaneçam válidas, como a manutenção da seção plana, o dimensionamento deve considerar o comportamento elástico linear até a ruptura e a ausência de escoamento das barras de FRP. Isso implica que a ruptura ocorre de forma frágil, sem aviso prévio, exigindo abordagens de projeto que garantam modos de falha dúcteis, como a ruptura por esmagamento do concreto antes da ruptura das barras (Carneiro et al., 2021; Dalfré et al., 2020).

Nos elementos de seção retangular sujeitos à flexão simples, deve ser definida uma taxa de armadura balanceada (ρfb) (Equação 1), e comparada com a taxa de armadura à flexão (ρf) (Equação 2). Quando a taxa de armadura da seção é inferior à taxa de armadura balanceada, ocorre falha por ruptura da armadura, caso contrário ocorre o esmagamento do concreto.

$$\rho_{fb} = \lambda \alpha_c \eta_c \frac{f_{cd}}{f_{fd}} \frac{E_f \varepsilon_{cu}}{E_f \varepsilon_{cu} + f_{fd}} \quad (1)$$

$$\rho_f = \frac{A_f}{bd} \quad (2)$$

Onde: λ é o coeficiente para profundidade do bloco retangular de tensões em vigas; α_c é o parâmetro de redução da resistência do concreto na compressão; η_c é o coeficiente de fragilidade; f_{cd} é a resistência à compressão de cálculo do concreto; E_f é o módulo de elasticidade à tração da armadura de GFRP; ε_{cu} é a deformação última do concreto à compressão; f_{fd} é a resistência à tração de cálculo da armadura de GFRP; A_f é a área da armadura de GFRP; b é a largura da seção transversal; d é a altura efetiva da seção transversal.

A profundidade da linha neutra (x) pode ser calculada utilizando a Equação 3, e assim o momento fletor resistente da seção transversal é determinado utilizando a Equação 4, a partir de uma tensão de tração na barra calculada com a Equação 5.

$$\begin{cases} x = \frac{f_{fd} A_f}{\lambda \alpha_c \eta_c f_{cd} b}, & \rho_f \le \rho_{fb} \\ x = \frac{1}{2b} \frac{\varepsilon_{cu} A_f E_f}{\lambda \alpha_c \eta_c f_{cd}} \left(-1 + \sqrt{1 + 4 \frac{\lambda \alpha_c \eta_c f_{cd}}{\varepsilon_{cu} A_f E_f} bd} \right), & \rho_f > \rho_{fb} \end{cases} \quad (3)$$

$$M_{Rd} = \sigma_{fd} A_f \left(d - \frac{\lambda x}{2} \right) \quad (4)$$

$$\sigma_{fd} = \begin{cases} f_{fd}, & \rho_f \le \rho_{fb} \\ \frac{b \lambda x \alpha_c \eta_c f_{cd}}{A_f}, & \rho_f > \rho_{fb} \end{cases} \quad (5)$$

Onde: M_{Rd} é o momento fletor resistente de projeto; σ_{fd} é a tensão de tração na armadura de GFRP.

A realização de estudos experimentais é fundamental para o avanço do conhecimento sobre o comportamento estrutural de elementos em concreto armado com barras de FRP, permitindo identificar com maior precisão os mecanismos de fissuração, a evolução das deformações, a rigidez efetiva das vigas e os modos de falha predominantes, fornecendo subsídios essenciais para a calibração e o aprimoramento dos modelos teóricos de dimensionamento. Nesse contexto, o presente trabalho busca contribuir para o entendimento do comportamento à flexão de vigas armadas com barras de GFRP por meio de ensaios de flexão em três pontos, possibilitando a avaliação direta da capacidade resistente, da ductilidade estrutural e do desempenho em serviço. Além disso, os resultados experimentais obtidos são confrontados com as estimativas fornecidas pelas equações de dimensionamento da NBR 17196 (ABNT, 2025), permitindo verificar a adequação das prescrições normativas e identificar eventuais discrepâncias entre o comportamento previsto e o observado em laboratório.

MATERIAL E MÉTODOS

As vigas de concreto armadas com barras de GFRP foram projetadas com comprimento total de 100 cm, vão livre de 80 cm entre apoios e seção transversal de 12 × 25 cm². Embora a literatura recomende evitar modos de ruptura associados à tração da armadura, optou-se, neste estudo, por caracterizar

especificamente o comportamento estrutural relacionado a esse tipo de falha.

Em conformidade com as diretrizes da NBR 17196 (ABNT, 2025), adotaram-se parâmetros de dimensionamento à flexão que garantissem uma taxa de armadura inferior à taxa balanceada ($\rho_f \leq \rho_{fb}$), conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros de dimensionamento das vigas.

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
λ	0,8	A_f (cm²)	0,45
α_c	0,85	d (cm)	22,6
η_c	1,0	ρ_{fb} (%)	0,228
f_{cm} (MPa)	25	ρ_f (%)	0,166
E_f (GPa)	53	ρ_f/ρ_{fb}	0,728
ε_{cu} (‰)	3,5	x (cm)	2.39
f_{fd} (MPa)	1086	M_n (kN.m)	10,56

A Figura 1 apresenta as dimensões da seção transversal da viga, bem como a disposição das armaduras empregadas. A armadura longitudinal tracionada foi composta por uma barra de GFRP, fornecida pela empresa Haizer (2024), com diâmetro nominal de 8 mm, diâmetro efetivo de 7,6 mm, resistência última à tração de 1.086 MPa e módulo de elasticidade de 53 GPa. A armadura transversal consistiu em estribos retangulares confeccionados a partir de fios de aço CA-60 com diâmetro de 5,0 mm, nas dimensões de 9x22 cm², espaçados a cada 15 cm, com o objetivo de prevenir a ruptura por cisalhamento. Nas vigas V1 e V2, além da barra de GFRP na zona tracionada, foi empregado um fio de aço CA-60 de 5,0 mm na região comprimida, bem como estribos adicionais em formato "Z", complementando os estribos retangulares. A viga V3, por sua vez, foi armada exclusivamente com a barra de GFRP na zona tracionada e com os estribos verticais previamente especificados.

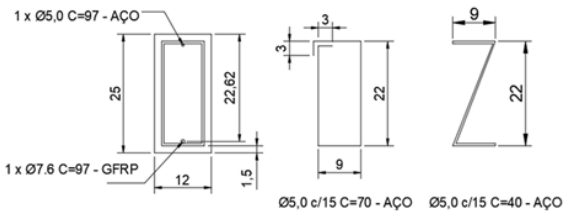


Figura 1. Seção transversal e armaduras.

Para a produção das vigas, adotou-se um traço de concreto autoadensável proposto por Silva (2021), com proporção em massa de 1:2,29:2,04:0,51 (cimento:areia:brita:fíler), relação água/cimento igual a 0,58 e teor de aditivo superplastificante correspondente a 0,10% da massa de cimento. Esse traço resultou em uma resistência média à compressão de 25 MPa. A mistura foi preparada em uma betoneira de eixo inclinável, produzindo-se 100 litros de concreto, volume suficiente para a moldagem de três vigas e três corpos de prova cilíndricos (10 cm de diâmetro e 20 cm de altura), conforme os procedimentos estabelecidos na NBR 5738 (ABNT, 2015). Os corpos de prova foram posteriormente ensaiados para caracterização mecânica do concreto, seguindo a NBR 5739 (ABNT, 2018).

As vigas foram moldadas em formas de madeira, sendo a concretagem realizada continuamente ao longo de todo o comprimento, sem necessidade de adensamento mecânico devido às propriedades autoadensáveis do concreto utilizado. Após 24 horas, as vigas foram desmoldadas e mantidas em ambiente laboratorial, cobertas por uma lona plástica durante 28 dias, período destinado à cura antes da realização dos ensaios.

Os ensaios foram conduzidos em configuração de flexão a três pontos, conforme ilustrado na Figura 2, utilizando um pórtico de reação equipado com célula de carga e atuador hidráulico com capacidade de 1.500 kN. A deflexão foi monitorada por meio de um transdutor linear de deslocamento (LVDT) posicionado na linha neutra da seção transversal. A aplicação de carga foi controlada por deslocamento, com incremento uniforme de 1 mm/min, até a ruptura das vigas.

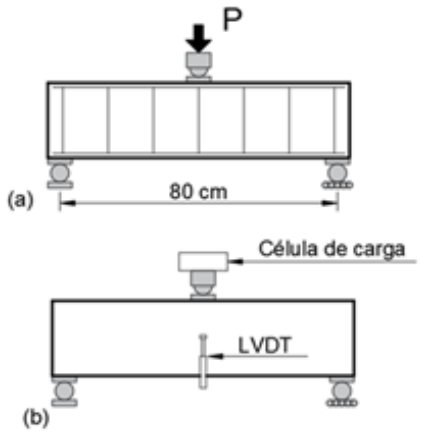


Figura 2. Configuração do ensaio de flexão a 3 pontos; (a) dimensões da viga; (b) instrumentação.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Todas as vigas ensaiadas apresentaram ruptura por tração da armadura longitudinal de GFRP. A falha foi precedida pela formação de uma fissura vertical no centro do vão, iniciada na face inferior da viga e propagando-se em direção à linha neutra. Próximo à carga última, observaram-se fissuras adicionais, conforme ilustrado na Figura 3.

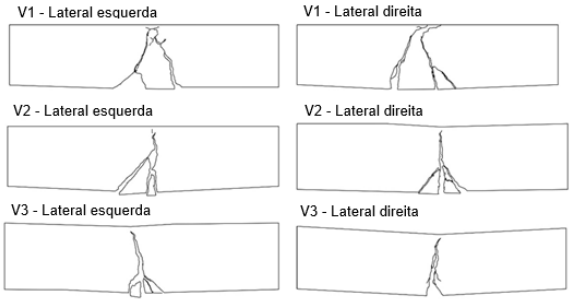


Figura 3. Fissuras principais de flexão após a ruptura.

A Figura 4 apresenta as curvas carga *versus* deflexão obtidas nos ensaios. As vigas exibiram rigidez inicial semelhante até a formação da primeira fissura de flexão. A partir desse ponto, verificou-se redução da rigidez, evidenciada pela menor inclinação das curvas para deflexões. A Tabela 2 reúne as cargas correspondentes à fissuração e à ruptura, bem como as deflexões registradas na carga última.

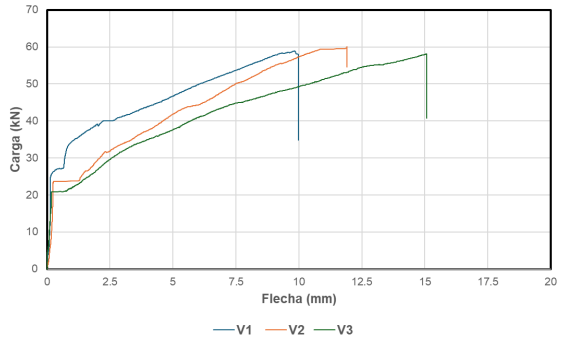


Figura 4. Gráfico Carga x Flecha das vigas ensaiadas.

Tabela 2. Resultados de carga e flecha experimentais.

Viga	Carga de formação da fissura (kN)	Carga última (kN)	Flecha última (mm)
V1	24,29	58,75	9,72
V2	23,15	59,68	11,82
V3	20,35	58,09	15,07
Média	22,59	58,84	12,20
D.P.	2,03	0,79	2,69

A carga de fissuração apresentou baixa dispersão entre as vigas, com valor médio de 22,59 kN e desvio padrão de 2,03 kN. A NBR 17196 (ABNT, 2025) permite estimar o momento de fissuração por meio da Equação 6, sendo a carga correspondente obtida pela Equação 7.

$$M_r = \frac{f_{ctk,inf}\, I_c}{y_t} \quad (6)$$

$$P_{cr} = \frac{4\, M_r}{L} \quad (7)$$

Onde: I_c é o momento de inércia da seção bruta de concreto; $f_{ctk,inf}$ é a resistência à tração característica inferior do concreto, que pode ser estimada conforme a ABNT NBR 6118 (ABNT, 2023); y_t é a distância entre a linha neutra e a fibra mais tracionada da seção, considerando o estádio I.

Desta forma, a carga pontual (P_{cr}) estimada para fissuração é de 22,47 kN, valor próximo à carga média de fissuração obtida experimentalmente (22,59 kN).

A carga última das vigas também apresentou valores semelhantes, em torno de 60 kN. Entretanto, verificou-se maior variação na deflexão última, atribuída à menor rigidez da viga V3, que não possuía armadura longitudinal na zona comprimida. Essa ausência contribuiu para uma maior deformabilidade no regime pós-fissuração.

A Tabela 1 apresenta o momento fletor último estimado pela NBR 17196 (ABNT, 2025), igual a 10,56 kN·m. A partir desse valor, e utilizando a Equação 8, foram calculadas as cargas últimas teóricas, listadas na Tabela 3, onde Pult é a carga última, Mult o momento resistente último e L o vão entre apoios.

$$P_{ult} = \frac{4\, M_{ult}}{L} \quad (8)$$

Onde: P_{ult} é a carga última; M_{ult} é o momento fletor último; L é a distância entre apoios da viga.

Os resultados experimentais apresentaram cargas últimas entre 10% e 13% superiores às estimativas normativas. Ressalta-se que os valores teóricos foram obtidos com base nas resistências características dos materiais, o que justifica a diferença observada.

Dessa forma, as equações de dimensionamento da NBR 17196 (ABNT, 2025) demonstraram excelente capacidade preditiva em relação ao comportamento experimental.

Tabela 3. Resultados de carga, deflexão e momento fletor máximos.

Viga	Carga última estimada (kN)	Carga última experimental (kN)	Relação P_{exp}/P_{est}
V1		58,75	1,113
V2	52,88	59,68	1,130
V3		58,09	1,100

Considerando que o dimensionamento estrutural incorpora coeficientes de segurança para majorar ações e minorar resistências, verifica-se que as recomendações da norma brasileira são conservadoras e adequadas para o dimensionamento de vigas armadas com barras de GFRP.

Em relação ao estado limite de serviço, levando em pressuposto coeficientes de segurança para uma combinação última normal, igual a 1,4, a carga em serviço das vigas estaria limitada a 70% da carga última. Para o valor médio de carga última obtida experimentalmente, a carga de serviço pode ser estimada em 41,18 kN.

Analisando a Figura 4, as flechas medidas durante os ensaios experimentais para carga aplicada de 40 kN estariam entre 2,5mm e 6mm, sendo maiores para a viga V3, a qual não possuía armadura na face superior, e conforme já ressaltado, menor rigidez à flexão.

De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2023) as flechas limites para aceitabilidade visual são de L/250, o que neste caso corresponderia a 3,2 mm, confirmando que o baixo módulo de elasticidade das barras de FRP implica em maiores deformações, tornando o estado limite de serviço o critério determinante no dimensionamento, afirmado por Murthy et al., 2020.

CONCLUSÕES

Neste estudo, avaliou-se o comportamento à flexão de vigas de concreto armado reforçadas com barras de GFRP, com base em resultados experimentais e na comparação com as previsões de resistência da NBR 17196 (ABNT, 2025). As vigas apresentaram ruptura por tração da armadura de GFRP, em modo de falha coerente com o comportamento elástico-linear do material e com os pressupostos da teoria clássica de flexão, o que confirma a adequação do modelo estrutural adotado.

A análise comparativa entre as vigas indicou que a presença de um fio de aço na zona comprimida das vigas V1 e V2 não alterou significativamente a capacidade resistente última, embora tenha contribuído para o aumento da rigidez pós-fissuração e para a redução das deformações no regime não linear. A viga V3, desprovida dessa armadura complementar, apresentou maior deformabilidade, evidenciando a influência da armadura comprimida no controle das flechas e na rigidez global do elemento.

As estimativas normativas de capacidade última apresentaram boa concordância com os resultados experimentais, com diferenças entre 10% e 13%. Considerando que os valores teóricos foram obtidos a partir de resistências características, conclui-se que as equações de dimensionamento da NBR 17196 (ABNT, 2025) fornecem previsões adequadas e seguras para o projeto de vigas armadas com barras de GFRP. Esses resultados reforçam a confiabilidade do modelo normativo e evidenciam o potencial do GFRP como alternativa viável ao aço em aplicações estruturais sujeitas à corrosão.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Toledo, pelo suporte institucional, pela infraestrutura disponibilizada e pelo ambiente acadêmico que possibilitou o desenvolvimento desta pesquisa. Agradecem também aos técnicos de laboratório, cujo trabalho e dedicação contribuíram diretamente para a realização deste estudo.

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 17196: Projeto de estruturas de concreto armado com barras de polímero reforçado com fibras (FRP) — Projeto e dimensionamento. Rio de Janeiro, 2025.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5738: Concreto —Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5739: Concreto — Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro, 2023.

Carneiro, L. A. V.; Silva, R. C. B. E.; Teixeira, A. M. A. J. Comportamento de vigas de concreto armadas com barras de GFRP. Revista Ibero-

Americana de Ciências Ambientais, v. 12, n. 3, p. 207-223, 2021.

Dalfré, G. M.; Mazzú, A. D.; Ferreira, F. G. S. Dimensionamento de vigas de concreto armadas à flexão com barras não metálicas. Concreto & Construções, São Paulo, v. 98, p. 72-78, 2020.

Dutra, J.; Santos, D.; Duarte, I. O.; et al. Estudo do comportamento à flexão de vigas de concreto armado com barras de GFRP e BFRP. 2021.

Haizer. Vergalhões – BFRP/GFRP Haizer: catálogo. Curitiba, 2024. Disponível em: https://www.haizergroup.com.br/.

Murthy, A. R.; Pukazhendhi, D. M.; Vishnuvardhan, S.; Saravanan, M.; Gandhi, P. Performance of concrete beams reinforced with GFRP bars under monotonic loading. Structures 27 (2020) 1274–1288.

Silva, I. E. da. Resistência ao cisalhamento de vigas de concreto autoadensável reforçado com fibras de aço e macrofibras sintéticas. 2021. 60 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, 2021.