

Estudo do comportamento à flexão de vigas de concreto armado com barras de GFRP e BFRP

Jakeline Dutra dos Santos
Sistemas de Infraestrutura Urbana
Pontifícia Universidade Católica de Campinas
Campinas, Brasil
jakeline.ds1@puccampinas.edu.br

Isabela Oliveira Duarte
Sistemas de Infraestrutura Urbana
Pontifícia Universidade Católica de Campinas
Campinas, Brasil
isabela.od1@puccampinas.edu.br

Michele Miwa Fugiyama
Sistemas de Infraestrutura Urbana
Pontifícia Universidade Católica de Campinas
Campinas, Brasil
michele.mf1@puccampinas.edu.br

Nádia Cazarim da Silva Forti
Pontifícia Universidade Católica de Campinas
Campinas, Brasil
nadia.cazarim@puc-campinas.edu.br

Abstract— O uso de barras de Polímero Reforçado com Fibras (FRP) em estruturas de concreto armado é uma alternativa que garante maior durabilidade às estruturas devido às características do material. As barras de FRP possuem elevada resistência à tração, baixo peso específico, transparência eletromagnética, além de não sofrerem corrosão. Para uma compreensão adequada do material em uma estrutura de concreto armado é necessário entender o seu comportamento mecânico quando inserido no elemento estrutural. Tendo em vista este aspecto, este trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento a flexão de vigas de concreto armado com barras longitudinais e estribos de FRP de basalto (BFRP) e de vidro (GFRP). A metodologia aplicada para caracterizar o comportamento à flexão foi feita por meio de ensaio de flexão a quatro pontos em vigas de concreto armado com seção transversal de 0,15 x 0,30m e 3,10m de comprimento. Foram ensaiadas cinco vigas: duas armadas com BFRP, com e sem ancoragem; duas armadas com GFRP, com e sem ancoragem; e uma armada com aço CA-50. As vigas armadas com barras de GFRP e BFRP apresentaram comportamento semelhante. Ao analisar a flecha, todas as vigas exibiram comportamento bilinear. No primeiro estágio, o concreto foi o principal responsável por resistir aos esforços internos. Quando o concreto começou a fissurar, em um segundo estágio, a armadura longitudinal passou a deformar em um comportamento elástico linear até a ruptura das vigas. As vigas de concreto reforçadas com BFRP, com e sem ancoragem, não apresentaram diferenças significativas quanto a carga máxima resistida e o deslocamento vertical. Comparando com a viga de concreto reforçada com aço, as vigas de concreto armadas com BFRP apresentaram um aumento de 13,62% na capacidade de carga e as vigas armadas com GFRP um aumento de 19,85% no entanto, com grandes deslocamentos verticais e fissurações. Esse comportamento está associado ao baixo módulo de elasticidade das barras de GFRP. Devido ao maior módulo de elasticidade das barras longitudinais de GFRP, as vigas armadas com barras de GFRP apresentaram maior rigidez em relação às vigas armadas com barras de BFRP.

Keywords—Barras de GFRP; Barras de BFRP; Comportamento à flexão; Vigas de concreto.

I. INTRODUÇÃO

Estruturas de concreto armado, compostas de barras de aço e concreto, em ambientes agressivos, podem ter seu desempenho a longo prazo deteriorado devido à corrosão da armadura. Essa patologia pode reduzir a resistência e rigidez do aço, ocasionando a diminuição da capacidade da carga e durabilidade das estruturas de concreto armado, afetando sua segurança [1, 2].

A utilização de barras de polímero reforçado com fibra (FRP) como reforço interno para estruturas de concreto foi impulsionada por suas propriedades anti-corrosivas, baixo peso e alta resistência à tração [3].

Polímero reforçado com fibra de carbono (CFRP), polímero reforçado com fibra de vidro (GFRP) e reforçado com aramida (AFRP) são materiais compósitos padronizados por normas. Cada tipo de FRP apresenta vantagens e desvantagens com relação às propriedades mecânicas, durabilidade e custo. Mais recentemente, polímeros reforçados com fibra de basalto (BFRP) surgiram com aplicações na construção civil [4, 5].

Os compósitos de FRP são aplicados em construções de pontes rodoviárias, estruturas marítimas, tanques de armazenamento e principalmente em ambientes agressivos. Suas características como resistência à corrosão e alta resistência à tração são fatores que contribuem para a aplicação do material [6].

Mesmo apresentando vantagens de uso, algumas características das barras de FRP demandam atenção. As barras de BFRP e GFRP são materiais de comportamento frágil, que apresentam comportamento elástico-linear até a ruptura, além disso, possuem um baixo módulo de elasticidade responsável

por gerar deformações verticais excessivas em elementos estruturais armados com FRP, como as vigas. Tendo em vistas esses aspectos, deve-se buscar soluções para mitigar as desvantagens do material.

Goldston et al. (2016) [7] avaliaram em seu estudo o comportamento a flexão de vigas armadas com GFRP, alterando a taxa de armadura (pf) e a resistência do concreto. As taxas de armadura ensaiadas foram de 0,5%, 1,0% e 2% e a resistência do concreto de 40 MPa e 80 MPa. Os resultados mostram que o aumento da taxa de armadura contribui para aumento da rigidez pós-fissuração, diminuindo deslocamento vertical excessivo, gerado pelo baixo módulo de elasticidade das barras, com uma redução de 8% para as vigas de 40MPa e 16% para as vigas de 80MPa.

Omar et al. (2019) [8] ensaiaram quatro vigas de concreto armado com GFRP com resistência de 35MPa e outras quatro com resistência de 65 MPa, com taxa de armadura variando entre 0,38% e 1,63%, para os dois casos. Os resultados mostraram que o aumento da taxa de armadura influenciou no momento resistente de serviço. A abertura das fissuras também diminuiu com o aumento da taxa de reforço.

Elgabbas et al. (2016) [9] realizaram um estudo experimental para investigar o desempenho estrutural do BFRP em vigas de concreto. Foram ensaiadas vigas com diferentes taxas de armadura. Como resultado foi obtido que quanto maior a taxa de armadura, maior será a rigidez pós-fissuração e, consequentemente, menores serão os valores de deflexão.

Esse trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento à flexão de vigas de concreto armado com Polímero Reforçado com Fibras de Basalto e Vidro (BFRP e GFRP).

II. METODOLOGIA

A. Propriedades dos materiais

a. Barras

Nos ensaios de flexão a quatro pontos, foram utilizados como armadura longitudinal barras de 10 mm de diâmetro, porta estribos de 6 mm e estribos de 8 mm de GFRP, BFRP e aço. As barras de FRP foram ensaiadas para a obtenção de suas propriedades mecânicas como diâmetro efetivo, resistência à tração e módulo de elasticidade. A Tabela 1 apresenta as propriedades mecânicas das barras de GFRP e BFRP.

TABELA I. PROPRIEDADE DAS BARRAS DE BFRP E GFRP.

Material	Diâmetro efetivo (mm)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)
GFRP	6,44	1033,03	52,08
	7,60	1085,67	53,42
	9,50	1218,07	60,70
BFRP	6,50	1039,37	52,18
	7,80	1013,60	52,28
	10,10	1012,92	52,59

b. Concreto

O traço unitário em massa utilizado para o concreto foi de 1:2,02:2,5:0,5 para atingir uma resistência à compressão de 50 MPa. A dosagem utilizada se encontra na Tabela 2 e apresenta a quantidade de material consumido para 1 m³ de concreto.

TABELA II. CONSUMO DE MATERIAIS.

Cimento (kg/m ³)		394,7
Agregados (kg/m ³)	Areia	797,3
	Brita	986,8
Água (kg/m ³)		197,4
Aditivo (kg/m ³)		0,8

As propriedades mecânicas do concreto aos 28 dias, que incluem resistência à compressão, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade, podem ser vistas na Tabela 3.

TABELA III. RESULTADO DA CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO.

Viga	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
GFRP	52,97	7,36	33,91
BFRP	56,06	7,46	32,23
AÇO	52,87	5,08	32,48

c. Detalhamento das armaduras.

O programa experimental inclui a moldagem de vigas de concreto armado com BFRP, GFRP e aço, com seção retangular de 15 x 30 cm e 310 cm de comprimento, submetidas a um ensaio à flexão de quatro pontos em um vão livre de 300 cm. A Figura 1 apresenta a armadura utilizada e detalhes da viga de concreto.

Foram moldadas um total de cinco vigas, sendo uma viga armada com aço, duas vigas armadas com GFRP (com e sem ancoragem) e duas vigas armadas com BFRP (com e sem ancoragem). O dimensionamento da viga de aço foi realizado seguindo NBR 6118 (ANBT, 2014) [10]. Com base no dimensionamento, para as vigas armadas com aço, foi adotado uma armadura insuficiente à flexão, buscando a ruptura da viga por flexão simples e deformação excessiva da armadura.

As vigas com armadura não metálicas seguiram a mesma configuração e taxa da armadura similar à viga de de aço, com a mesma classe de resistência do concreto. Ao verificar o dimensionamento das vigas com armadura não metálica, seguindo a norma ACI 440.1R-15 [11], a razão entre as taxas de armadura e a armadura balanceada era <1,0, sendo assim, o modo de falha esperado para as vigas armadas com FRP é a ruptura da armadura longitudinal. A nomenclatura das vigas indica o material da armadura longitudinal (GFRP e BFRP) e a presença (c/a) ou ausência (s/a) de ancoragem, como exemplo, a viga GFRP_s/a é uma viga armada com barras de GFRP e sem ancoragem. A Tabela 4 apresenta a identificação de cada viga e a taxa de armadura adotada.

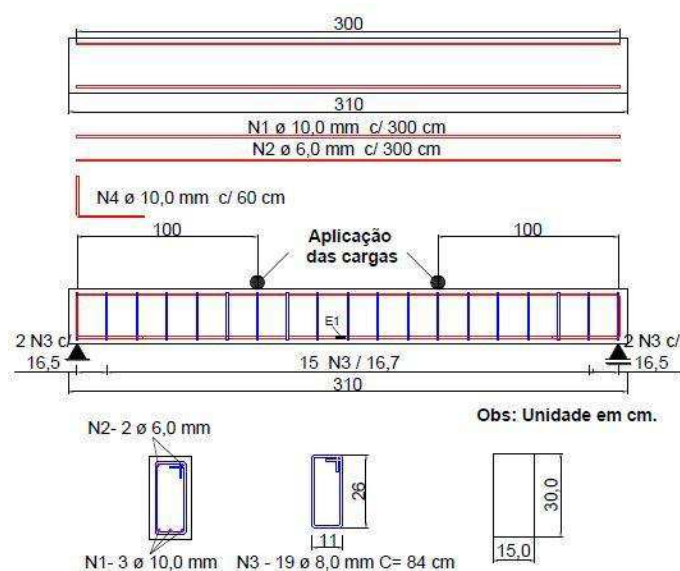


Fig. 1. Arranjo das armaduras.

TABELA IV. IDENTIFICAÇÃO E TAXA DE ARMADURA DAS VIGAS.

ID viga	Tipo de barra	A (mm ²)	pf(%)	pf/pfb
GFRP_c/a	GFRP	212,65	0,53	1,06
GFRP_s/a	GFRP	212,65	0,53	1,06
GFRP_c/a	BFRP	240,36	0,60	0,82
GFRP_s/a	BFRP	240,36	0,60	0,82
AÇO	Aço	235,62	0,59	-

d. Instrumentação

A flecha no meio do vão foi monitorada utilizando um transdutor de deslocamento. Obteve-se a leitura da deformação da armadura longitudinal por meio da fixação de extensômetros nas barras mais externas, como pode ser visto na Figura 2.



Fig. 2. Extensômetros fixos nas armaduras.

e. Configuração e procedimento de ensaio

As vigas simplesmente apoiadas foram testadas à flexão de quatro pontos até a ruptura. Figura 3 apresenta as dimensões e a localização da aplicação de carga e a Figura 4 mostra a configuração do ensaio.



Fig. 3. Imagem da viga com ponto de aplicação de carga

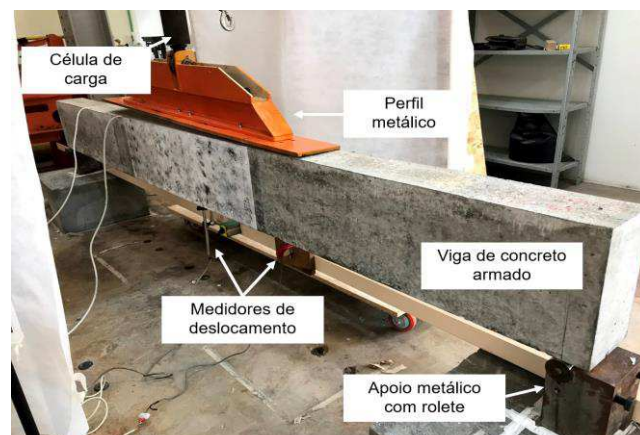


Fig. 4. Viga posicionada para o ensaio.

III. RESULTADOS

A viga BFRP_c/a resistiu a uma carga de 93,19 kN a um deslocamento vertical projetado de 70,15 mm, enquanto a BFRP_s/a a uma força de 87,40 kN e um deslocamento vertical projetado de 69,00 mm. A capacidade de carga resistida, deslocamento vertical apresentado, assim como o comportamento das curvas de Carga x Deslocamento de ambas as vigas demonstrou similaridade, dessa forma, observa-se que a presença ou a ausência de ancoragem não influenciou no comportamento das vigas. As vigas BFRP_c/a e BFRP_s/a apresentaram esmagamento do concreto como modo de ruptura, como mostra a Figura 5. Como a razão entre as taxas de armaduras (pf/pfb) era <1 (0,82), o modo de ruptura esperado era a ruptura da armadura longitudinal. Além disso, as vigas apresentaram muitas fissuras e grandes deslocamentos no meio do vão.



Fig. 5. Ruptura da viga armada com BFRP por esmagamento do concreto.

Na Figura 6, o desempenho das vigas reforçadas com barras e estribos de BFRP, com e sem ancoragem (BFRP_c/a e BFRP_s/a, respectivamente), é comparado ao comportamento da viga armada com aço (AÇO), em que todos apresentam a mesma taxa de armadura. A viga AÇO resistiu a carga máxima de 77,92 kN e deslocamento vertical de 34,87 mm, com modo de ruptura da armadura longitudinal. As vigas reforçadas com BFRP apresentaram um aumento médio de 13,62% na capacidade de carga em relação às vigas de concreto armado com aço, no entanto, houve um deslocamento vertical maior em aproximadamente 50%.

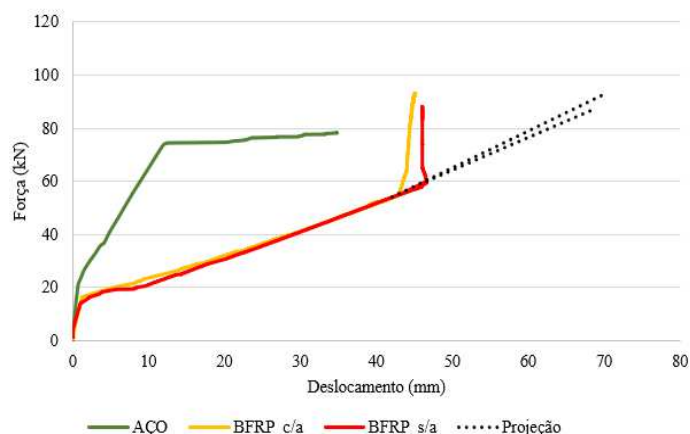


Fig. 6. Gráfico Força x Deslocamento.

A Figura 7 apresenta a deformação da armadura longitudinal de todas as vigas ensaiadas. A curva de Carga-Deformação consiste de dois segmentos, sendo o ponto de inflexão indicando o início da fissuração do concreto. As três vigas apresentaram comportamento similar até o surgimento da primeira fissura. A carga resistida e a rigidez da curva eram próximas, independentemente do tipo de armadura utilizada.

No Estádio I a maior contribuição é do concreto tracionado e as curvas apresentam comportamentos semelhantes devido a utilização do mesmo traço. Na fase pós-fissuração, Estádio II, tem início a maior contribuição da armadura, tanto de aço como de BFRP, para a estrutura. A armadura da viga AÇO, como um material dúctil, apresenta a fase elástica e escoamento do aço (Estádio III) com deformação até que ocorra a ruptura. As barras de BFRP, com o início da fissuração do concreto, começam a contribuir para a resistência da viga, apresentando um comportamento elástico linear e grandes deformações, devido ao seu baixo módulo de elasticidade.

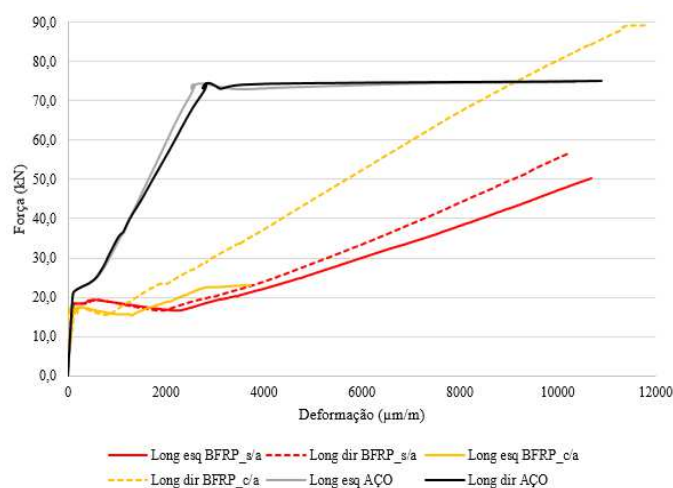


Fig. 7. Gráfico Força x Deformação da armadura longitudinal de BFRP

As vigas de concreto armado com barras de GFRP apresentaram dois modos de ruptura. Esse comportamento pode ser justificado pelo fato da razão entre a taxa de armadura e a balanceada (ρ_f/ρ_{fb}) ser de 1,06, valor que está entre os limites indicados pela ACI 440. 1R – 15, na qual $\rho_f/\rho_{fb} < 1$ indicam falhas por ruptura da armadura longitudinal e $\rho_f/\rho_{fb} > 1,4$ falha por esmagamento do concreto. Sendo assim, quando a razão ρ_f/ρ_{fb} está entre os limites o modo de falha não pode ser determinado com precisão. A viga sem ancoragem (GFRP_s/a) rompeu por esmagamento do concreto, Figura 8, enquanto a viga com ancoragem (GFRP_c/a) longitudinal apresentou ruptura da armadura, Figura 9. A viga GFRP_s/a obteve carga máxima de 99,51kN, com um deslocamento projetado de 63,43mm e a viga GFRP-c/a uma carga de 87,16kN e deslocamento projetado de 58,61mm. Na figura 8 podemos observar que o comportamento força x deslocamento das vigas de GFRP foram muito semelhantes, sendo assim, não foi possível verificar a influência da ancoragem no comportamento das vigas.



Fig. 8. Gráfico Força x Deformação da armadura longitudinal de BFRP



Fig. 9. Gráfico Força x Deformação da armadura longitudinal de BFRP

Na figura 10 podemos observar que o comportamento força x deslocamento das vigas de GFRP foram muito semelhantes, sendo assim, não foi possível verificar a influência da ancoragem no comportamento das vigas.

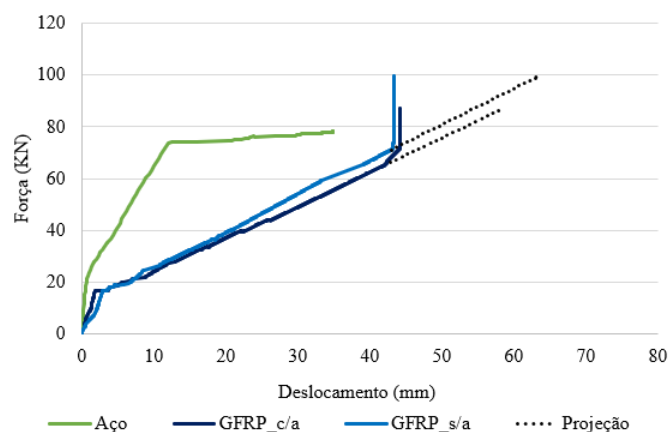


Fig. 10. Gráfico Força x deslocamento.

Assim como ocorre com as vigas armadas com BFRP, as barras de GFRP proporcionam um aumento na capacidade de carga das vigas, sendo em média 19,85% maior. Mas também apresentam deslocamentos verticais excessivos, quando comparado a viga armada com aço.

Na figura 11 temos a deformação da armadura nas vigas armadas com GFRP e aço. As deformações apresentam comportamento semelhante até a pré-fissuração do concreto.

No Estádio II as vigas armadas com GFRP apresentaram deformações superiores quando submetidas às mesmas cargas que as vigas armadas com aço. Esse comportamento também foi observado por outros pesquisadores [12, 13].

Enquanto a viga de concreto armado com aço apresenta uma deformação de 2480 $\mu\text{m/m}$ com uma carga de 71kN, a viga armada com GFRP teve uma deformação de 2470 $\mu\text{m/m}$

com uma carga de 16kN, representando uma redução de 78% de carga para uma deformação semelhante.

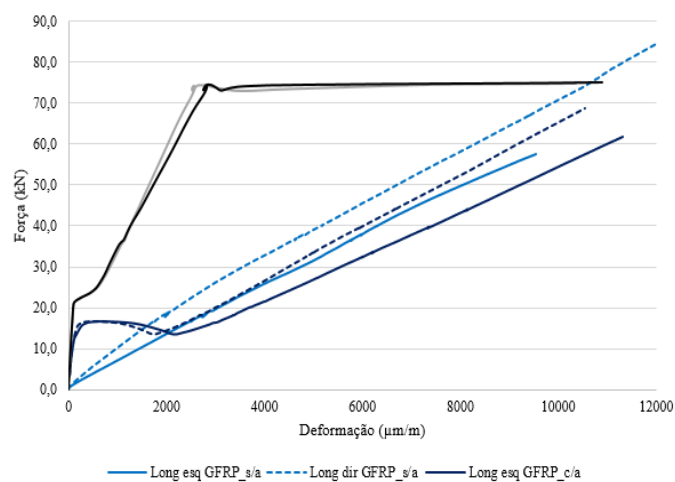


Fig. 11. Gráfico Força x Deformação da armadura longitudinal de GFRP.

A Figura 12 apresenta a comparação entre os gráficos de força x flecha das vigas armadas com barras de GFRP e BFRP.

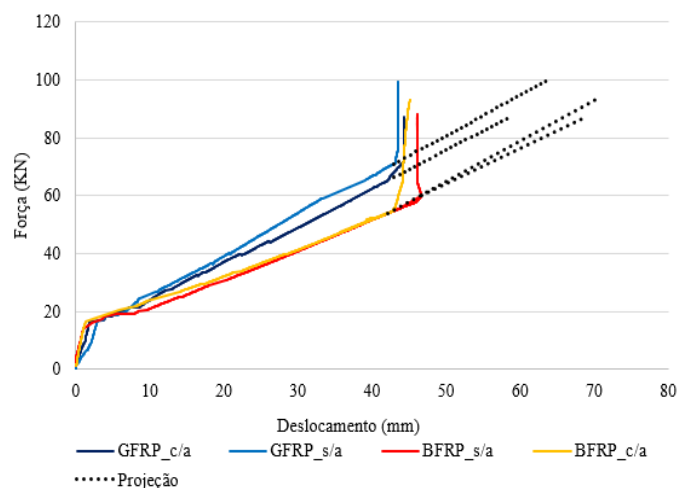


Fig. 12. Gráfico Força x deslocamento.

Ao comparar as vigas armadas com barras de BFRP e GFRP, observa-se um aumento na rigidez das vigas com barras de GFRP, que apresentam acentuada inclinação. Esse resultado pode ser justificado pelo maior módulo de elasticidade apresentado pelas barras longitudinais de GFRP.

Na Figura 13 são apresentados os gráficos de deformação da armadura longitudinal das vigas armadas com barras de GFRP e BFRP.

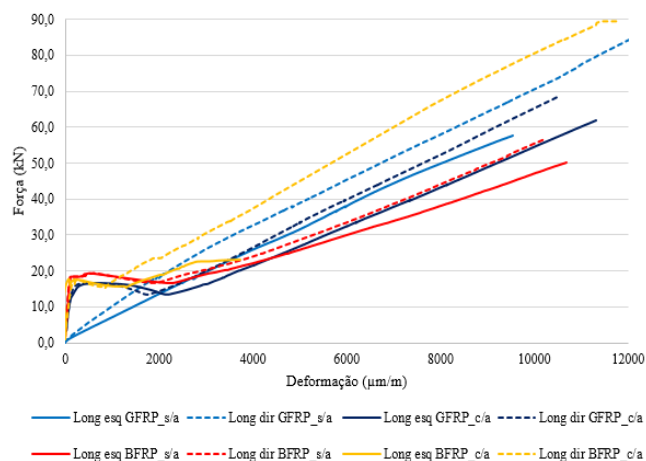


Fig. 13. Gráfico Força x deformação das armaduras longitudinais de BFRP e GFRP

Como é mostrado no gráfico acima, apenas as barras longitudinais da viga de concreto armado com barras de GFRP sem ancoragem apresentaram comportamento diferente das demais. O restante das vigas apresentou o mesmo comportamento em relação à deformação das barras longitudinais observadas por Said et al. (2016) [14], Tomlinson e Fam (2015) [15], Abed e Alhafiz (2019) [16] e Huang et al. (2021) [1].

Inicialmente, a curva de deformação apresenta inclinação acentuada, representando a condição do concreto sem fissura. Neste ponto, o concreto se encontra resistindo às tensões de tração. Após a fissuração, a seção resistente do concreto diminui e as barras longitudinais são cada vez mais solicitadas, de modo que é possível observar mudança na inclinação da curva de deformação, que se mantém linear até a ruptura da estrutura.

IV. CONCLUSÃO

Com o objetivo de avaliar o comportamento mecânico de vigas de concreto armado com barras de BFRP e GFRP, no ensaio de flexão a quatro pontos as vigas ensaiadas foram armadas com a mesma taxa e disposição de armadura e na mesma classe de resistência do concreto.

A armadura longitudinal utilizada em todas as vigas era insuficiente, com intuito de direcionar a ruptura da viga por flexão simples e ruptura da barra longitudinal.

Este estudo experimental obteve as seguintes conclusões:

- A viga armada com barras de aço CA-50 rompeu por deformação plástica excessiva, como esperado.
- As vigas armadas com GFRP apresentaram modos de rupturas diferentes, esperava-se a ruína por ruptura da armadura longitudinal nas duas vigas, mas a viga GFRP_s/a rompe por esmagamento do concreto. Mesmo apresentando modos de ruptura diferentes as vigas possuem comportamento gráfico

(força x deslocamento) muito semelhante, resistindo a cargas elevadas e com grandes deslocamentos.

- Assim como a viga GFRP_s/a, as vigas armadas com BFRP também apresentaram um modo de falha diferente do esperado, rompendo por esmagamento do concreto.
- As vigas armadas com barras de FRP apresentam rigidez semelhante à viga armada com barra de aço até o Estádio I. Após a fissuração do concreto, como esperado, ocorre uma redução na rigidez dos elementos sendo mais acentuada nas vigas armadas com FRP. Esse comportamento é esperado devido ao baixo módulo de elasticidade apresentado pelas barras de FRP, que resulta em grandes deflexões.
- As vigas armadas com barras de FRP apresentaram um aumento na capacidade de carga com relação às vigas de concreto armado com aço. Em média esse acréscimo é de 13,62% e 19,85% para as vigas armadas com BFRP e GFRP, respectivamente.
- Após a fissuração, a contribuição da seção de concreto diminui e as barras longitudinais são solicitadas de modo mais intenso, com isso nota-se que nas vigas armadas com FRP a deformação da armadura pós-fissuração é maior, quando comparada ao aço, e se mantém linear até a ruptura do elemento.

V. AGRADECIMENTOS

Ao professor Marco Antonio Carnio pelo apoio, orientação e empréstimo dos equipamentos necessários para realização da pesquisa.

A empresa Haizer Importação e Exportação Ltda., pela disposição em apoiar a pesquisa e pela doação das barras de GFRP.

A Pontifícia Universidade Católica de Campinas por disponibilizar o laboratório para realização do estudo.

REFERÊNCIAS

- [1] HUANG, Z. et al. Experimental and numerical study on concrete beams reinforced with Basalt FRP bars under static and impact loads. *Composite Structures*, v. 263, 2021.
- [2] LI, Z. et al. Experimental study on cracking behavior of steel fiber-reinforced concrete beams with BFRP bars under repeated loading. *Composite Structures*, v. 267, 2021.
- [3] ATTIA, K.; ALNAHHAL, W.; ELREFAI, A.; RIHAN, Y. Flexural behavior of basalt fiber-reinforced concrete slab strips reinforced with BFRP and GFRP bars. *Composite Structures*, v. 211, p. 1 – 12, 2019.
- [4] DUIC, J.; KENNO, S.; DAS, S. Performance of concrete beams reinforced with basalt fibre composite rebar. *Construction and Building Materials*, v.176, p. 470 – 481, 2018.
- [5] AL-HAMRANI, A., ALNAHHAL, W. Shear behavior of basalt FRC beams reinforced with basalt FRP bars and glass FRP stirrups: Experimental and analytical investigations. *Engineering Structures*, v. 242, 2021.
- [6] BENMOKRANE, Brahim. Recent Developments of FRP Bars as Internal Reinforcement in Concrete Structures & Field Applications. *International Conference On Sustainable Construction Materials And Technologies*. Las Vegas, p. 1-10, 2016.

- [7] GOLDSTON et al. Experimental investigation of the behavior of concrete beams reinforced with GFRP bars under static and impact loading. *Engineering Structures*. v.113, p.220-232, 2016.
- [8] OMAR et al. Flexural strength and serviceability evaluation of concrete beams reinforced with deformed GFRP bars. *Engineering Structures*. v. 186, p. 282-296, 2019.
- [9] ELGABBAS, F.; VINCENT, P.; AHMED, E.; BENMOKRANE, B. Experimental testing of basalt-fiber-reinforced polymer bars in concrete beams. *Composite Part B*, v. 91, p. 206 – 218, 2016.
- [10] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 6118 :Errata 1: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento, 2014
- [11] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 440. 1R - 15: Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with fiber-reinforced polymer (FRP) bars. American Concrete Institute, 2015.
- [12] DOO-YEOL YOO A; NEMKUMAR BANTHIA; YOUNG-SOO YOON. Flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete beams reinforced with GFRP and steel rebars. *Engineering Structures*, v. 111, p. 246–262, 2016.
- [13] LIU, X.; SUN, Y.; WU, T. Flexural capacity and deflection of fiber-reinforced lightweight aggregate concrete beams reinforced with GFRP bars. *Sensors (Switzerland)*, v. 19, n. 4, 2019.
- [14] SAID, M.; ADAM, M. A.; MAHMOUD, A. A.; SHAHNOUR, A. S. Experimental and analytical shear evaluation of concrete beams reinforced with glass fiber reinforced polymers bars. *Construction and Building Materials*, v. 102, n. 3, p. 574–591, 2016.
- [15] TOMLINSON, D.; FAM, A. Performance of concrete beams reinforced with basalt FRP for flexure and shear. *Journal of Composites for Construction*, v. 19, n. 2, p. 1–10, 2015.
- [16] ABED, F.; ALHAFIZ, R. Effect of basalt on the flexural behavior of concrete beams reinforced with BFRP bars. *Composite Structures*, v. 215, p. 23-34, 2019.