

A influência das dimensões de mantas de fibras de carbono no comportamento de vigas de concreto armado reforçadas à flexão

The influence of the carbon fiber sheets dimensions on the behavior of flexural strengthened reinforced concrete beams

Charlei Marcelo Paliga(1); Aléxia de Souza Lopes(2); Aline Ribeiro Paliga(3)

1 Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS, Brasil.

E-mail: charleipaliga@gmail.com | ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0521-4764>

2 Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS, Brasil.

E-mail: alexia.lopes.cic@hotmail.com | ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0003-1133>

3 Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS, Brasil.

E-mail: alinepaliga@gmail.com | ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1840-1577>

Revista de Engenharia Civil IMED, Passo Fundo, vol. 7, n. 1, p. 39-55, Janeiro-Junho 2020 - ISSN 2358-6508

[Recebido: Maio 23, 2019; Aceito: Junho 04, 2020]

DOI: <https://doi.org/10.18256/2358-6508.2020.v7i1.3333>

Endereço correspondente / Correspondence address

Rua Benjamin Constant, 1359 - Centro, Pelotas/RS, Brasil
CEP 96010-020

Sistema de Avaliação: *Double Blind Review*

Editor: Aline Zanchet

Como citar este artigo / How to cite item: [clique aqui/click here!](#)

Resumo

É comum a necessidade de se reforçar um elemento estrutural, uma vez que ele nem sempre é capaz de suportar um aumento na carga aplicada para a qual este foi inicialmente projetado. Assim, este trabalho teve como objetivo realizar um estudo da técnica de reforço estrutural à flexão, com material compósito à base de fibras de carbono em vigas de concreto armado. Também, verificar mudanças de comportamento das vigas reforçadas ao utilizar diferentes camadas e geometrias desse material, o qual agrega elevados valores de resistência sem grandes alterações da seção transversal do elemento. Para que os objetivos deste trabalho fossem atingidos, realizou-se um programa experimental que consistiu na realização de ensaios à flexão por três pontos, em quatro vigas. Uma sem reforço, utilizada como parâmetro de comparação e outras três vigas reforçadas com uma, duas e três camadas de manta de fibras de carbono, possuindo, estas, diferentes larguras, mas com mesma área da seção transversal do reforço. De acordo com os resultados experimentais obtidos, percebeu-se que é evidente o aumento de resistência e rigidez das vigas reforçadas em relação à viga testemunho. Constatou-se, também, que a medida que se aumentou o número de camadas de reforço, com consequente redução da sua largura para manter a mesma área de seção transversal, houve redução na carga de ruptura. Ademais, constatou-se que o modo de falha por descolamento do reforço do substrato de concreto é preponderante em relação aos modos de falha típicos de vigas reforçadas à flexão.

Palavras-chave: Reforço estrutural. Vigas de concreto armado. Fibra de carbono. Ensaio à flexão.

Abstract

The need to reinforce a structural element is common, since it is not always able to withstand an increase in the applied load for which it was initially designed. Thus, this work aimed to carry out a study of the technique of structural bending reinforcement, with composite material based on carbon fibers in reinforced concrete beams. Also, verify changes in the behavior of the reinforced beams using different layers and geometries of this material, which adds high strength values without major changes in the cross section of the element. For the objectives of this work to be achieved, an experimental program was carried out, which consisted of three point bending tests on four beams. One without reinforcement, used as a comparison parameter and three other beams reinforced with one, two and three layers of carbon fiber sheets, these having different widths, but with the same area as the reinforcement cross section. According to the experimental results, it is possible to realize the increase of strength and stiffness of the strengthened beams when utilized carbon fibers, when compared with the regular beam. It was also observed a reduction in the rupture load proportional as much as the number of reinforcement layers was increased. The width has also been reduced aiming to keep the same cross-sectional area. Furthermore, it was found that the failure mode for detachment of the reinforcement of the concrete substrate is preponderant in relation to typical flexure failure modes of reinforced concrete beams.

Keywords: Structural strengthening. Reinforced concrete beams. Carbon fiber. Bending test.

1 Introdução

O concreto armado está entre os materiais mais utilizados na construção civil, por esse motivo tem sido objeto de estudo de diversos centros de pesquisa nos últimos anos, como Instituições de Ensino Superior, Centros Tecnológicos e de Desenvolvimento de Materiais. O desenvolvimento da tecnologia do concreto e suas respectivas técnicas construtivas, em conjunto com a implementação de ferramentas computacionais sofisticadas, tornaram possível reproduzir com grande precisão o comportamento do concreto e do aço, permitindo otimizar as estruturas, à medida que suas propriedades são plenamente exploradas (BEBER, 1999).

Mesmo havendo expressivas melhoras do ponto de vista econômico e estrutural, as estruturas em concreto armado se tornaram mais suscetíveis a defeitos, principalmente nos materiais, cálculos e execução, o que pode acarretar em situações de risco (BEBER, 2003). Historicamente, a realidade das construções no Brasil mostra que o número de tais estruturas susceptíveis de reabilitação aumenta à medida que elas envelhecem (CANAVAL *et al.*, 2018).

Segundo a *Fédération Internationale du Béton* – FIB Model Code 2010 (FIB, 2010), quando uma estrutura não é mais capaz de atender de maneira adequada as suas funções é necessário reabilitá-la, ou seja, torná-la apta a satisfazer com segurança à demanda da sociedade, ao nível original ou mais alto, tanto do ponto de vista da durabilidade quanto da resistência. Reis (1998) complementa que a necessidade do reforço surge quando determinado elemento estrutural não é mais capaz de resistir aos esforços solicitantes, podendo, ainda, ser utilizado quando há alterações no uso da edificação que proporcionam aumento do carregamento atuante e mudanças no sistema estrutural. Ademais, devido aos erros de projeto e/ou execução, materiais sem qualidade, ausência de manutenção periódica, variações térmicas intrínsecas e extrínsecas ao concreto e acidentes, tais como choques, sismos e explosões (SIMÕES, 2007).

Nesse contexto, o uso dos materiais compósitos à base de fibras sintéticas de alta resistência tornou-se uma técnica de reforço/recuperação de estruturas de concreto armado muito difundida nos últimos anos. Tudo isso, devido as suas excelentes propriedades, tais como baixo peso, elevada resistência mecânica, elevada resistência à corrosão, entre outros. Geralmente, os polímeros reforçados com fibras (PRF) estão presentes na forma de lâminas ou laminados colados nas superfícies das estruturas de concreto armado através de adesivos à base de epóxi, melhorando seu desempenho estrutural tanto em condições de serviço quanto sob cargas últimas (PALIGA *et al.*, 2013).

Dentre os polímeros reforçados com fibras encontrados, Sallaberry (2005) cita que os PRFC (polímeros reforçados com fibras de carbono) têm sido utilizados com sucesso como reforço à flexão, ao cisalhamento, à compressão (confinamento de pilares) e na reabilitação de elementos submetidos a abalos sísmicos por causa do alto desempenho mecânico das fibras de carbono, permitindo uma significativa redução em suas dimensões.

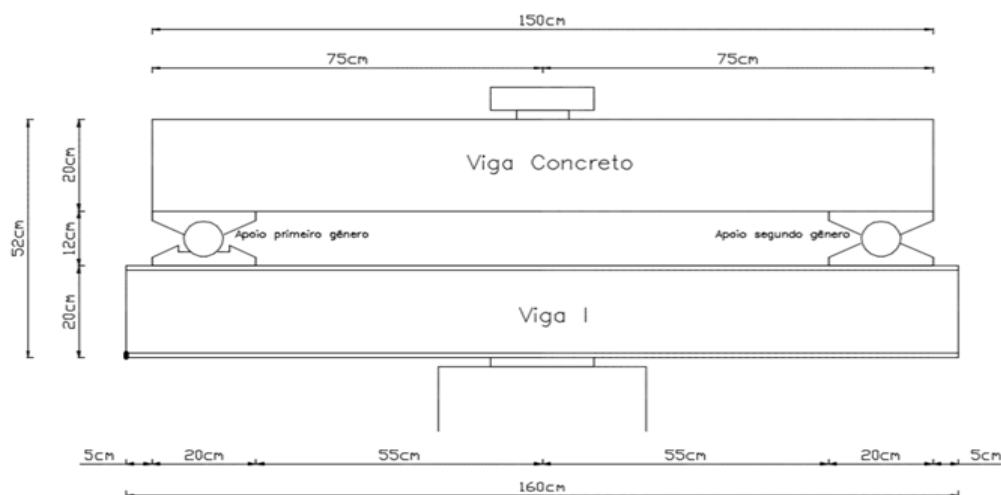
Diante do exposto acima, este trabalho teve como objetivo principal avaliar, através de um programa experimental composto por quatro vigas de concreto armado (uma de referência e três reforçadas com PRFC) submetidas ao ensaio de flexão simples, a técnica de reforço utilizando diferentes dimensões de material compósito à base de fibras de carbono e resina epóxi. Buscou-se como estratégia para se conseguir alcançar os objetivos, utilizar a mesma área de reforço para as três vigas, mudando apenas a sua configuração, a fim de detectar mudanças de comportamento das vigas causadas por diferentes geometrias do PRFC.

2 Materiais e Método

Nesta etapa serão abordados os materiais utilizados para a produção das vigas. Também, é apresentado um roteiro que tem o objetivo de mostrar como foram obtidos os dados do trabalho para análise comparativa dos resultados. Para isso, foram moldadas quatro vigas, sendo uma delas utilizada como viga testemunho, chamada de VT, que depois de submetida à flexão, expressou a carga máxima suportada no limite de sua resistência, tornando-se essa o modelo padrão à análise comparativa. As três vigas restantes receberam o reforço com material compósito à base de fibras de carbono e resina epóxi, com larguras e espessuras das mantas de PRFC diferentes, porém mantendo constante a área da seção transversal de reforço dimensionada. As mesmas foram chamadas de VR1, VR2 e VR3, reforçadas com uma camada de PRFC, duas camadas de PRFC e três camadas de PRFC, respectivamente.

Todas as vigas possuem as mesmas dimensões: 1,5 m de comprimento total, sendo 1,1 m de vão livre entre os apoios de 20 cm. Assim, resultou vão de cálculo de 1,3 m. A seção transversal possuiu 12x20 cm de largura e altura, respectivamente, sendo o desenho esquemático do ensaio das vigas apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Ensaio à flexão



Fonte: Lopes, 2018.

2.1 Concreto

Para a execução das quatro vigas utilizadas nos ensaios produziu-se em laboratório um concreto convencional, sem uso de aditivos de qualquer natureza, de resistência característica à compressão, f_{ck} , igual a 25 MPa, uma vez que esta é uma resistência usual nas estruturas de concreto armado. Além disso, o mesmo enquadra-se na região II, sendo essa equivalente ao ambiente urbano com moderado risco de deterioração.

Para que o concreto atingisse um f_{ck} de 25 MPa realizou-se a dosagem do mesmo através do método da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP). Considerando-se um desvio padrão de 4,0 MPa, por se tratar de concreto produzido em laboratório, chegou-se a resistência de dosagem (resistência média à compressão) de 31,6 MPa, através da consideração de uma distribuição normal de probabilidade para esta grandeza. O abatimento do tronco de cone considerado foi de 80 a 100 mm e relação água/cimento de 0,50. Esse método exige o conhecimento das características dos materiais para determinar a dosagem correta, a fim de obter a resistência previamente estipulada em projeto. A caracterização dos agregados foi feita seguindo todas as recomendações normativas da ABNT, e os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades dos materiais

	Diâmetro máximo característico (mm)	Módulo de finura	Massa unitária (kg/m³)	Massa específica (kg/m³)
Brita origem granítica	19	4,29	1314	2050
Areia quartzosa	2,36	2,64	1460	2620

Fonte: Lopes, 2018.

O cimento utilizado foi o CP-IV 32, com o valor da sua massa específica de 2710 kg/m³ obtida através do contato com o fabricante. A água utilizada para o traço do concreto foi a fornecida pela concessionária local - Serviço Autônomo de Saneamento de Pelotas/RS (SANEP). Ao final, chegou-se ao traço unitário em massa com as seguintes proporções: 1 kg de cimento:1,57 kg de areia:1,99 kg de brita e 0,50 kg de água.

2.2 Aço

Tendo em vista que todas as vigas possuíam o mesmo comprimento e seção transversal, a armadura também foi igual para todas. Dessa forma, utilizou-se o aço CA-50, com módulo de elasticidade igual a 210 GPa. A armadura longitudinal foi composta por duas barras de 6,3 mm de diâmetro na parte superior da seção transversal e duas barras de 8,0 mm para a parte tracionada das vigas. Para a armadura transversal foram utilizadas barras de diâmetro 6,3 mm, distanciadas 10 cm uma

das outras, e dimensionadas a fim de não haver possibilidade de ruptura das vigas por cisalhamento mesmo após o acréscimo no carregamento das vigas reforçadas. O cobrimento das armaduras foi de 30 mm.

2.3 Reforço de material compósito à base de mantas de fibras de carbono

O sistema de reforço utilizado foi do tipo curado in situ, sendo o material compósito à base de fibras de carbono fabricado pela Builder - Indústria e Comércio Ltda., e comercialmente denominado de manta de fibra de carbono REPARDUR C-SHEET 240. Algumas das características técnicas do compósito fornecidas pelo fabricante estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Dados da manta de fibra de carbono REPARDUR C-SHEET 240

Função	Fibra de carbono
Módulo elástico (GPa)	240
Resistência à tração (MPa)	3800
Gramatura da fibra (g/m ²)	300
Densidade (g/cm ³)	1,7
Extensão de rotura (%)	1,55
Espessura para cálculo (gramatura da fibra/densidade) mm	0,176
Seção transversal teórica de cálculo por 1000 mm largura (mm ²)	176
Fator de redução para cálculo (laminação manual/UD)	1,2
Força de tração última 1000 mm de largura (kN)	176 x 3800/1,2 = 557,3
Força de tração última 1000 mm de largura a 0,6% ϵ para cálculo (kN)	211

Fonte: Builder Indústria e Comércio LTDA, 2018.

O sistema compósito reforçado com fibras de carbono é considerado como um material de comportamento elástico-linear até ser atingida a sua tensão de ruptura. Para seu dimensionamento, levou-se em consideração o momento de cálculo resistente da viga de concreto armado sem o reforço: 649,47 kN.cm para uma carga concentrada à meio vão de 20 kN.

Com o objetivo de simular um aumento de 100% no momento fletor de cálculo da viga este valor foi duplicado, a fim de obter-se a área de reforço necessária para a viga suportar esse acréscimo. Desse modo, dimensionou-se o reforço para $M_d = 1298,94$ kN.cm, conforme as recomendações do Bulletin 14 da *Fédération Internationale du Béton* (FIB, 2001), o que resultou numa área de 0,171 cm² necessária de PRFC. Essa área foi dividida pela espessura da manta REPARDUR C-SHEET 240, de 0,0176 cm, obtendo assim a largura necessária para uma camada da fibra igual a 9,7 cm, a qual se aplicou em todo vão livre, de 1,1 m. Tendo em vista que a análise foi feita para

uma, duas e três camadas de PRFC, mantendo constante a área necessária de reforço, aplicou-se o mesmo em camadas com as larguras de 9,7 cm, 4,9 cm e 3,2 cm para as vigas VR1, VR2 e VR3, respectivamente.

As resinas utilizadas para formar o compósito foram a Repardur Base Coat e a Repardur Carbon Coat, ambas do mesmo fornecedor da fibra, Builder - Indústria e Comércio Ltda. A primeira é denominada como resina de imprimação, e foi utilizada para corrigir o substrato onde se aplicou o reforço (concreto). A segunda resina possui a finalidade de saturar a manta de fibras de carbono na peça de concreto, e por isso recebe o nome de resina de saturação.

2.4 Execução das vigas

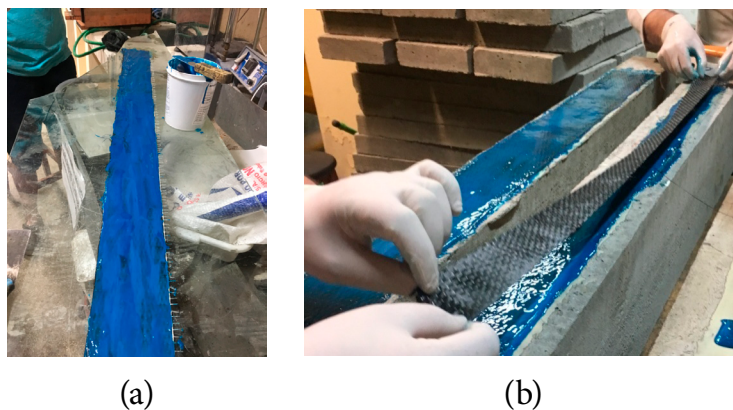
As quatro vigas foram produzidas no mesmo dia, utilizando-se a madeira pinus para as formas, tendo estas 12x20x150 cm de dimensões internas. Após a confecção das formas, foi aplicado o óleo desmoldante, para facilitar a desforma do concreto. Em seguida as armaduras foram colocadas, respeitando-se o cobrimento de 3 cm das faces internas das formas. Esse distanciamento foi garantido por espaçadores plásticos do tipo cadeirinha, na parte inferior, e espaçadores plásticos do tipo circular raiado nas laterais.

Para cada viga foi feita uma betonada e moldados dois corpos de prova cilíndricos de 10x20cm, de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2016), para análise da resistência à compressão aos 28 dias. Os corpos de prova foram desmoldados 48h após à concretagem, e para realizar o processo de cura ficaram imersos em tanque de água saturada com hidróxido de cálcio até os 28 dias, quando, então, foram rompidos em prensa hidráulica segundo recomendações da NBR 5739 (ABNT, 2018), sendo que os mesmos apresentaram resistência média à compressão de 34,71 MPa com 0,66 MPa de desvio padrão.

As vigas concretadas foram molhadas e cobertas com plástico para evitar a rápida retração do concreto, permanecendo em espaço de laboratório durante seu período de endurecimento. Aos 33 dias as vigas foram desformadas e no dia seguinte foi iniciado o processo de aplicação do reforço, iniciando pelo corte da manta de acordo com as larguras determinadas. Posteriormente, as vigas foram lixadas para obtenção de uma superfície plana para a colagem da manta. Em seguida, foi utilizado um compressor de ar para a retirada da poeira da superfície das vigas de concreto e assim feita a marcação da posição do reforço nas vigas que o possuíam. O adesivo estrutural foi preparado após o término da limpeza das superfícies e toda a sua aplicação seguiu as etapas recomendadas pelo fabricante.

A primeira resina a ser utilizada foi a Repardur Base Coat para regularizar a superfície da viga, sendo que esta necessita de no mínimo 12 horas de cura. Dessa forma, decorridas as 12h, deu-se continuidade na aplicação do reforço, sendo aplicada a resina Repardur Carbon Coat para saturação da manta, conforme mostrado na Figura 2a, e em seguida colou-se a manta saturada sobre a viga (Figura 2b).

Figura 2 – Aplicação da manta de fibra de carbono REPARDUR C-SHEET 240



Fonte: Lopes, 2018.

Na Figura 3 estão apresentadas as vigas VR1, VR2 e VR3 após o processo de colagem das mantas, bem como a viga testemunho VT.

Após sete dias de cura da resina, indicado pelo fabricante do compósito, foi possível realizar os ensaios à flexão das quatro vigas. Os mesmos foram realizados no Laboratório do Núcleo de Materiais e Técnicas Construtivas do Centro de Engenharias da UFPel, utilizando-se a prensa hidráulica modelo YAW-2000 da marca *Time Group Inc*, com carga aplicada respeitando-se uma taxa de deslocamento controlada de 5 mm/min para todas as vigas. A máquina de teste é controlada por um computador, e os resultados do ensaio e os seus respectivos gráficos foram gerados a partir do *software WinWDW*.

Figura 3 – Vigas VR1, VR2, VR3 e VT, respectivamente, da esquerda para direita



Fonte: Lopes, 2018.

3 Resultados e Discussões

Nesse item estão expostos os resultados de carga máxima e relação carga x deslocamento de cada uma das vigas ensaiadas. Por fim, são feitos os comparativos

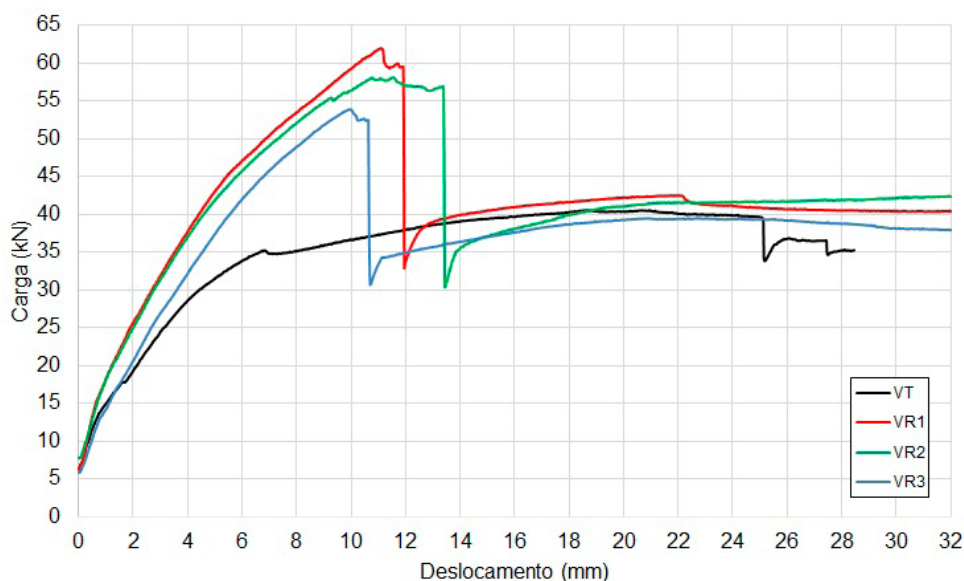
de aumento da carga resistente apresentado pelas vigas reforçadas em relação à viga testemunho e a comparação entre as vigas VR1, VR2 e VR3, a fim de verificar qual obteve melhor aproveitamento e desempenho.

3.1 Comparativo das vigas reforçadas em relação à viga testemunho

A viga VT não possuiu qualquer tipo de reforço e foi, portanto, adotada como uma viga de referência para análise e interpretação dos resultados em comparação com as vigas reforçadas VR1, VR2 e VR3. Na Figura 4 são apresentadas as relações carga x deslocamento no centro do vão durante a realização dos ensaios até atingirem-se as rupturas das vigas.

A partir da análise do comportamento e dos resultados obtidos para cada uma das vigas, torna-se possível realizar a comparação do desempenho prático entre as vigas reforçadas com diferentes camadas, bem como com a viga testemunho. Os valores obtidos para as cargas de ruptura e as porcentagens de aumento de carga são apresentados na Tabela 3.

Figura 4 – Gráfico carga x deslocamento das quatro vigas ensaiadas



Fonte: Lopes, 2018.

Tabela 3 – Resultados do aumento de carga das vigas reforçadas

Viga	Carga Máxima (kN)	Aumento de carga em relação à viga VT
VT	40,57	-
VR1	61,93	52,65%
VR2	58,11	43,23%
VR3	53,80	32,61%

Fonte: Lopes, 2018.

Ao observar-se os gráficos da Figura 4, o início representa quando as vigas começaram a deformar-se com carga de aproximadamente 6 kN, sendo que antes disso houve o ajuste da prensa para aplicação uniforme da carga sobre o disco de aço. Analisando-se o comportamento da viga VT é possível identificar que a fissuração surge, primeiramente, com carga de aproximadamente 14 kN, sendo que a segunda fissura abre com carga próxima aos 18 kN e um deslocamento de 2 mm. Posteriormente, com carga de aproximadamente 35 kN e deslocamento de 7 mm, a armadura tracionada entra em escoamento, suportando o aumento da carga até os 40 kN, quando por deformação plástica excessiva passa a perder resistência. As fissuras que foram observadas aconteceram na parte inferior próximas ao centro da viga. Assim, constatou-se que a mesma apresentou ruína por flexão com deformação excessiva da armadura positiva, percebida pelas fissuras de flexão no meio do vão, como apresentado na Figura 5.

Figura 5 – Abertura de fissuras da viga VT



Fonte: Lopes, 2018.

Quando a viga testemunho atingiu um deslocamento próximo de 25 mm ocorreu o esmagamento do concreto, justificando, assim, a redução da carga apresentada no gráfico da Figura 4. Sua carga máxima suportada foi de 40,57 kN, e seu deslocamento correspondente de 20,96 mm. Assim, verificou-se que a viga VT resistiu a um momento de 1318,53 kN.cm, sendo que a mesma foi dimensionada para resistir a 649,47 kN.cm. Dessa forma, é possível dizer que a viga VT passou pelos estágios de carga esperados, partindo do estágio I (não fissurada), passando pelo estágio II (fissurada) até o estágio III, que se caracteriza pelo aço em seu estado plástico.

Observando-se as curvas apresentadas na Figura 4, ficou visível a mudança significativa no comportamento das vigas, e que o reforço contribuiu para o aumento de carga resistente das vigas reforçadas em relação à viga testemunho. Ademais, as vigas reforçadas apresentaram maior rigidez do que a viga VT, o que pode ser comprovado através dos resultados de deslocamentos apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Deslocamentos verticais no centro das vigas ensaiadas

Viga	Deslocamento na carga máxima (mm)	Deslocamento na carga de 40,57kN (mm)	Redução do deslocamento na carga máxima em relação à viga VT
VT	20,96	20,96	-
VR1	11,07	4,51	47,19%
VR2	11,54	4,70	44,95%
VR3	9,93	5,67	52,62%

Fonte: Lopes, 2018.

Ao analisar-se isoladamente o comportamento da VR1, verifica-se que a carga e o deslocamento são crescentes até 11 mm. Após este ponto, iniciou-se o descolamento do PRFC, indicado pela queda da curva no gráfico, com início próximo à região onde estava aplicada a carga (região central da viga). Logo em seguida, com deslocamento de 12 mm aconteceu o descolamento total do reforço, partindo deste ponto até a extremidade mais próxima. Tal fato ocasionou a queda brusca da carga de 59 kN para próximo dos 35 kN, quando a viga passou a apresentar um comportamento semelhante à viga testemunho (viga VT). Pode-se observar, também, que a fissuração se iniciou para uma carga de 15 kN, evidenciado pela mudança de inclinação na curva carga x deslocamento, com propagação a partir desse ponto.

Este modo de ruptura, descolamento partindo do meio do vão, está associado ao processo de transferência de tensões junto às fissuras. Beber (2003) relatou que, quando uma fissura se forma, a tensão de tração correspondente é transferida para o reforço, resultando no surgimento de tensões tangenciais entre concreto e reforço, próximo a esta fissura. O incremento na carga aplicada conduz a um aumento natural nas tensões de tração e a consequente elevação da tensão tangencial na interface concreto/reforço, ao longo de um comprimento de ancoragem efetivo. Por isso, quando esta tensão tangencial atingiu valores críticos, iniciou-se o descolamento do reforço da viga VR1, se propagando para a extremidade mais próxima. Na Figura 6 é mostrada a viga após o seu rompimento.

Figura 6 – Viga VR1 após o ensaio

Fonte: Lopes, 2018.

A viga VR2 foi reforçada com duas camadas da manta de fibras de carbono, cada uma com 4,9 cm de largura, mantendo a área da seção transversal encontrada na metodologia de cálculo. Ao observar-se o gráfico da Figura 4, para essa viga, o incremento de deslocamento e carga são crescentes até atingir-se um deslocamento próximo de 9 mm, com carga correspondente próxima de 55 kN, quando é iniciado o processo do descolamento do PRFC, com separação total do mesmo quando a viga atingiu um deslocamento próximo aos 13,5 mm. Este descolamento partiu do meio do vão, devido às fissuras de flexão nessa região, propagando-se até a extremidade. Após essa queda, a viga VR2 passou a apresentar comportamento semelhante à viga testemunho (VT).

Da mesma forma que a viga VR1, a viga VR2 também ultrapassou o momento de cálculo $M_d = 1298,94 \text{ kN.cm}$, atingindo $M = 1888,58 \text{ kN.cm}$ (carga máxima de 58,11 kN). Ademais, essas duas vigas apresentaram a mesma carga de 15 kN quando da passagem do estágio I para o estágio II, com deslocamentos bastante próximos até o início do descolamento do PRFC. A Figura 7 apresenta a viga VR2 após a ruptura.

A viga VR3 atingiu sua carga máxima aos 53,80 kN, com um deslocamento correspondente de 9,93 mm. O momento máximo resistido foi 1748,5 kN.cm, ultrapassando, também, o momento de cálculo $M_d = 1298,94 \text{ kN.cm}$ em aproximadamente 35%. Durante o ensaio foi possível verificar que o descolamento do reforço se iniciou a partir da sua extremidade, com o arrancamento de uma camada de concreto. Conforme mostrado na Figura 4, esta ruptura teve início com carga próxima de 53 kN. Porém, o descolamento total do reforço só ocorreu quando a viga chegou aos 10,6 mm de deslocamento. Ademais, a VR3 foi a viga que teve comportamento mais próximo da viga VT, com deslocamentos muito parecidos até aproximadamente 50% da carga máxima atingida por esta viga, o que indica que o reforço passou efetivamente a ser solicitado a partir desse ponto.

Figura 7 – Abertura de fissuras e descolamento do reforço da viga VR2



Fonte: Lopes, 2018.

Nas vigas VR1 e VR2, o PRFC passou a colaborar na resistência da viga após o surgimento das primeiras fissuras, restringindo suas aberturas e também propagação. A Figura 8 apresenta a viga VR3 após a ruptura, tornando visível a abertura de fissuras e o descolamento do reforço junto de uma camada de concreto.

Observando-se os comportamentos das quatro vigas de concreto armado é possível constatar que para os deslocamentos finais todas as vigas tendem a seguir a mesma inclinação, pois onde não há mais a contribuição do reforço, a viga é suportada apenas pela sua armadura interna, seguindo assim, o mesmo comportamento da viga testemunho.

Ao fim, constatou-se que todas as vigas ultrapassaram o momento para o qual foram dimensionadas, sendo que caso houvesse uma aderência perfeita entre o substrato de concreto e o material compósito esses valores poderiam ser superiores aos encontrados, evidenciando um modo de falha típico de vigas reforçadas à flexão e o subaproveitamento do material.

Figura 8 – Abertura de fissuras e descolamento do reforço da viga VR3



Fonte: Lopes, 2018.

É importante lembrar que as vigas reforçadas foram projetadas para suportar um aumento de carga que fosse o dobro em relação à viga testemunho, sendo que a viga VR1 é a que chegou mais perto deste objetivo, com 52,65% de aumento em relação à viga VT, seguida da VR2 com 43,23% e por último a VR3 com 32,61%. Na Figura 9 são mostrados os estados de deformação das quatro vigas após os ensaios, onde percebe-se que as fissuras das vigas VR1 e VR2 se assemelham, enquanto que VT e VR3 possuem estados de fissuração mais próximos, o que corrobora com o que foi escrito anteriormente.

Figura 9 – Deformação das vigas após ensaio

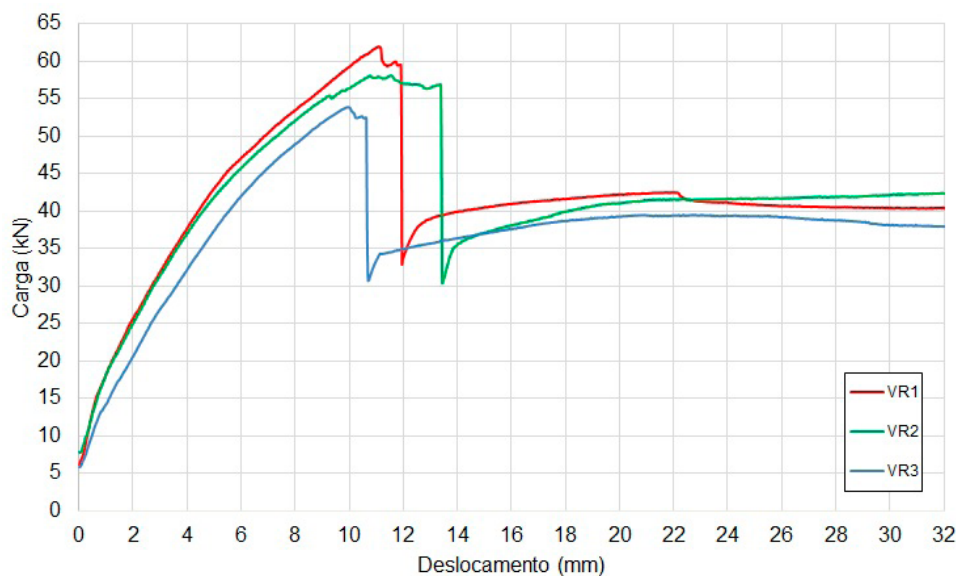
Fonte: Lopes, 2018.

3.2 Comparativo entre as vigas reforçadas

Julgou-se interessante analisar o desempenho das vigas reforçadas com diferentes configurações das camadas de reforço, porém dimensionadas para suportar a mesma carga. Para isso, foram utilizadas vigas reforçadas com uma, duas e três camadas, com diferentes larguras do PRFC, tornando possível fazer a relação entre os resultados experimentais obtidos. A Figura 10 apresenta estes resultados.

A medida que se aumentou o número de camadas, diminuindo a largura do PRFC, a resistência diminuiu. Esse fato se deve às maiores tensões tangenciais que são geradas entre o substrato de concreto e o material de reforço devido a menor área de contato entre os materiais. O aumento da rigidez do PRFC com o aumento do número de camadas provoca menor flexibilidade e maiores possibilidades de descolamento, fato este que pode explicar a diferença na posição de início do descolamento do reforço. Ressalta-se que nas vigas VR1 e VR2 o descolamento iniciou próximo às fissuras centrais de flexão, enquanto que na viga VR3 o descolamento iniciou pela extremidade do reforço.

Percebeu-se, também, maior rigidez das vigas VR1 e VR2 em relação à viga VR3. Também, comprovou-se a eficiência do reforço, mesmo que não na sua totalidade, uma vez que todas vigas reforçadas resistiram a um momento fletor maior que o valor de momento para o qual as mesmas foram dimensionadas. Dessa maneira, destaca-se a importância de um sistema de ancoragem do reforço para que se possibilite que rupturas clássicas por flexão de vigas reforçadas sejam atingidas. Rupturas estas, utilizadas nos processos de cálculo (escoamento da armadura seguido pelo esmagamento do concreto ou escoamento da armadura seguido pela ruptura à tração do reforço).

Figura 10 – Gráfico Carga x Deslocamento das vigas reforçadas

Fonte: Lopes, 2018.

4 Considerações finais

Inicialmente, pode-se concluir que se obteve um considerável aumento de carga resistente das diferentes vigas reforçadas em relação à viga testemunho, isso porque o reforço utilizado é um material com elevada resistência à tração, na ordem de 3800 MPa. Tendo que o seu funcionamento equivale a uma armadura adicional de tração do elemento estrutural, o que foi possível observar através dos resultados obtidos, já que todas as vigas reforçadas suportaram cargas até 52% maiores que a viga de referência, a qual foi de 40,57 kN.

Neste trabalho, a maior carga foi observada para a viga VR1, que chegou aos 61,93 kN. Porém, à medida que se aumentou o número de camadas de PRFC essa carga reduziu para 58,11 kN e 53,80 kN para as vigas VR2 e VR3 respectivamente. Esse fato se deve às menores larguras dos reforços destas vigas, o que acabou provocando maiores níveis de tensões de cisalhamento na interface substrato de concreto/reforço, ocasionando rupturas por descolamento do PRFC com cargas menores. Entretanto, nenhuma das vigas reforçadas atingiu sua máxima capacidade de carga devido ao modo precoce de ruptura por descolamento, sendo esse um modo de falha típico destas vigas, o que indica o subaproveitamento de um material com excelentes propriedades mecânicas. Assim, é recomendado para um bom aproveitamento deste material o uso de ancoragens do reforço para que as vigas possam atingir os modos clássicos de ruptura por flexão.

Através dos resultados obtidos, pode-se sugerir que a rigidez do reforço é uma importante propriedade que modifica o comportamento das vigas. Isso foi

observado pela diferença na posição de início do descolamento da VR3 com relação às vigas VR1 e VR2, que tiveram o início do descolamento próximo às fissuras centrais de flexão, comportamento diferente da viga com reforço de maior rigidez que teve o início do descolamento na sua extremidade.

Ao se fazer uma análise em termos de deslocamentos, constatou-se que viga de referência (não reforçada) apresentou deslocamentos bem mais elevados do que as demais vigas reforçadas para um mesmo nível de carga. Ademais, que as vigas VR1 e VR2, que receberam uma e duas camadas de PRFC respectivamente, apresentaram rigidez bastante semelhantes, fato comprovado através da análise da Figura 10.

Ao observar-se a mesma figura, nota-se que a viga VR3 apresentou deslocamentos ligeiramente superiores às vigas VR1 e VR2 para um mesmo nível de carga antes do início do descolamento. Assim, pode-se afirmar que o reforço acaba introduzindo um acréscimo de rigidez às vigas, fato mais importante ainda pela insignificante alteração na geometria da seção transversal dos elementos estruturais.

Como um todo, a técnica de reforço à flexão com mantas de fibras de carbono e resinas poliméricas se mostrou bastante eficiente, apresentando desempenho satisfatório, visto que todas vigas reforçadas resistiram a um momento fletor maior que o momento resistente da viga de referência, com deslocamentos inferiores à mesma.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova*. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- BEBER, Andriei José. *Avaliação do desempenho de vigas de concreto armado reforçadas com lâminas de fibra de carbono*. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.
- BEBER, Andriei José. *Comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibra de carbono*. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.
- BUILDER INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA. Disponível em: <http://www.builder.ind.br/materiais-reforco>. Acesso em: 5 nov. 2018.
- CANAVAL, J. H.; DA SILVA, T. J; SANTOS, A. C. Estudo experimental de vigas de CA reforçadas à flexão por encamisamento e conectores. *Revista Ibracon de Estruturas e Materiais*, v. 11, n. 4, p. 810-833, 2018.
- FÉDÉRATION INTERNATIONALE du BÉTON. *Bulletin 14: Externally Bonded FRP reinforcement for RC structures*. Lausanne, FIB, 2001.
- FÉDÉRATION INTERNATIONALE du BÉTON. *Model Code 2010*. Lausanne, FIB, 2010.
- LOPES, Aléxia de Souza. *Análise experimental para o reforço à flexão, com mantas de fibras de carbono de diferentes dimensões, em vigas e concreto armado*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2018.
- PALIGA, C. M.; REAL, M. V.; CAMPOS FILHO, A. Análise numérica de vigas de concreto armado reforçadas por compósitos formados por fibras de alta resistência e argamassa de cimento. *Revista Ibracon de Estruturas e Materiais*, v. 6, n. 2, p. 211-226, 2013.
- REIS, Andréa Prado Abreu. *Reforço de vigas de concreto armado por meio de barras de aço adicionais ou chapas de aço e argamassa de alto desempenho*. 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1998.
- SALLABERRY, Roberta Dutra. *Limite de deformação das fibras de carbono usadas no reforço à flexão de vigas de concreto armado*. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.
- SIMÕES, Maria Luisa de Faria. *Reforço à flexão de vigas de concreto armado por encamisamento parcial*. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.