CAPÍTULO 21 · Parte II · Materiais
DOI do capítulo: https://doi.org/10.67775/khkppw22
Trabalho apresentado no CBPAT 2026 e publicado nos anais do evento: https://doi.org/10.67775/fynfa884

ANÁLISE DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO DE PROTÓTIPOS DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO COM BARRAS DE POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRA DE VIDRO

Aramys Júlio da Silva Montenegro[1], José Wyslan Lima[2]; Thaís Júlia Ribeiro Araújo[3]; Franciele Rodrigues de Oliveira[4]; Rodrigo César Pierozan[5] e Valéria Costa de Oliveira[6*]
*Valéria Costa de Oliveira: valeria.oliveira@ifro.edu.br

[1] Coordenação do curso de graduação em engenharia civil, Instituto Federal de Rondônia, Porto Velho, Brasil
[2] Coordenação do curso de graduação em engenharia civil, Instituto Federal de Rondônia, Porto Velho, Brasil
[3] Coordenação do curso de graduação em engenharia civil, Instituto Federal de Rondônia, Porto Velho, Brasil
[4] Coordenação do curso de graduação em engenharia civil, Unisinos, São Leopoldo, Brasil
[5] Departamento de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, Brasil
[6] Coordenação do curso de graduação em engenharia civil, Instituto Federal de Rondônia, Porto Velho, Brasil

RESUMO

As barras de polímero reforçado com fibra de vidro (PRFV) oferecem resistência à corrosão e redução de densidade aos concretos. O objetivo foi analisar a resistência à tração na flexão de protótipos de vigas de concreto armado reforçadas com barras de PRFV. A metodologia envolveu a produção de corpos de prova utilizando tanto armadura de aço quanto PRFV, além de estribos de PRFV quanto de aço. Foram dosados concretos classes C25 e C35. Ensaios de resistência à tração na flexão, quatro pontos, indicam um modo de ruptura frágil, consistente com o comportamento linearmente elástico do PRFV até a fratura. Ao contrário do aço, o PRFV não permite a redistribuição de tensões antes da falha, tornando essencial um projeto estrutural adequado.
Palavras-chave: fibra de vidro; resistência à corrosão; comportamento à ruptura; concreto armado; vigas.

ABSTRACT

Glass fiber reinforced polymer (GFRP) bars offer corrosion resistance and density reduction to concrete. The objective was to analyze the flexural tensile strength of prototype reinforced concrete beams reinforced with GFRP bars. The methodology involved the production of test specimens using both steel and GFRP reinforcement, as well as GFRP and steel stirrups. Concrete mixes of class C25 and C35 were used. Flexural tensile strength tests, four points, indicate a brittle failure mode, consistent with the linearly elastic behavior of GFRP until fracture. Unlike steel, GFRP does not allow stress redistribution before failure, making proper structural design essential.
Keywords: glass fiber; Corrosion resistance, fracture behavior; reinforced concrete; beams.

1. INTRODUÇÃO

O minério de ferro desempenha um papel fundamental na economia brasileira, visto que sua alta demanda a nível global tem gerado benefícios comerciais para o país (Koppe, 2007). No entanto, também é crucial considerar a sustentabilidade desse crescimento, dado que os recursos minerais são finitos e a cadeia produtiva envolve alto consumo de insumos, mesmo quando as reservas globais são suficientes por muitos anos. Neste sentido, Pereira (2012) cita uma exaustão gradual dos materiais de maior qualidade nas jazidas, o que acarreta maiores investimentos e necessidade de plantas mais complexas de beneficiamento de maneira a garantir escala e a qualidade das reservas minerais, assim como dos ativos de produção e logística.

No contexto da construção civil, por décadas, os elementos tradicionais de concreto armado, como vigas, têm sido compostos de concreto armado com barras de aço. Nessas vigas, o concreto resiste às tensões de compressão, enquanto as cargas de tração e cisalhamento são suportadas pelas barras de aço embutidas na matriz cimentícia (Leonhardt e Mönnig, 1997). No entanto, o uso do aço apresenta desvantagens, como sua suscetibilidade à corrosão, que afeta a durabilidade das estruturas, além do impacto ambiental associado à sua produção (Helene, 1999).

Nesse contexto, uma alternativa inovadora é o uso de barras de reforço feitas de polímero reforçado com fibra de vidro (PRFV). Esses materiais são reconhecidos por sua alta resistência à tração, baixo peso específico e excelente resistência à corrosão. Estudos como os de Jiang et al. (2018) e Li et al. (2020) destacam que as barras de PRFV apresentam desempenho mecânico superior ao do aço em ambientes agressivos. Além disso, Jabbar e Farid (2018) apontam que sua resistência à corrosão e capacidade de deformação fornecem alertas precoces suficientes antes da falha estrutural. No entanto, é importante considerar que as barras de PRFV exibem comportamento frágil, com uma relação tensão-deformação linear até a fratura, devido à anisotropia do material, o que significa que ele apresenta alta resistência apenas na direção longitudinal das fibras.

De uma perspectiva histórica, a fibra de vidro foi desenvolvida na década de 1930, embora inicialmente não fosse destinada à fabricação de barras de reforço. Sua primeira aplicação em estruturas de concreto armado foi registrada na década de 1950 (Mazzú, 2020). O uso de barras de reforço de PRFV representa um campo de pesquisa em expansão na engenharia civil, com potencial para substituir o aço em aplicações específicas. Mazzu (2025) explica que aplicação relativamente recente de barras de PRFV em estruturas de concreto implica na carência de resultados sobre seu comportamento e durabilidade a longo prazo. Neste sentido, nas últimas décadas, inúmeros estudos experimentais têm sido conduzidos investigando o comportamento estrutural de vigas de concreto armado com PRFV. Apesar desses avanços, ainda existem desafios em relação à resistência à tração por flexão e à capacidade de absorção de energia de vigas de concreto armado com PRFV.

Os resultados de Ahmed, Kadhim e Tahir (2025) mostram que tanto as barras de aço quanto as de fibra de vidro podem ser usadas como material de reforço em concreto. Segundo os autores, devido à sua natureza composta anisotrópica, as barras de PRFV apresentam aproximadamente 34,72% a mais de resistência à tração em comparação com as barras de aço. No entanto, pode haver alguma deformação na tração maior do que a do PRFV em aproximadamente 23,98% em média.

Outra vantagem é que as barras de fibra de vidro têm maior resistência à tração e menor peso, ou seja, são mais fáceis de manusear e transportar (Ahmed, Kadhim e Tahir, 2025). Por outro lado, as barras de aço têm um módulo de elasticidade e ductilidade maiores. Assim, os autores citam que as barras de fibra de vidro podem ser uma opção adequada para projetos que exigem reforço leve,

enquanto as barras de aço podem ser uma opção melhor para projetos que exigem alta resistência à tração e ductilidade.
Oestreich et al., (2025) realizaram um programa experimental em cinco vigas reforçadas com seção transversal retangular (120 mm x 200 mm x 1500 mm). Os autores avaliaram a resistência de aderência na interface têxtil-matriz e o tratamento da superfície têxtil. A partir dos resultados, observou-se que todas as vigas reforçadas apresentaram aumentos na capacidade de carga, ductilidade e tenacidade.

Karabulut (2025) analisou novas vigas de concreto armado reforçadas com barras de PRFV, com três diferentes resistências à compressão do concreto: baixa (CC20), moderada (CC30) e alta (CC40), cada uma medindo 150 × 200 × 1100 mm. Os resultados deste estudo demonstram que, independentemente da resistência à compressão do concreto, as vigas desenvolvem uma única grande fissura de flexão no ponto médio. O autor cita que a capacidade de carga final de vigas de concreto com barras de PRFV apresenta melhor resistência à compressão do concreto, e destaca que as vigas CC20 e CC30 exibem um comportamento de falha mais dúctil do que as vigas CC40. Assim, os resultados demonstraram que a capacidade de carga final das vigas CC40 foi aproximadamente 74% maior do que a das vigas CC20.

Neste sentido, o objetivo geral deste estudo foi analisar o comportamento mecânico de protótipos de vigas de concreto armado reforçadas com barras de PRFV. Os objetivos específicos foram:

- Analisar a relação entre a resistência característica à compressão dos concretos e o desempenho na resistência à tração na flexão de peças estruturais que utilizam barras de PRFV;
- Verificar o comportamento de falha dos elementos estruturais quando se emprega estribos de aço e PRFV em concreto armados com barras de PRFV;
- Avaliar a carga de resistência à tração na flexão *versus* deformação de elementos estruturais quando utilizam vergalhões de PRFV.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O programa experimental proposto na metodologia envolveu a fabricação de protótipos de vigas de concreto utilizando dois tipos diferentes de cimento, bem como a aplicação de armadura composta por barras de aço e barras reforçadas com polímero e fibras de vidro, estribos de PRFV e de aço. Após a cura, as vigas fabricadas em laboratório foram submetidas a ensaios de resistência à tração na flexão.

2.1 Materiais

Para a produção das vigas, foram utilizados dois tipos de cimento: CP V ARI e CP IV 32. A escolha desses materiais baseou-se na intenção de avaliar o comportamento do concreto armado tanto com um cimento sem adições pozolânicas (CP V ARI) quanto com uma alternativa que reflita mais de perto as práticas construtivas típicas da região onde a pesquisa foi realizada (CP IV 32), visto que cimentos com adições são comumente utilizados em projetos reais. O traço do concreto foi elaborado de acordo com as especificações para a Classe C 25 e C 35, conforme a norma C94/C94M-24d (ASTM, 2024a). As vigas foram moldadas utilizando fôrmas de madeirite plastificado de 12 mm de espessura. Os dados dos fabricantes quanto à caracterização dos vergalhões de aço e PRVF constam no Quadro 1.

Quadro 1 – Dados técnicos dos vergalhões

Características	Aço CA-50	Fibra de vidro
Resistência à tração (MPa)	450	1155
Densidade (kg/m³)	7850	1970
Módulo de elasticidade (GPa)	210	47,6

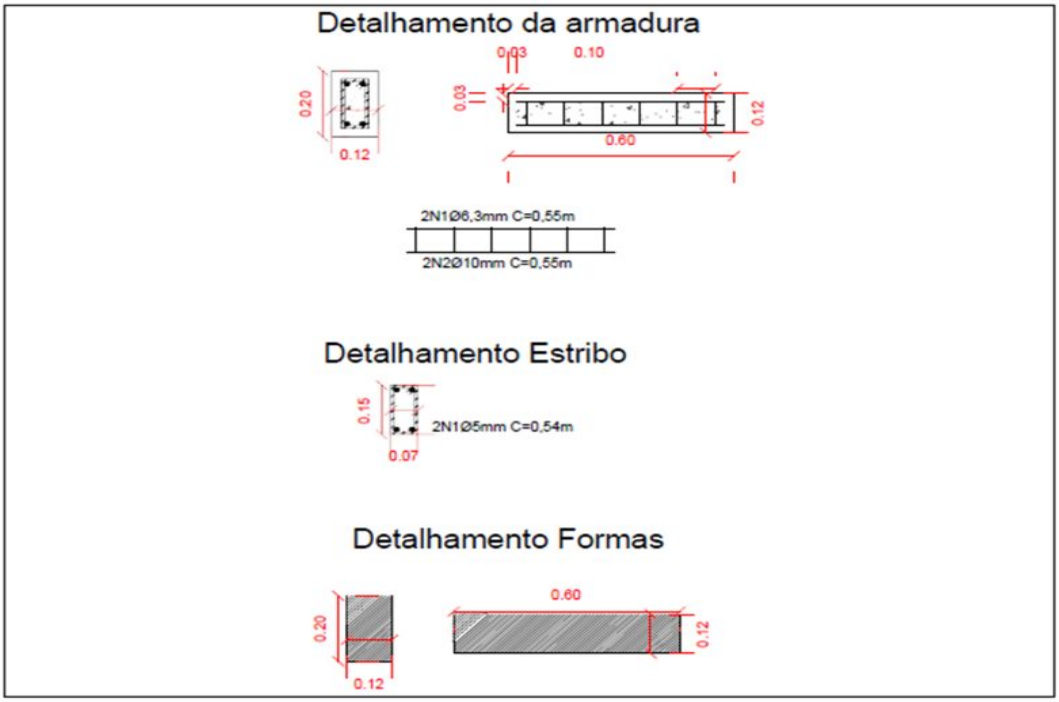
Fonte: os autores.

Ambas as armaduras apresentam uma superfície nervurada para melhorar a aderência ao concreto, que ocorre devido à presença de saliências na superfície da barra (Zulini, 2019). De modo geral, quanto maior a resistência do concreto, maiores serão os esforços de aderência que o concreto poderá suportar na interface aço-concreto (França, 2004, Soroushian *et al*., 1991).

Foram fabricados para cada dosagem de concreto (CP V ARI e CP IV 32), dois corpos de prova de vigas armadas com barras de aço (estribos de aço), dois armados com vergalhões de fibra de vidro (estribos de aço) e dois armados com vergalhões de fibra de vidro (estribos de PRFV), totalizando 12 corpos de prova.

O projeto do protótipo construído está demonstrado na Figura 1. A montagem foi equivalente para todas as composições analisadas (até com estribos diferentes do aço). A seleção de um pequeno número de corpos de prova deve-se ao caráter exploratório desta etapa inicial do estudo, cujo principal objetivo é avaliar a viabilidade técnica do procedimento proposto e obter resultados preliminares para orientar as fases experimentais subsequentes com um número maior de amostras.

Figura 1 - Montagem do sistema de reforço com PRFV e os estribos de aço



Fonte: os autores.

Vale destacar que a ductilidade de vigas de concreto armado depende de vários fatores, dentre os quais podem-se citar a resistência do concreto, a quantidade e o tipo de armadura utilizada e a geometria da seção transversal (Borges et al, 2004). Os autores explicam que o efeito de escala na ductilidade pós-pico uma viga de comprimento 30 cm apresentou uma deformação claramente mais

elevada do que a viga maior de comprimento 70cm. Desta forma, fica evidenciada a redução da ductilidade com o aumento do tamanho da viga. Borges et al., (2004) utilizaram dimensões de 10x20cm. Para este estudo foi adotado as dimensões de vigas de concreto armado 12x20x60cm. No caso deste estudo todos os elementos foram moldados com as mesmas dimensões e posicionamento de armaduras, pois o objetivo foi analisar o comportamento mecânico de protótipos de vigas de concreto armado reforçadas com barras de PRFV. As barras de aço e as hastes de fibra de vidro tinham diâmetros de 6,3 mm na parte superior e 10 mm na parte inferior. Os estribos utilizados tinham um diâmetro de 5,0 mm. A Figura 2 demonstra o detalhamento das armaduras de PRFV e estribos de aço.

Figura 2 - Montagem do sistema de reforço com PRFV e os estribos de aço



Fonte: os autores.

2.2 Métodos

O planejamento das etapas de construção das vigas foi desenvolvido a partir da criação de desenhos técnicos com uso do software AutoCAD, detalhando a armadura, os estribos e as fôrmas. Uma vez finalizados os projetos, as fôrmas para moldagem das vigas de concreto foram fabricadas utilizando compensado revestido de plástico com 12 mm de espessura e dimensões prismáticas de 12×60×20 cm. A superfície interna das fôrmas foi tratada com um agente desmoldante à base de emulsão para facilitar sua remoção.

Simultaneamente, a armadura de aço e as barras de fibra de vidro foram cortadas e dobradas. A armadura longitudinal e transversal foi fixada com arame recozido e posicionada dentro das fôrmas utilizando espaçadores de plástico, garantindo o cobrimento adequado de concreto. Nessas condições, a resistência à tração por flexão foi determinada utilizando a equação 1:

$$\tau = \frac{F.l}{b.d^2} \quad (1)$$

Onde:
τ - resistência à flexão (MPa)
F - força máxima registrada na máquina de ensaio (N)
l - vão entre apoios (mm)
b - largura média do corpo de prova (mm)
d - altura média do corpo de prova (mm).

3. RESULTADOS

Os resultados dos ensaios de laboratório incluem a análise da resistência à tração na flexão de vigas reforçadas com vergalhões de fibra de vidro e a resistência à tração na flexão de vigas de concreto armado armadas com vergalhões de aço, e respectivas avaliações do modo de falha de vigas de concreto armado. Esses dados foram fundamentais para validar o desempenho dos materiais, comparando vergalhões reforçados com fibra de vidro com vergalhões de aço tradicionais.

No estado fresco, os resultados do ensaio de abatimento foram de 178 mm e 177 mm para os concretos produzidos com cimentos CP V ARI e CP IV 32, respectivamente. Os resultados da resistência à compressão dos concretos (28 dias) produzidos com os diferentes cimentos são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Resistência à compressão dos concretos

Cimento	Densidade média dos corpos de prova (Kg/m³)	Resistência à compressão (MPa)
CP V ARI	2345,03	34,76
CP IV 32	2305,93	25,08

Fonte: os autores.

Os resultados indicam que os concretos produzidos com cimento CP V ARI apresentaram resistência à compressão de 34,76 MPa, enquanto os produzidos com cimento CP IV 32 atingiram 25,08 MPa. A consistência e o consumo de material permaneceram constantes durante o projeto da mistura de concreto. No entanto, a mistura com cimento pozolânico (CP IV 32) exigiu uma relação água/cimento (a/c) de 0,62 e um aditivo plastificante de 0,45% em massa de cimento, enquanto a mistura com CP V ARI utilizou uma relação a/c de 0,50 e 0,30% de aditivo plastificante, garantindo assim a mesma trabalhabilidade. Os resultados da resistência à tração na flexão das vigas são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Resistência à tração na flexão das vigas armadas.

Tipo de Armadura/cimento	Densidade (Kg/m³)	Resistência à Tração na Flexão aos 28 Dias (MPa)	Zona de ruptura (mm)	Deslocamento vertical (mm)
Aço/Estribo de aço/ CP V ARI	2373,35	11,17	>5% de *l*	7,42
PRFV/Estribo de aço/ CP V ARI	2318,75	8,01	>5% de *l*	6,95
Aço/Estribo de aço/ CP IV 32	2283,62	6,86	>5% de *l*	2,98
PRFV/Estribo de aço/ CP IV 32	2266,95	4,23	>5% de *l*	1,96
PRFV/Estribo de PRFV/ CP V ARI	2212,51	11,70	>5% de *l*	7,83
PRFV/ Estribo de PRFV/ CP IV 32	2272,47	6,76	>5% de *l*	4,74

Fonte: os autores.

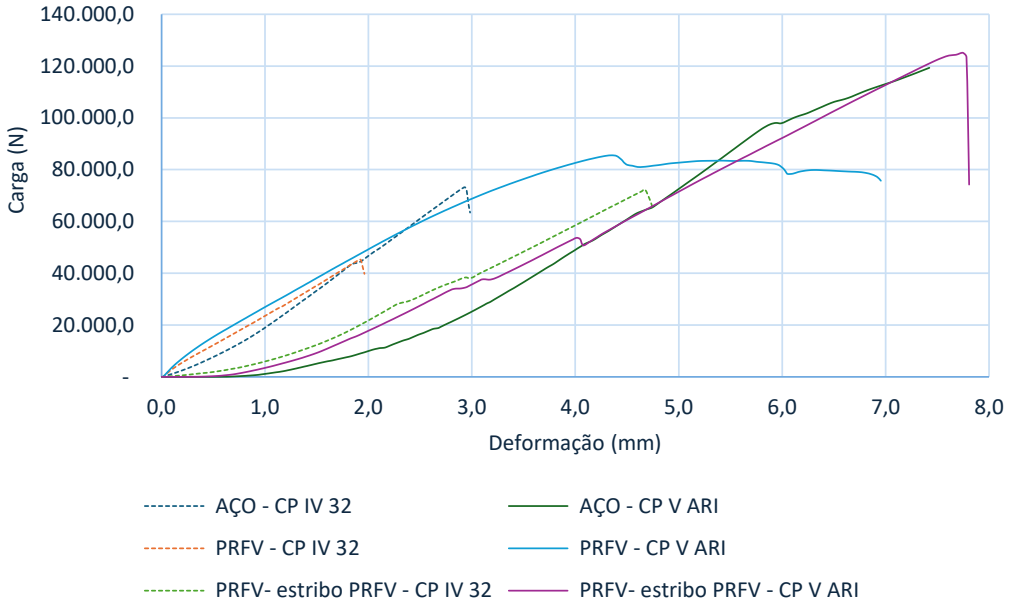
A composição dos concretos exerceu influência consistente em todas as combinações analisadas, uma vez que os resultados evidenciaram diferenças de desempenho entre os protótipos de vigas armadas. O desempenho superior das peças moldadas com cimento CP V ARI está associado à elevada reatividade desse aglomerante, que favorece o desenvolvimento inicial das resistências mecânicas. Os valores de resistência à tração na flexão atingiram 11,17 MPa para as misturas produzidas com CP V ARI e 6,86 MPa para aquelas dosadas com CP IV 32, quando empregados protótipos armados com barras e estribos de aço. Resultados da literatura corroboram essa tendência: Jabbar e Farid (2018) obtiveram 17,5 MPa para vigas com barras de aço e 12,5 MPa para vigas com barras de fibra de vidro; de forma semelhante, Orouji e Najaf (2023) reportaram resistências de 19 MPa e 15,5 MPa, respectivamente.

Verificou-se redução da resistência à tração na flexão quando se utilizou cimento pozolânico (CP IV 32) em peças armadas com barras de fibra de vidro, que apresentaram valor de 4,23 MPa. Além disso, os protótipos confeccionados com vergalhões de PRFV e estribos de PRFV apresentaram ruptura frágil e abrupta, ainda que tenham alcançado resistências de 11,70 MPa e 6,76 MPa, respectivamente, para concretos produzidos com CP V ARI e CP IV 32.

Observou-se também que os protótipos armados com vergalhões de PRFV apresentaram menor densidade em comparação àqueles armados com barras de aço, resultado coerente com Orouji e Najaf (2023), que destacam que o uso exclusivo de barras de fibra de vidro tende a reduzir a resistência à tração na flexão em relação ao aço. Por outro lado, essa solução contribui para a diminuição do peso próprio das vigas em aproximadamente 4%, além de reduzir custos de preparo e emissões de CO_2 em cerca de 43%.

De modo geral, sistemas com PRFV possibilitam estruturas mais leves. Entretanto, limitações como menor módulo de elasticidade, baixa ductilidade e, em alguns casos, necessidade de maiores taxas de armadura demandam critérios específicos de dimensionamento e controle de deformações, conforme discutido por Santos et al. (2025). A Figura 3 apresenta a relação entre resistência à tração na flexão e deslocamento das amostras avaliadas.

Figura 3 – Carga *versus* deslocamento

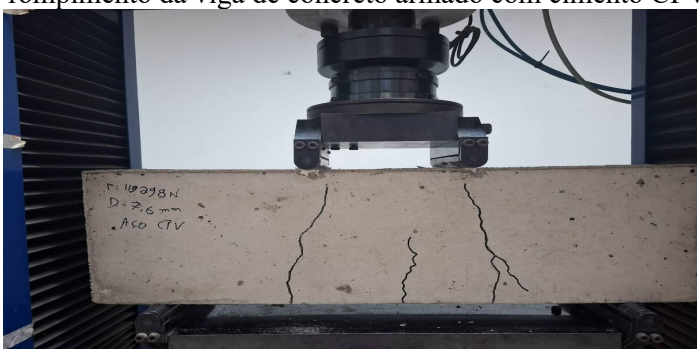


Fonte: os autores

Em termos de comportamento mecânico, as vigas com armadura de aço apresentaram elevados níveis de deslocamento pós-pico, caracterizando comportamento dúctil, enquanto aquelas armadas com PRFV exibiram ruptura abrupta após o pico de carga, típica de comportamento frágil. Esse resultado corrobora as discussões de Santos et al. (2025), que destacam que o aço é um material dúctil, com capacidade de

escoamento plástico, ao passo que o PRFV possui menor módulo de elasticidade e tende a fraturar de forma súbita, sem aviso prévio. Ainda segundo Santos et al. (2025), sistemas com armadura de aço apresentam resposta dúctil, com patamares de tensão após o pico e rupturas frequentemente governadas pelo cisalhamento, possibilitando redistribuição interna de tensões antes da falha. Em contraste, vigas armadas com PRFV falham predominantemente por flexão e demonstram resposta mais frágil, em razão do módulo elástico reduzido e da ausência de escoamento plástico. Essa distinção implica que o aço é capaz de absorver maior quantidade de energia por deformação, enquanto o PRFV pode atingir picos de resistência semelhantes (ou inferiores), porém sem deformações prévias significativas, o que reduz a capacidade de aviso estrutural antes da ruptura. Quanto ao emprego de estribos de PRFV, observou-se incremento na resistência à tração na flexão; entretanto, as vigas apresentaram ruptura frágil e brusca, evidenciando que a resistência ao cisalhamento não foi acompanhada por capacidade de deformação compatível. Tal comportamento pode ser verificado nas Figuras 8 e 9, nas quais se observa a ruptura do corpo de prova, e não apenas a formação e propagação de fissuras decorrentes da aplicação das cargas. Os modos de ruptura das vigas estão ilustrados nas Figuras 4 a 9.

Figura 4 - Detalhe de rompimento da viga de concreto armado com cimento CPVARI e barras de aço.



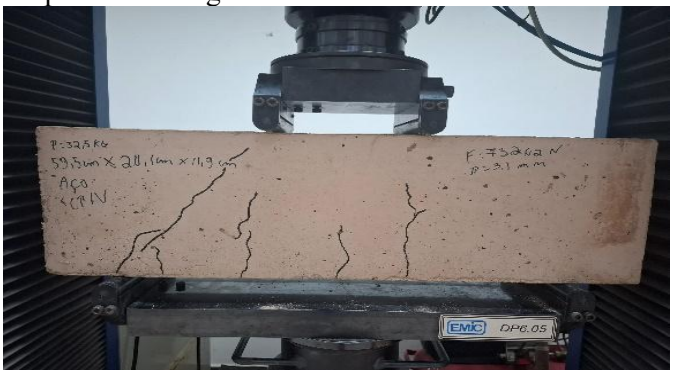
Fonte: os autores.

Figura 5 - Detalhe de rompimento de viga de concreto armado com cimento CPVARI e barras PRFV.



Fonte: os autores.

Figura 6 - Detalhe de rompimento de viga de concreto armado com cimento CP IV32 e barras de aço.



Fonte: os autores.

Figura 7 - Detalhe de rompimento da viga de concreto armado com cimento CP IV 32 e barras PRFV.



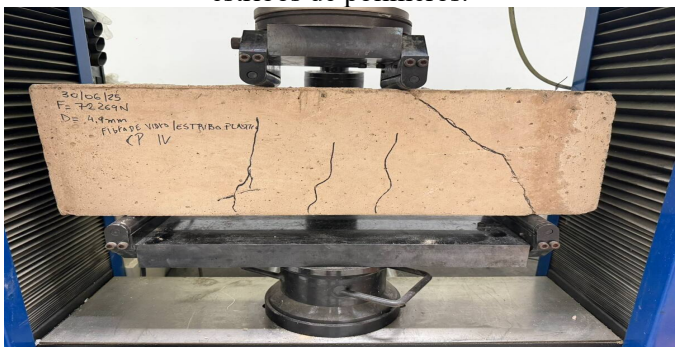
Fonte: os autores.

Figura 8 - Detalhe de rompimento de viga de concreto armado com cimento CPVARI e barras PRFV e estribos de polímeros.



Fonte: os autores.

Figura 9 - Detalhe de rompimento de viga de concreto armado com cimento CP IV32 e barras PRFV e estribos de polímeros.



Com o aumento progressivo da carga, fissuras verticais de flexão passaram a surgir na face inferior dos corpos de prova, na região tracionada. À medida que essas fissuras se propagavam em direção à zona comprimida, evoluíam para fissuras inclinadas na alma, tornando-se mais expressivas nas vigas de concreto armado com vergalhões de aço. Observou-se que, à medida que a carga se aproximava do valor máximo, houve redução na formação de novas fissuras, acompanhada do alongamento e da abertura das fissuras já existentes.

Uma abordagem relevante quanto ao comportamento frágil sob as dimensões dos corpos de prova utilizados (12x20x60cm), favoreceu a flexão simples dos conjuntos, pois a relação L/d igual a 3, é considerada baixa, e desta forma o mecanismo dominante de ruptura ocorre por cisalhamento e ruptura frágil. Neste modelo, em vigas de baixo L/d, as fissuras inclinadas crescem rapidamente e o concreto rompe antes do aço escoar, o que mostra a maior influência de esforços cortantes e a

tendência à ruptura frágil por cisalhamento (Ribeiro, 2013 e Salvador, 2013). Awad e Mohammed Rasheed (2024) explicam que o comportamento ao cisalhamento de vigas de concreto armado é muito complexo e pode ser afetado por diversos fatores, incluindo a resistência à compressão do concreto, a relação entre o vão de cisalhamento e a altura, a quantidade de armadura longitudinal, o efeito de escala, a largura da fissura e a presença de tensão diagonal. Portanto, determinar com precisão a resistência à tração diagonal e a carga de fissuração em uma viga de concreto armado é um desafio devido à necessidade de conhecimento preciso sobre as distribuições de tensões de cisalhamento e flexão.

As vigas armadas com PRFV apresentaram maiores comprimentos e espaçamentos entre fissuras quando comparadas às vigas com armadura de aço, comportamento também relatado por Elkhouly, Tayel e Sallam (2024). Esse padrão está associado ao menor módulo de elasticidade do PRFV, que resulta em maiores deformações e, consequentemente, maior abertura e espaçamento das fissuras. Quanto ao modo de falha, as fissuras mais significativas concentraram-se na região central das peças, indicando predominância de ruptura associada ao cisalhamento. A análise dos resultados evidencia a influência tanto da dosagem da matriz cimentícia quanto do tipo de barra de reforço na resistência à tração na flexão e no comportamento mecânico global das vigas, contribuindo para a compreensão do desempenho estrutural de concretos reforçados com materiais alternativos. De acordo com Leal et al. (2024), em compósitos com barras de fibra de vidro as fissuras apresentaram distribuição distinta, localizando-se mais próximas aos apoios e com inclinação aproximada de 45°, especialmente quando empregados estribos de PRFV, comportamento também observado no presente estudo. Os ensaios de tração na flexão confirmaram um modo de falha frágil, coerente com o comportamento linearmente elástico do PRFV até o instante da fratura.

4. CONCLUSÕES

Este estudo limitou-se a analisar os comportamentos de vigas de concreto armado, produzidas nas dimensões 12x20x60cm, consideradas de relação L/d baixa (3), contudo empregou mesmos detalhamentos de armaduras, alterando apenas os materiais dos vergalhões (aço e PRFV) e estribos (aço e PRFV), além de produzir concretos com duas diferentes classes de concretos. Com base nestas diferentes composições, observou-se que as vigas armadas com PRFV apresentam comportamento predominantemente frágil, com ruptura abrupta e limitada capacidade de redistribuição de tensões, em contraste com a resposta dúctil observada nas vigas com armadura de aço.

A menor rigidez do PRFV influenciou o padrão de fissuração, resultando em maiores aberturas e espaçamentos entre fissuras, além de menores deformações prévias à ruptura. Esses aspectos evidenciam que o dimensionamento com PRFV requer critérios específicos de controle de deformações e de estados limites de serviço, conforme discutido por Santos et al. (2025).

Verificou-se ainda que a dosagem dos concretos influenciou a resistência à tração na flexão, sendo os traços que empregaram o CP V ARI associado aos maiores desempenhos mecânicos, enquanto o uso de cimento pozolânico (CP IV 32) resultou em reduções de resistência nas combinações analisadas, possivelmente dada as reações de hidratação dos cimentos pozolânicos. Assim, o desempenho estrutural das vigas mostrou-se dependente da interação entre matriz cimentícia e tipo de armadura.

Como perspectivas para pesquisas futuras, recomenda-se: (i) o desenvolvimento de técnicas que aprimorem a aderência entre PRFV e concreto; (ii) a proposição de estratégias que aumentem a ductilidade global de vigas reforçadas com PRFV; (iii) a avaliação do desempenho dessas estruturas sob carregamentos de longa duração, efeitos reológicos e condições reais de serviço, a fim de ampliar a confiabilidade e a aplicabilidade do sistema em diferentes contextos estruturais e (iv) avaliação dos comportamentos de resistência à tração na flexão aplicados a vigas com diferentes relações L/d.

5. AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia (IFRO) e à Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

REFERÊNCIAS

AHMED, S. H., KADHIM, F. M., & TAHIR, M. S. A. D. (2025, May). A comparative study of iron versus fiberglass bar in concrete: Tensile and flexural characteristics. In *AIP* **Conference Proceedings** (Vol. 3211, No. 1, p. 080064). AIP Publishing LLC. https://doi.org/10.1063/5.0257285

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. (2022), **ASTM C78/C78M-22: Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading).** Washington. https://doi.org/10.1520/C0078_C0078M-22

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. (2024a). **ASTM C94/C94M-24d: Standard Specification for Ready-Mixed Concrete.** Washington. https://doi.org/10.1520/C0094_C0094M-24D

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. (2024b). **ASTM C192/C192M-24: Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory**. Washington. https://doi.org/10.1520/C0192_C0192M-24

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. (2024c). **ASTM C39/C39M-24: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.** Washington. https://doi.org/10.1520/C0039_C0039M-24

AWAD, M.J. e RASHEED, M. "Shear Behaviour in Reinforced Concrete Beams: Mechanisms, Failure Modes, and Predictive Models: A Review," Rafidain J. Eng. Sci., vol. 2, no. 2, pp. 210–227, Aug. 2024, DOI: 10.61268/jn6cbh11.

BORGES, J. U. A. et al. Length effect on ductility of concrete in uniaxial and flexural compression. Structural Journal, v. 101, n. 6, p. 765-772, 2004. DOI: 10.14359/13451

ELKHOULY, A. F., TAYEL, M. A., & SALLAM, H. G. (2024). Comparative study on using steel and glass fiber reinforced polymer rebars as reinforcement on flexural behavior of concrete beams. *ERJ.* **Engineering Research Journal**, *47*(2), 163-177. https://erjm.journals.ekb.eg ERJ ISSN: 1110-1180.

FRANÇA, V.H. (2004) Aderência aço-concreto – Uma análise do comportamento do concreto fabricado com resíduos de borracha. Dissertação de mestrado. Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira, SP

HELENE, P. R. L. Corrosão em armaduras para concreto armado (4ª ed). São Paulo, **PINI**, 1999, 48 p.

JABBAR, S. A., FARID, S. B. (2018). Replacement of steel rebars by GFRP rebars in the concrete structures. **Karbala International Journal of Modern Science**, 4(2):216-227. https://doi.org/10.1016/j.kijoms.2018.02.002

JIANG, H., GUO, Z., LIU, J. (2018). Composite behavior of sandwich panels with W-shaped SGFRP connectors. **KSCE Journal of Civil Engineering**, 22(5):1889-1899. https://doi.org/10.1007/s12205-017-2050-3

KARABULUT, M. (2025). Machine Learning-Driven Flexural Performance Prediction and Experimental Investigation of Glass Fiber-Reinforced Polymer Bar-Reinforced Concrete Beams. **Polymers**, *17*(6), 713. https://doi.org/10.3390/polym17060713

KOPPE, J. C. A lavra e a indústria mineral no Brasil - estado da arte e tendências tecnológicas. In: FERNANDES, F. R. C.; MATOS, G. M. M.; CASTILHOS, Z. C.; LUZ, A. B. da (eds.). Tendências tecnológicas Brasil 2015: geociências e tecnologia mineral. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, p. 81-102, 2007.

LEAL, E. F., DE AGUIAR, L. F. R., MENDONÇA JÚNIOR, G. D. F. (2024). Análise experimental de vigas de concreto armado com vergalhão de fibra de vidro. **Integrar-Revista Acadêmica,**2(1):33-33.
http://periodicos.grupointegrado.br/revista/index.php/integrar/article/view/3819

LEONHARDT, F.; MÖNNIG, E. Construções de concreto: princípios básicos do dimensionamento de estruturas de concreto armado. v.1. Rio de Janeiro: **Interciência**, 1977.

LI, Y., YIN, S., LU, Y., HU, C. (2020). Experimental investigation of the mechanical properties of BFRP bars in coral concrete under high temperature and humidity. **Construction and Building Materials**, 259:120591. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120591

MAZZÚ, A. D. E. (2020). **Estudo sobre a substituição de armadura metálica por barras de GFRP em vigas de concreto armadas à flexão quando submetidas ao ataque acelerado de íons cloreto**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, São Paulo. https://repositorio.ufscar.br/handle/20.500.14289/12770

MAZZÚ, A. D. E. (2025). **Análise experimental do comportamento e durabilidade de vigas de concreto armadas à flexão com barras de GFRP submetidas à ação de solução salina**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, São Paulo.

OROUJI, M., NAJAF, E. (2023). Effect of GFRP rebars and polypropylene fibers on flexural strength in high-performance concrete beams with glass powder and microsilica. **Case Studies in Construction Materials**, 18:e01769. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01769

PEREIRA, Suzana de Avila Cortes. O mercado de minério de ferro. Monografia (Especialização). Engenharia de Recursos Minerais da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, Minas Gerais, 2012.

RIBEIRO, N. M. A.. Determinação de propriedades mecânicas através de ensaios de provetes miniatura," Small Punch". 2013. Dissertação (mestrado). Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. Lisboa, Portugal.

SALVADOR, Renan Pícolo. Análise comparativa de métodos de ensaio para caracterização do comportamento mecânico de concreto reforçado com fibras. 2013. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. São Paulo, São paulo.

SANTOS, L. DA S. DOS, CUNHA, P. F. DE L., RIBEIRO, V. R. A., SOUSA, D. A. DE, SILVA, J. C. M., & FRAGA, Y. S. B. (2025). Estudo comparativo do uso de fibras de vidro como substituição para armadura de flexão em vigas de concreto armado. **CONTRIBUCIONES A LAS CIENCIAS SOCIALES**, 18(11), e22496. https://doi.org/10.55905/revconv.18n.11-300

SOROUSHIAN, Parviz et al. Bond of deformed bars to concrete: effects of confinement and strength of concrete. **Materials Journal**, v. 88, n. 3, p. 227-232, 1991.

TAHRI, W. ET AL. (2021). Review on corrosion of steel reinforcement in alkali-activated concretes in chloride-containing environments. **Construction and Building Materials**, 293:123484. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123484

XIAO, J., LIU, L., ZENG, H., ZHAI, K., FU, J., JIANG, H., PANG, L. (2024). Research on the bond performance between glass fiber reinforced polymer (GFRP) bars and Ultra-high performance concrete (UHPC). **Journal of Building Engineering**, 98:111340. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.111340

ZULINI, Isabela. **Efeito do confinamento na aderência entre barras de aço e concreto de alta resistência à compressão**. 2019. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. São Paulo, São Paulo.