



Comportamento mecânico de vigas hiperestáticas reforçadas com barras pultrudadas de GFRP e fibras de aço

Mechanical behavior of statically indeterminate beams reinforced with pultruded FRP bars and steel fibers

Thiago Fioravanti¹; Flavio de Andrade Silva¹; Daniel Carlos Taissum Cardoso¹

*Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
Rua Marquês de São Vicente, 225 – Rio de Janeiro – RJ, 22541-041*

Resumo

As barras pultrudadas de polímeros reforçados com fibras, em especial, as fibras de vidro (GFRP), vem ganhando espaço como reforço de elementos estruturais, principalmente devido a características únicas de compósitos de FRP como, elevada resistência mecânica, baixo peso específico e natureza não corrosiva. Entretanto, diferente das armaduras de aço, em geral, as barras de FRP se comportam com propriedades elásticas anisotrópicas, não homogêneas e lineares, o que pode resultar em um mecanismo de transferência de forças diferente, entre a armadura e o concreto. Estas propriedades aliadas ao seu baixo módulo de elasticidade podem levar a um cenário de elementos estruturais com maiores aberturas de fissuras e maiores deslocamentos quando comparado a elementos armados por barras de aço. Sob esta perspectiva, este trabalho pretende avaliar a partir de um programa experimental, o comportamento estrutural de elementos de concreto reforçado com barras pultrudadas de GFRP e com adição de fibras de aço. Três vigas hiperestáticas foram submetidas a flexão, avaliando-se a influência da adição de fibras de aço em teores de 40 e 80 kg/m³ com taxa de armadura de 181% da taxa balanceada. Ensaio de flexão foram realizados para investigar o padrão de formação de fissuras, as deflexões, a transferência de esforços e a variação do modo de falha dos elementos. Os ensaios estruturais realizados em vigas hiperestáticas apresentaram ganhos na carga resistida pelas vigas com concreto reforçado com fibras de aço, além de menores deflexões e menores aberturas de fissura. Contudo, os estribos de GFRP, mesmo combinados com a adição de fibras de aço, se mostraram insuficientes para combater a influência da força cortante, levando as vigas à falha por cisalhamento.

Palavra-Chave: GFRP; Fibras de aço; Hiperestáticas; Concreto armado

Abstract

Pultruded bars made of fiber-reinforced polymers, especially glass fibers (GFRP), have been gaining ground as a reinforcement of structural elements, mainly due to the unique characteristics of FRP composites, such as high mechanical strength, low specific weight, and non-corrosive nature. However, unlike steel reinforcement, in general, FRP bars behave with anisotropic, non-homogeneous and linear elastic properties, which can result in a different force transfer mechanism between the reinforcement and the concrete. These properties allied to its low young modulus can lead to a scenario of structural elements with greater crack openings and greater displacements when compared to steel bars reinforced elements. From this perspective, this work intends to evaluate, from an experimental program, the structural behavior of concrete elements reinforced with pultruded GFRP bars and with addition of steel fibers. Three statically indeterminate beams were subjected to bending and the influence of the addition of steel fibers in ratios of 40 and 80 kg/m³ with reinforcement rate at 181% regarding the balanced rate was evaluated. Bending tests were carried out to investigate the crack formation pattern, deflections, stress transfer and the variation in the failure mode of the elements. The structural tests carried out on statically indeterminate beams showed an increase of up to 42% in the load bearing capacity of beams with steel fiber reinforced concrete, in addition to lower deflections and reduced crack width. However, the GFRP stirrups, even combined with the addition of steel fibers to concrete, proved to be insufficient to withstand the influence of the shear force, leading the beams to shear failure.

Keywords: GFRP; Steel fibers; Statically indeterminate; Reinforced concrete



1 Introdução

Na grande maioria das aplicações de concreto armado, a barra de aço continua a ser o material de reforço mais eficaz e econômico. Sua resistência e ductilidade o tornam adequado para o concreto armado, além do domínio do conhecimento sobre o uso do aço como reforço e seu custo-benefício que ainda garantem o importante papel de principal reforço do concreto. Contudo, em determinados ambientes agressivos, a corrosão das barras de aço leva a problemas de durabilidade. Técnicas novas e alternativas, como barras de aço revestidas com epóxi, membranas sintéticas ou proteção catódica, foram desenvolvidas para inibir a corrosão e já são opções em relação ao reforço convencional. Mais recentemente, a barra de FRP de polímero reforçado com fibras vem recebendo maior atenção e está sendo continuamente investigada como material de reforço alternativo. Publicações como Prática Recomendada - Estruturas de Concreto Armado com Barras de Polímero Reforçado com Fibras (FRP) (2021) elaborada pelo Comitê IBRACON/ABECE - CT 303 e o projeto de norma CE 002 124 026 conduzido pelo CB-002 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), mostram a necessidade de compreender o comportamento deste material para aplicações em projetos estruturais. Dentre os aspectos interessantes das barras pultrudadas de FRP em relação ao aço, estão a menor densidade, maior resistência à tração e resistência à corrosão. No entanto, propriedades mecânicas como o comportamento elástico frágil e o módulo de elasticidade menor do compósito, proporcionam um comportamento estrutural distinto entre o aço e o FRP. Por conta do seu menor módulo de elasticidade as barras de FRP levam a elementos estruturais com maiores deformações, ocorrência de maiores aberturas de fissuras e maiores deflexões quando submetidos à esforços de flexão como abordado pelo ACI 440.1R-15 (2015) e o Fib Bulletin 40 (2007).

Além das barras de FRP, outro sistema que permanece continuamente em estudo é a adição de fibras discretas em compósitos de matrizes cimentícias. Os primeiros estudos científicos do Concreto Reforçado com Fibras (CRF) foram introduzidos na década de 60 e com o desenvolvimento de novos estudos e melhor compreensão do seu comportamento, diferentes propostas de aplicações e utilizações surgiram. A contribuição positiva da adição de fibras discretas em matrizes cimentícias fica evidente em função da sua capacidade de transferir tensões internas em seções fissuradas, gerando menor aberturas de fissuras, conferindo ductilidade e promovendo resistência residual pós-fissuração ao concreto, como relatado por Brandt AM (2008). As vantagens associadas à incorporação de fibras discretas ao concreto se deve ao mecanismo de pontes de transferência entre fissuras, gerado pelas fibras e que contribuem para o controle da abertura e propagação destas fissuras, ocorrendo como consequência, um aumento da tenacidade e rigidez à flexão.

1.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho é analisar o comportamento estrutural de vigas hiperestáticas armadas com barras de GFRP, investigando a influência da incorporação de diferentes frações volumétricas de fibras metálicas ao concreto e sua contribuição para redistribuição de esforços, rigidez à flexão e abertura de fissuras.



2 Programa Experimental

O programa experimental foi realizado para obtenção dos parâmetros de caracterização do CRFA e ensaios estruturais de elementos reforçados com barras de GFRP. A condução do programa experimental foi dividida em duas etapas, caracterização do concreto reforçado com fibras e ensaios estruturais de vigas hiperestáticas.

Na primeira etapa, foram definidos os parâmetros do concreto e avaliação da trabalhabilidade do concreto fresco a partir do ensaio de abatimento do tronco do cone. Posteriormente, para a caracterização do CRF, ensaios de tração por flexão foram conduzidos em vigas prismáticas de concreto reforçado com fibras de aço, de modo a avaliar a resistência à tração por flexão pós-fissuração do CRFA.

A segunda etapa foi realizada a nível estrutural onde foram ensaiadas vigas de concreto com e sem adição de fibras de aço e reforçadas com barras de GFRP. As vigas hiperestáticas foram submetidas ao ensaio de flexão com carregamento centralizado nos vãos. O objetivo destes ensaios foi avaliar a possibilidade de redistribuição de esforços em vigas reforçadas com barras de GFRP e analisar quais alterações no comportamento estrutural destes elementos decorrem da adição de fibras discretas no concreto.

2.2 Fibras de aço

Para a adição de fibras discretas ao concreto foram utilizadas fibras metálicas 3D 80/60 BG. Foram produzidas duas vigas utilizando CRFA, contendo a fração volumétrica de 0,5% (40 kg/m³) e com a fração volumétrica de 1,0% (80 kg/m³). A Tabela 1 apresenta as propriedades das fibras utilizadas.

Tabela 1 – Propriedades das fibras utilizadas no programa experimental, dados do fabricante

Característica	Propriedade
Comprimento	60 mm
Diâmetro	0,75 mm
Razão de Aspecto	80
Densidade	7,8 g/cm ³
Módulo de Elasticidade	200 GPa
Resistência à tração	1225 MPa

2.3 Barras de GFRP

Este trabalho não aborda os ensaios de caracterização das barras de GFRP, as propriedades mecânicas das barras de GFRP utilizadas neste programa experimental decorrem de estudos anteriores como relatado por Carvalho V. de M (2021). As barras e estribos utilizados foram fornecidos pela Haizer Building Solution, e possuem diâmetro de 8 mm para as barras longitudinais e 4 mm para os estribos transversais. A composição das barras é dada por cerca de 75% a 85% de fibras de vidro ECR (E-Glass Corrosion Resistant) e matriz epóxi constituída por uma resina endurecedora e uma pigmentação de carbono. Além disso, as barras apresentam deformação última adequadas aos limites propostos pelo Fib Bulletin 40 (2007). A Tabela 2 apresenta as propriedades mecânicas das barras de GFRP utilizadas neste trabalho.



Tabela 2 – Propriedades das barras de GFRP utilizadas no programa experimental

Diâmetro (mm)	Resistência à tração (MPa)	Deformação última (%)	Módulo de Elasticidade (MPa)
8	926	2,38	40,261

3 Ensaio estrutural em vigas hiperestáticas

Foram ensaiadas três vigas hiperestáticas armadas com barras longitudinais de GFRP de comprimento igual a 2000 mm e dois vãos de 950 mm. A seção transversal adotada para as vigas foi de 110 mm x 180 mm (largura x altura). As vigas foram armadas com duas barras de GFRP de 8 mm de diâmetro tanto para a armadura superior como inferior e dimensionadas como superarmadas tanto na região de flexão positiva, no centro dos vãos, como na zona de flexão negativa, região do apoio central. Em todas as vigas, foram utilizados estribos de GFRP de 4 mm para confinamento do concreto e estribos de aço de 6,3 mm como reforços localizados. A Figura 1 apresenta o desenho esquemático da geometria das vigas, a disposição dos estribos e a instrumentação utilizada nos ensaios.

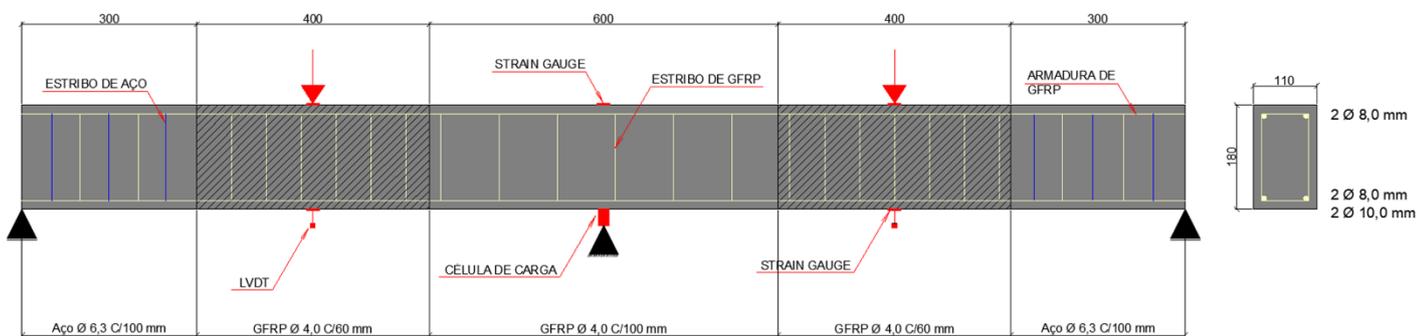


Figura 1 – Geometria, disposição dos estribos, instrumentação utilizada e seção transversal das vigas

A contribuição da adição de fibras na redistribuição de esforços também foi avaliada. Para este fim, foram utilizadas duas frações volumétricas distintas de fibras de aço, cerca de 0,5% e 1,0%. As vigas hiperestáticas possuem armadura superior e inferior constante de diâmetro igual a 8 mm que se diferem por concreto de referência sem adição de fibras, concreto com adição de 0,5% (40 kg/m³) de fibras de aço e concreto com adição de 1,0% (80 kg/m³) de fibras de aço. Portanto, para a nomenclatura adotada para os elementos estruturais, foram utilizados quatro caracteres. O primeiro caractere utilizado foi V, para identificar os elementos como vigas. O segundo utilizado foi a letra H, como identificador da hiperestaticidade das vigas. Estes dois caracteres são comuns a todas as vigas. O terceiro caractere utilizado foi o número 1 referenciando que pertencem a um único grupo de vigas. O próximo caractere foi utilizado para indicar a presença de fibras adicionadas ao concreto, portanto foi utilizado a letra F para identificar a adição de fibras e a letra S para representar a não adição de fibras. Finalmente, os dois últimos caracteres indicam o teor de fibras adicionado ao concreto, utilizando os números 40 e 80, que representam o teor em kg/m³ das frações volumétricas para 0,5% e 1,0%, respectivamente. A Tabela 3 consolida a nomenclatura utilizada no programa experimental.



Tabela 3 – Nomenclatura utilizada para as vigas do programa experimental

Viga	Armadura Superior (mm)	Armadura inferior (mm)	Teor de fibras (kg/m ³)	Observação
VH1S	8	8	-	Referência
VH1F40	8	8	40	-
VH1F80	8	8	80	-

A aplicação do carregamento se deu utilizando um atuador servo-hidráulico, marca MTS, modelo 244.41, de capacidade de carga igual a 500 kN. O carregamento foi aplicado no centro de cada um dos vãos por meio de um perfil metálico para distribuir igualmente a carga. Este perfil possuía seção transversal composta por dois perfis tipo C soldados entre si. O controle do ensaio foi realizado por deslocamento com taxa de 1 mm/min.

Para obtenção dos deslocamentos foram utilizados quatro LVDT's do tipo Gefran de 100 mm de comprimento. Estes transdutores de deslocamento foram posicionados na face inferior da viga e na região central dos vãos. As barras de GFRP foram instrumentadas com extensômetros, para avaliação das deformações por tração das barras longitudinais. Para aquisição das deformações por compressão do concreto, foram utilizados extensômetros, com comprimento uniaxial de 50 mm.

Para avaliar uma possível redistribuição de esforços nas vigas hiperestáticas, as reações de apoio foram aquisitadas utilizando uma célula de carga com capacidade de 500 kN para o apoio central e duas células de carga com capacidade de 200 kN para os apoios extremos, todas as células de carga são fabricadas pela empresa KYOWA. Por fim, rótulas foram utilizadas acima da célula de carga do apoio central e na interface entre o ponto de aplicação de carga do atuador e o perfil metálico para distribuição do carregamento. O setup de ensaio das vigas pode ser visto na Figura 2.



Figura 2 – Setup de ensaio utilizado para as vigas hiperestáticas



4 Resultados e discussão

As vigas hiperestáticas foram dimensionadas à flexão, em concordância com o ACI 440.1R-15 (2015) e de acordo com o Model Code for Structures (2010) para as vigas reforçadas com fibras discretas. Não foi considerado no dimensionamento qualquer redistribuição de esforços. Foi adotada taxa de armadura de flexão positiva e flexão negativa de 0,58% em todas as vigas, configurando as vigas como superarmadas.

A viga VH1S resistiu a um carregamento máximo de 120 kN e teve sua ruptura governada por cisalhamento no centro de um dos vãos ocorrendo de forma brusca. É possível observar a formação de fissuras de flexão no apoio central, a formação do plano de cisalhamento e a ruptura do estribo de GFRP, como mostram as Figuras 3, 4 e 5.

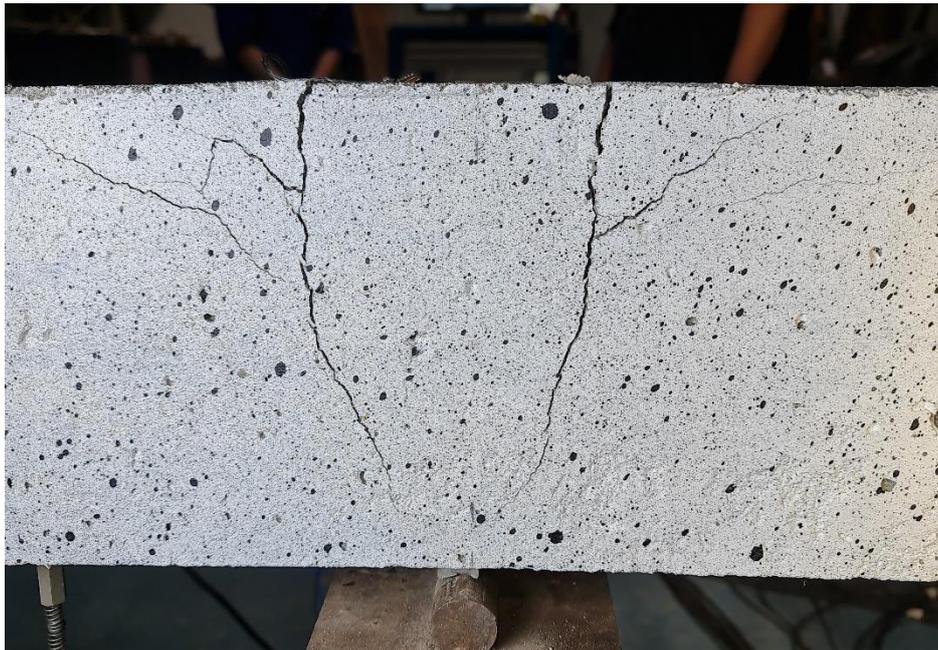


Figura 3 – Fissuras de flexão no apoio central da viga VH1S



Figura 4 – Cisalhamento no centro de um dos vãos da viga VH1S



Figura 5 – Ruptura do estribo de GFRP na viga VH1S

A carga resistida pela viga VH1F40 foi de 190 kN, um aumento de cerca de 59% em relação à viga VH1S que compartilha a mesma taxa de armadura da viga VH1F40, mas sem a adição de sistema discreto de reforço para concreto. Esse acréscimo de capacidade resistente se deve em função da adição da fração volumétrica de 0,5% (40 kg/m³) de fibras de aço. Apesar de apresentar intensa fissuração por flexão no centro dos vãos e no apoio central, a viga VH1F40 também teve sua ruptura governada



pele cisalhamento da viga. As Figuras 6, 7 e 8 mostram a fissuração por flexão no centro de um dos vãos, o cisalhamento e o modo de ruptura da viga VH1F40.



Figura 6 – Fissuras de flexão no centro de um dos vãos da viga VH1F40



Figura 7 – Ruptura por cisalhamento da viga VH1F40

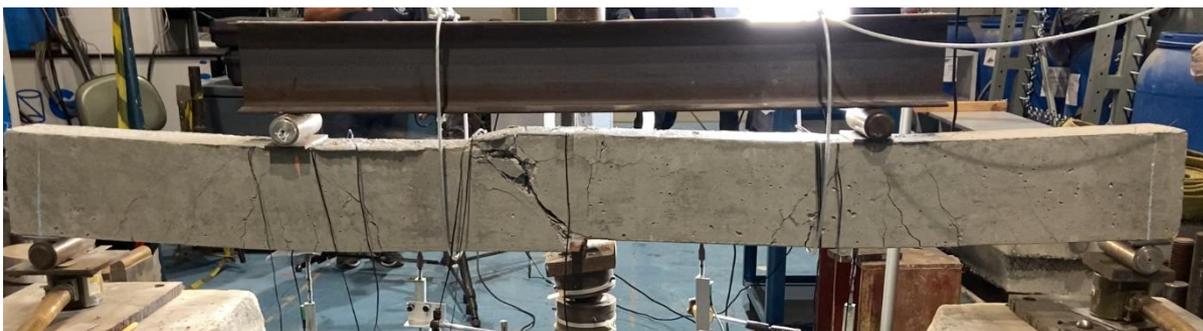


Figura 8 – Modo de falha da viga VH1F40

O carregamento máximo resistido pela viga VH1F80 foi de 189 kN limitado pela ruptura ao cisalhamento. A fração volumétrica de 1,0% (80 kg/m³) promoveu grande controle de fissuração de modo que no momento da ruptura por cisalhamento, as fissuras de flexão observadas na região do apoio central e no centro dos vãos são de menor magnitude em relação às vigas sem adição de fibras discretas e às vigas com fração volumétrica de 0,5% (40 kg/m³). Além disso, a ruptura apresentou comportamento menos frágil em relação a viga VH1F40. A fissuração na região do apoio central, no centro de um dos vãos, a ruptura por cisalhamento e a visão geral do modo de falha da viga VH1F80 são ilustrados pelas Figuras 9 e 10.



Figura 9 – Fissuração na região do apoio central da viga VH1F80

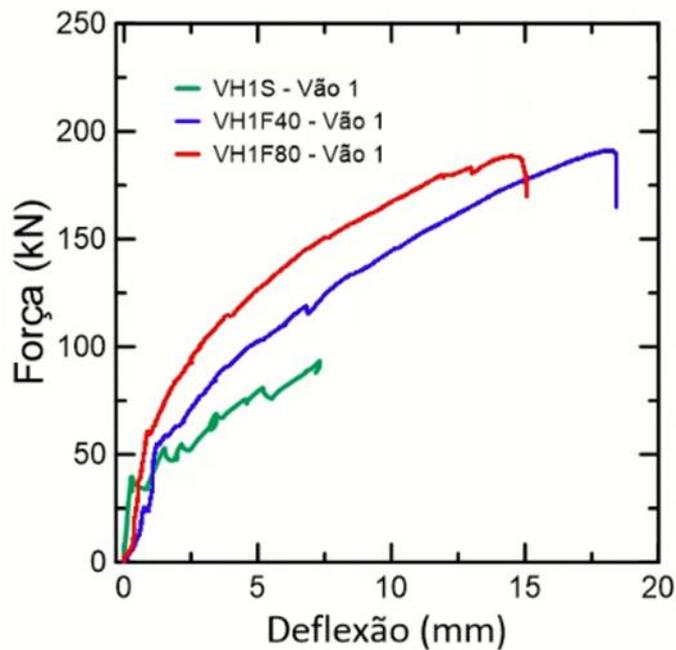


Figura 10 – Modo de falha da viga VH1F80

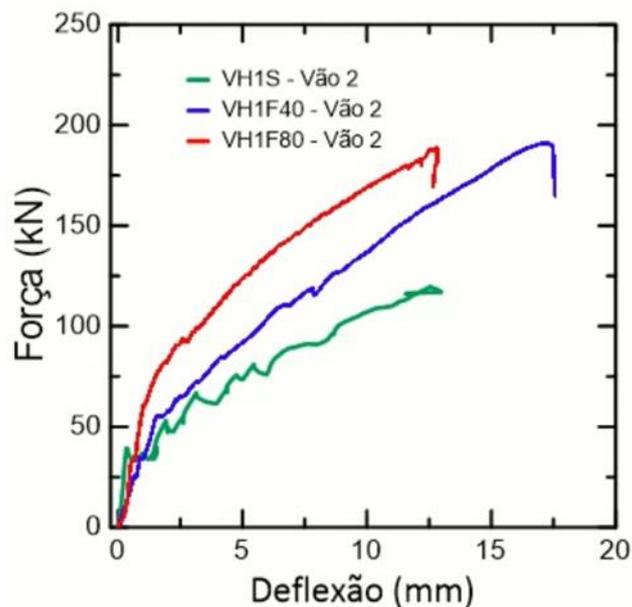
Os diagramas de força versus deflexão para os dois vãos das vigas hiperestáticas são apresentados na Figura 11. As deflexões foram obtidas utilizando transdutores de deslocamentos (LVDT's) posicionados no centro dos vãos. Como esperado, é possível observar um comportamento mais rígido e mais resistente em todas as vigas com adição de fibras de aço. Isto é atribuído ao acréscimo na capacidade de transferência de força na região tracionada em função da tensão residual pós-fissuração do concreto. Fica claro a diferença de rigidez entre a viga VH1S, sem adição de fibras, e as vigas VH1F40 e VH1F80 com adição de 40 kg/m³ e 80 kg/m³, respectivamente.

A viga VH1F40 apresentou um ganho de capacidade resistente 59% superior quando comparada a viga VH1S e a viga VH1F80 resistiu a um carregamento aproximadamente 58% maior do que a viga VH1S, corroborando o ganho de capacidade resistente promovido pela adição das fibras de aço ao concreto. Além disso, as vigas VH1F40 e VH1F80 apresentarem praticamente a mesma carga de ruptura, isto pode ser explicado por conta do modo de falha das vigas ter sido governado pelo cisalhamento, mesmo com frações volumétricas de fibras de aço distintas, indicando que não houve ganhos significativos ao utilizar fibras metálicas e estribos de FRP para combater esforço cortante.

Analisando a Figura 11 e tomando-se como referência o trecho onde ocorrem deflexões de menor magnitude (abaixo de 1,0 mm), é perceptível que há pouca diferença de desempenho entre as vigas. Isto se deve ao fato de, nesta fase, o concreto ainda não ter sofrido fissuração e contribuir de maneira mais importante para as solicitações de tração das vigas do que o as armaduras de reforço. Uma vez que o concreto esteja fissurado, as transferências de forças de tração ocorrem quase que integralmente pelas barras de FRP, nesta etapa, nas vigas onde não há adição de fibras discretas o concreto deixa de contribuir para resistência aos esforços de tração. Nas vigas onde o concreto foi reforçado com fibras de aço, ocorre uma contribuição importante do concreto após a fissuração. Essa diferença de comportamento é ilustrada pelas alterações na inclinação das curvas observadas na Figura 11.



(a)



(b)

Figura 11 – Diagrama carga-deflexão para vigas hiperestáticas para (a) o vão 1; e (b) vão 2

A Figura 12 apresenta curvas de abertura de fissura versus momento atuantes para as vigas. Todas as vigas com adição de fibras discretas apresentaram abertura de fissuras menor para um mesmo momento fletor atuante em comparação com as vigas de referência.

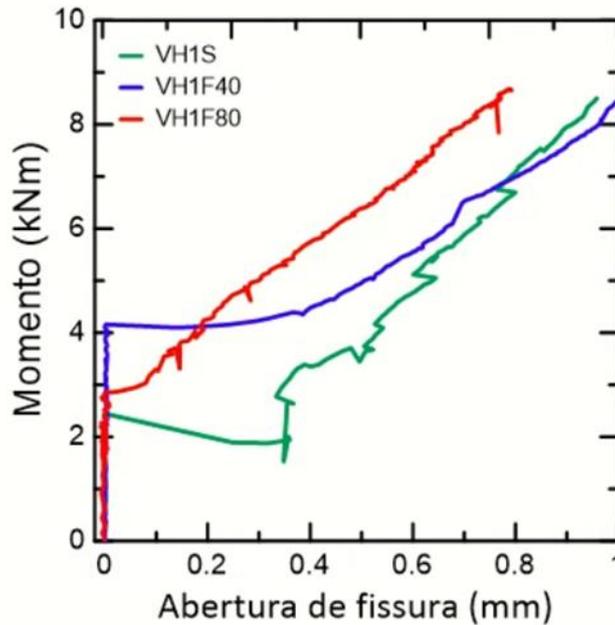


Figura 12 – Curvas de momento fletor *versus* abertura de fissura para as vigas hiperestáticas

Para avaliar a redistribuição de momentos para as vigas hiperestáticas, foi calculado o índice (β) de acordo com a Equação (1), considerando o momento experimental nas regiões de flexão negativa (M_n^{Exp}), e positiva (M_p^{Exp}), os momentos teóricos correspondentes (M_n^{Teo} , M_p^{Teo}) e a reação no apoio central (R_{ac}).

$$\beta_{(\%)} = \left(\frac{M^{Teo} - M^{Exp}}{M^{Teo}} \right) \times 100\% \quad \text{Equação (1)}$$

Onde:

$\beta_{(\%)}$ – é a redistribuição de momentos nas regiões de flexão positiva e negativa;

M^{Teo} – é o momento fletor teórico;

M^{Exp} – é o momento fletor experimental;

Os valores de momentos experimentais (M_n^{Exp}) e (M_p^{Exp}) foram calculados de acordo com as Equações (2) e (3), respectivamente, enquanto os momentos teóricos (M_n^{Teo}) e (M_p^{Teo}) foram calculados em concordância com as Equações (4) e (5).

$$M_n^{Exp} = \frac{(P_u - 2R_{ac}) \times L}{4} \quad \text{Equação (2)}$$

$$M_p^{Exp} = \frac{(P_u - R_{ac}) \times L}{4} \quad \text{Equação (3)}$$



$$M_n^{Teo} = \frac{3P_u L}{32}$$

Equação (4)

$$M_p^{Teo} = \frac{5P_u L}{64}$$

Equação (5)

Onde:

P_u – carga última alcançada para cada viga;

L – vão entre apoios;

M_n^{Exp} – é o momento fletor negativo experimental;

M_p^{Exp} – é o momento fletor positivo experimental;

M_n^{Teo} – é o momento fletor negativo teórico;

M_p^{Teo} – é o momento fletor positivo teórico;

A Tabela 4 resume os valores obtidos para os momentos experimentais e teóricos considerando a carga última para as regiões de momento positivo e momento negativo, bem como a redistribuição de momentos para cada viga ensaiada.

Fica evidente, ao avaliar os resultados apresentados na Tabela 4, que realmente não foi possível verificar redistribuição de esforços satisfatória nas vigas hiperestáticas aqui investigadas. As vigas VH1F40 e VH1F80, com adição de fibras metálicas, apresentaram na região de momento máximo (negativo), valores experimentais de 35% a 63% superiores em relação aos momentos teóricos para esta região. Isto é explicado pela influência direta da adição de fibras na capacidade de transferência de forças sobre uma seção fissurada, causando um aumento de rigidez na região do apoio central e, por consequência, reduzindo a possibilidade de redistribuição dos momentos para a região dos vãos. De maneira semelhante, mas em menor escala, a viga VH1S também apresentou valores experimentais superiores aos valores teóricos, indicando que não houve transferência de momentos da região do apoio central para a extremidades.

Tabela 4 – Carregamento total aplicado, reação no apoio central, momentos fletores e redistribuição de momentos das vigas hiperestáticas

Viga	Carga última (kN)	Reação apoio central (kN)	M_n^{exp} (kN.m)	M_n^{teo} (kN.m)	β (%)	M_p^{exp} (kN.m)	M_p^{teo} (kN.m)	β (%)
VH1S	120	90	14,11	10,65	-32,44	7,15	8,88	19,46
VH1F40	191	145	23,68	17,00	-39,27	10,83	14,17	23,56
VH1F80	189	152	27,41	16,80	-63,16	8,69	14,00	37,90

Em função do modo de falha das vigas não ter ocorrido por flexão, não foi possível conduzir uma avaliação sobre a redistribuição de momentos associada à formação de rótula plástica em função da adição de fibras discretas. A influência do esforço cortante na resposta estrutural das vigas, foi determinante para a alteração no modo de falha esperado.



5 Conclusão

Nos ensaios estruturais de vigas hiperestáticas, todas as vigas apresentaram ruptura frágil por cisalhamento. As vigas contendo adição de fibras de aço apresentaram menor propagação e maior controle de fissuras por flexão, exibiram um comportamento mais rígido, com menores deflexões e resistiram a carregamentos até 59% superiores em relação às vigas de referência, sem adição de fibras. A viga com fração volumétrica de 1,0% apresentou enrijecimento à tração substancial em função da grande capacidade de transferência de força sobre seção fissurada promovida pelo sistema de reforço discreto. Os estribos de GFRP se mostraram pouco eficientes no combate ao cisalhamento, levando todas as vigas a sofrerem o mesmo modo de falha, por esforço cortante. Esse aspecto é ainda mais relevante por conta das fibras de aço, que, mesmo combinadas com os estribos de GFRP, também não apresentaram nas vigas hiperestáticas investigadas, uma resposta substancial ao cisalhamento. Isso é exemplificado pela ruptura das vigas VH1F40 e VH1F80, que apresentaram a ruína por cisalhamento e praticamente mesma carga de ruptura, ainda que a viga VH1F80 contivesse reforço de fibras com fração volumétrica de 1,0%, o dobro da viga VH1F40. Apesar da literatura apresentar satisfatórios resultados de ganhos ao cisalhamento pela adição de fibras de aço majoritariamente em vigas isostáticas, não foi constatada substancial influência positiva da adição das fibras de aço para o cisalhamento nas vigas hiperestáticas investigadas neste trabalho.

Como as vigas não chegaram à ruptura por flexão, uma avaliação sobre a distribuição dos esforços do apoio central em direção aos apoios de extremidade foi de difícil verificação. Além disso, nas vigas hiperestáticas com adição de fibras discretas, a capacidade de transferência de tensões sobre a seção fissurada do CRF mitigou a perda de rigidez na região de momento fletor máximo negativo, essa condição dificultou ainda mais uma possível transferência de momentos do apoio central para os apoios extremos. Nestas vigas, o momento fletor experimental foi consideravelmente superior ao teórico, indicando essa capacidade promovida pela adição das fibras de aço.

6 Referências

CT 303 - Comitê IBRACON/ABECE, **Prática Recomendada - Estruturas de Concreto Armado com Barras de Polímero Reforçado com Fibras (FRP)**, Instituto Brasileiro do Concreto, 2021.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. COMITEE 440. **“GUIDE FOR THE DESIGN AND CONSTRUCTION OF STRUCTURAL CONCRETE REINFORCED WITH FRP BARS”**:ACI 440.1R-15.

Fib Bulletin 40. **FRP reinforcement in RC structures**. Bull 40 Int Fed Struct Concr 2007:160.



Brandt AM. **Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering.** Compos Struct 2008;86:3–9.

Fédération Internationale du Béton. **Model Code for Concrete Structures.** Switzerland: Fédération Internationale du Béton; 2010.

Carvalho V. de M., Cardoso DCT, Silva F. de A. – **Ductilidade e redistribuição de momentos em vigas de concreto armado com barras de GFRP.** Dissertação de Mestrado – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2021.