

ANÁLISE EXPERIMENTAL DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO SUJEITAS À FLEXÃO REFORÇADAS COM FIBRA DE CARBONO

Michel Cararo Fernandes (1), Alexandre Vargas (2).

UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense
(1) michelcarfer@gmail.com, (2) avargas@unesc.net

RESUMO

Reforços em estruturas tem como objetivo restabelecer a capacidade portante, quando da necessidade de correção de alguma anomalia ou seu incremento para uma nova finalidade. O presente estudo busca avaliar a eficiência da contribuição do reforço com compósitos estruturados com fibra de carbono na região tracionada, em vigas submetidas à flexão, através de um dimensionamento teórico e análise experimental. Para isso foram avaliados o comportamento de dois grupos com três vigas cada. O grupo A foi o grupo de referência (sem reforço) e grupo B recebeu reforço na região tracionada da viga. Foram avaliadas duas situações: carga ao atingirem o deslocamento máximo admitido por norma ($l/250$) e no momento da ruptura. Como resultados, obteve-se um acréscimo nas vigas do grupo B em relação ao grupo A, de aproximadamente 20% de carga no momento do deslocamento máximo estabelecido por norma e aumento de carga em torno de 12 % na ruptura. Na ruptura as vigas do grupo B apresentaram ainda, deslocamento médio em torno de 24% menor comparado ao grupo A.

Palavras-Chave: Vigas Reforçadas. Fibra de Carbono. Reforço.

1. INTRODUÇÃO

No decurso da evolução humana o homem precisou adaptar o meio onde vive para atender suas novas necessidades. Sua expectativa de vida aumentou juntamente com a necessidade de habitações mais duráveis.

Entretanto é comum o relato de falhas e degradações das estruturas que contribuem para a redução da durabilidade, que é definida pela NBR 15575:2013¹ (2013, p.7) como a “capacidade da edificação ou de seus sistemas de desempenhar suas funções, ao longo do tempo e sob condições de uso e manutenção especificadas.” Para que essas estruturas mantenham um período de vida adequado, é preciso corrigir essas anomalias através de técnicas de reforço, que permitem “o aumento da capacidade portante da estrutura.” (SANTOS², 2008, p.16).

Por razões econômicas, históricas, sociais ou patrimoniais, o "reforço de uma estrutura ocorre quando há necessidade de correção de anomalias de projeto, execução, utilização ou da necessidade de se modificar a finalidade da edificação." (SANTOS², 2008, p.16).

No mercado encontram-se disponíveis vários métodos de reforço com distintos materiais, porém este estudo abordará apenas o sistema de compósitos estruturados com fibras de carbono (CFC). O CFC é um sistema obtido pela associação de dois elementos distintos e fundamentais. Cabe a cada um desses elementos exercerem suas funções da forma como foram citados por Machado³ (2002, p.35):

- A matriz polimérica, a quem cabe a função de manter as fibras que as estruturam coesas propiciando a transferência das tensões de cisalhamento entre os dois elementos estruturais, concreto e fibra de carbono;
- O elemento estrutural, constituído pelas fibras de carbono. As fibras dispostas unidirecionalmente dentro das matrizes poliméricas absorvem as tensões de tração decorrentes dos esforços solicitantes atuantes.

Escobar⁴ (2003, p. 5) menciona que "o desenvolvimento dos reforços com polímeros reforçados com fibras ("Fiber Reinforced Polymers" - FRP) está relacionado com o propósito de expandir o uso de compósitos depois da 2^a Guerra Mundial." Mas foi em 1995 que o método para reforço "conheceu alguns ajustes importantes e ganhou particular desenvolvimento após a ocorrência do sismo de Kobe, no Japão." (SOUZA⁵; RIPPER, 1998,p.152). No Brasil a primeira aplicação do sistema ocorreu em 1998, "com o reforço do Viaduto de Santa Teresa, com extensão total 397 m, na cidade de Belo Horizonte – MG." (MACHADO³, 2002, p.3).

Nesse contexto este trabalho busca analisar e avaliar a eficiência da contribuição dos polímeros reforçados com fibra de carbono, aplicados em estruturas de concreto armado, na absorção dos esforços de flexão, através de um dimensionamento teórico e análise experimental.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A fase experimental foi executada em duas etapas. Na primeiramente foi realizado o ensaio de flexão em 04 pontos de uma viga piloto (VP), de seção 12X20 cm, reforçada com compósito estruturado com fibra de carbono na região tracionada. Este ensaio piloto teve o objetivo de analisar o sistema de ligação concreto-resina-

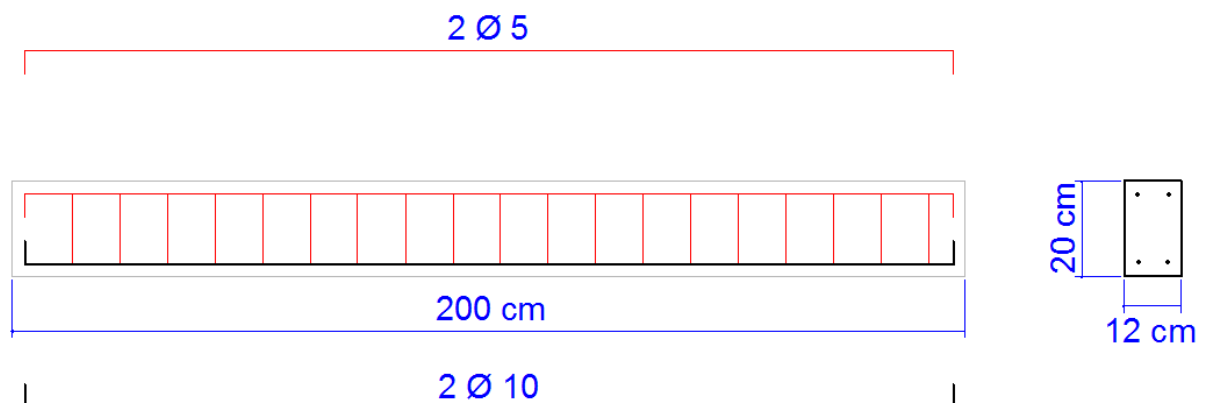
CFC, avaliando o comprimento necessário do reforço. Foi uma etapa importante que evitou imprevistos na etapa posterior.

Para a segunda etapa foram fabricadas 06 vigas que foram divididos em dois grupos. O grupo A, composto por 03 vigas sem reforço que foram usadas como referência. O grupo B também composto por 03 vigas, recebeu reforço na face tracionada com compósito estruturado com fibra de carbono. Os dois grupos tiveram seus desempenhos analisados através do ensaio de flexão em 04 pontos. Simultaneamente foram realizados ensaios complementares, como o slump-test e o ensaio de compressão axial, para a caracterização do concreto, seguindo as recomendações da NBR 5739⁶:2007.

2.1 FABRICAÇÃO DAS VIGAS

Todas as vigas foram fabricadas com seção 12X20 cm e 200 cm de comprimento. Para o dimensionamento da armadura de flexão foram seguidos os critérios exigidos pela NBR 6118⁷:2014, considerando a resistência característica do concreto de 20 MPa e aço CA-50. Adotou-se para a armadura de flexão duas barras com 10 mm diâmetro, resultando numa área de aço de 1,6 cm². Os estribos com 5,0 mm de diâmetro foram posicionados com um espaçamento de 10 cm, atendendo aos critérios de espaçamento máximo e de diâmetro mínimo, exigidos pela NBR 6118⁷:2014. A Figura 1 mostra o detalhamento e a armadura adotada.

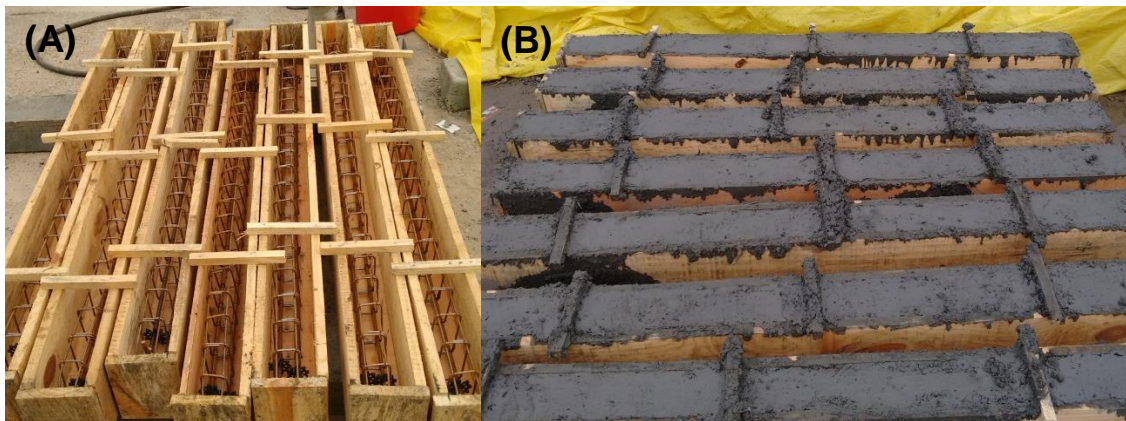
Figura 1: Detalhamento da armadura.



Fonte: Michel Cararo Fernandes, 2015.

Foram concretadas simultaneamente as 07 vigas com concreto usinado C20. Para o adensamento foi utilizado vibrador de imersão e o acabamento foi feito com a ajuda de uma colher de pedreiro. No mesmo instante foram colhidas amostras para o ensaio de compressão axial. Com intenção de garantir o cobrimento da armadura com uma camada de 2,5 cm, como estabelece a NBR 6118⁷:2014 para classe de agressividade ambiental II, foram utilizados espaçadores. A concretagem ocorreu no pátio do Iparque na UNESC. A Figura 2 mostra as etapas no momento da concretagem.

Figura 2: Concretagem – (A) Armaduras posicionadas com espaçadores nas formas; (B) Vigas concretadas.



Fonte: Michel Cararo Fernandes, 2015.

2.2 APLICAÇÃO DO REFORÇO COM COMPÓSITOS ESTRUTURADOS COM FIBRA DE CARBONO

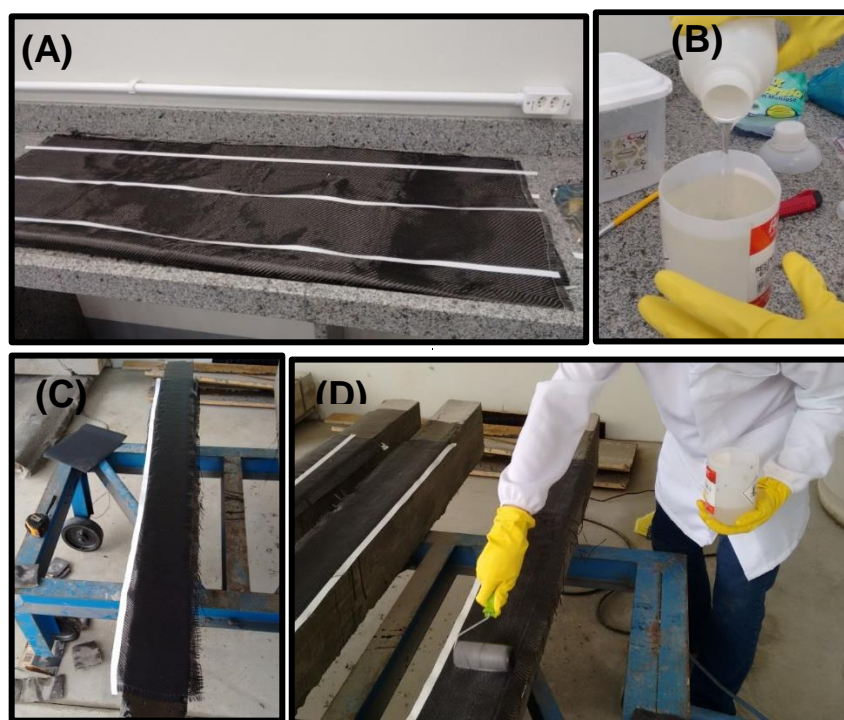
A desforma das vigas ocorreu aos 28 dias de idade, sendo, em seguida selecionadas 03 vigas para compor o grupo B. As faixas de tecido de fibra de carbono utilizadas foram cortadas com dimensões de 130X12 cm. O comprimento de 130 cm foi adotado devido ao tamanho da malha de fibra que se encontrava disponível.

A aplicação da resina exigiu que fossem tomados alguns cuidados em relação à superfície de aplicação, por isso as vigas do grupo B receberam um tratamento na face tracionada, garantindo que esta, estivesse livre de pó e sujeira. O processo foi realizado com o auxílio de lixa e escova. Em seguida se iniciou o preparo da resina para aplicação.

A mistura foi feita na proporção de 100% de resina para 50% de endurecedor, misturando os componentes manualmente por 5 minutos, respeitando o recomendado pelo fabricante. Após a homogeneização, a mistura possui aproximadamente 18 minutos de trabalho até que o processo de polimerização se inicie. O tempo de cura total acontece após 07 dias, A partir desse período a peça já pode ser exposta a agressões químicas e mecânicas.

A resina foi aplica no substrato preparado com o auxilio de um rolete médio garantindo uma camada fina de produto, em seguida as faixas de fibra de carbono foram centralizadas na superfície da viga, e então impregnada as com mais uma camada de resina epóxi, formando o sistema CFC. Após a aplicação do reforço as vigas foram transportadas para o interior do LEE – Laboratório Experimental de Estruturas da UNESC, onde permaneceram por 07 dias em local seco, em temperatura e umidade ambientes. Na Figura 3 podemos visualizar as etapas da aplicação do reforço.

Figura 3: Aplicação do reforço – (A) Marcação para corte da fibra; (B) Homogeneização da resina; (C) Aplicação da fibra; (D) Aplicação final de resina.

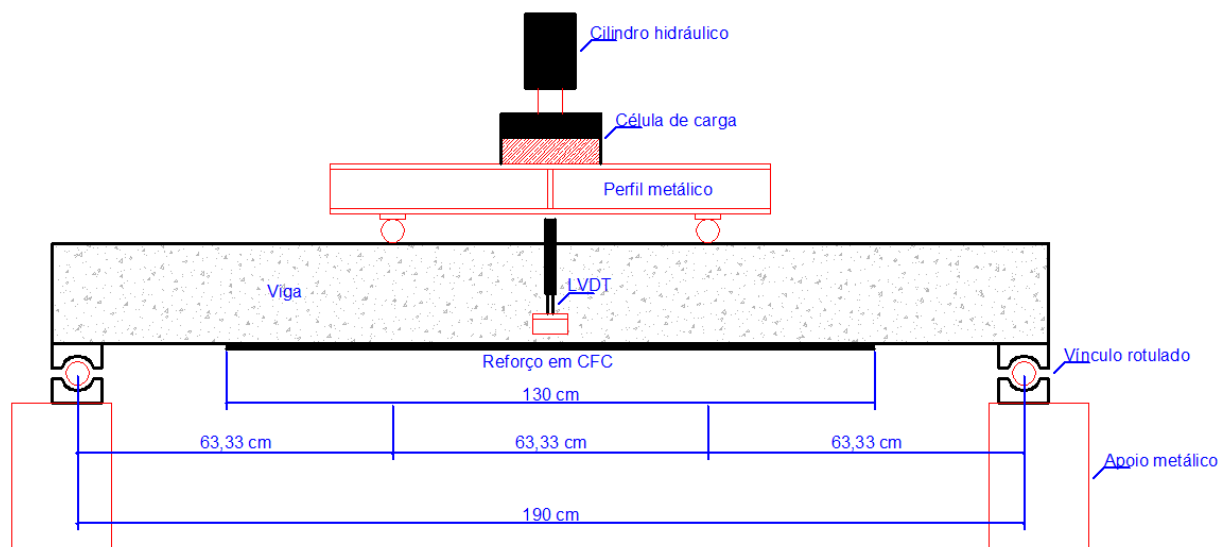


Fonte: Michel Cararo Fernandes, 2015.

2.3 ENSAIO DE FLEXÃO À QUATRO PONTOS DAS VIGAS

Os ensaios foram realizados no LEE – Laboratório Experimental de Estruturas da UNESC, localizado no Iparque. O sistema é composto por um pórtico metálico equipado com um cilindro hidráulico com capacidade de 500 kN e uma célula de carga acoplada a sua base. Para aferir o deslocamento foram utilizados dois transdutores de deslocamento (LVDT) de 100 mm, localizados no centro das vigas. Os equipamentos estão conectados ao sistema de aquisição de dados Quantum X® que utiliza o *software* Catman Easy®. As cargas foram aplicadas pelo cilindro hidráulico e através de um perfil metálico foram transferidas para dois pontos localizados nos terços das vigas. Os dois grupos de vigas foram avaliados no instante em que atingiram o deslocamento máximo descrito pela norma ($L/250$) e no instante da ruptura. Podemos visualizar na Figura 4 o posicionamento dos equipamentos na realização do ensaio.

Figura 4: Posicionamento ensaio instrumentado de flexão em 04 pontos.



Fonte: Michel Cararo Fernandes, 2015.

2.4 ESTIMATIVA DOS VALORES DE CARGA

Foi calculado para cada grupo de vigas o valor de carga que deveriam suportar de acordo com o dimensionamento teórico.

2.4.1 CÁLCULO DE CARGA PARA O GRUPO A

Utilizando a metodologia de cálculo disponibilizada por CARVALHO⁸, foram calculadas as características apresentadas na Tabela 1.

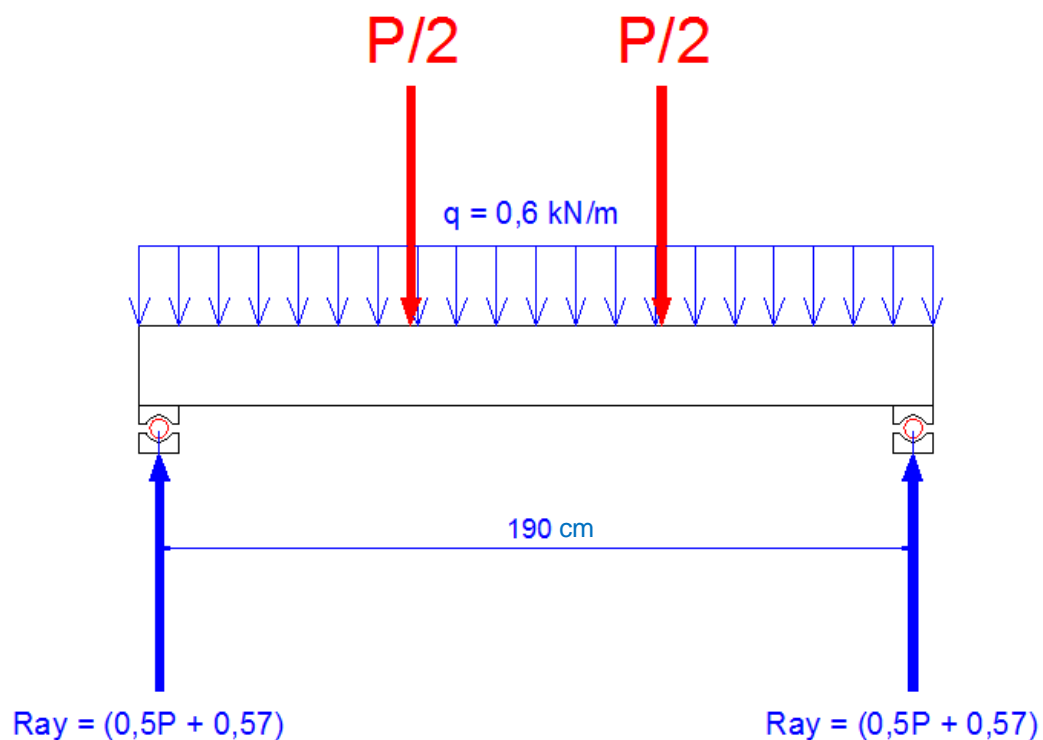
Tabela 1: Características das vigas em relação ao momento.

h (cm)	bw (cm)	x/d (cm)	d (cm)	x (cm)	As (cm ²)	Md (kN.m)	Mk (kN.m)
20	12	0,2893	17	4,91	1,6	7,97354	5,69539

Fonte: Michel Cararo Fernandes, 2015.

Considerando o posicionamento das cargas como mostrado na Figura 5, determinou-se os valores para a carga portante (característica e de cálculo) das vigas, $P_d = 24,93$ kN e $P_k = 17,61$ kN.

Figura 5: Posicionamento das cargas na viga.



Fonte: Michel Cararo Fernandes, 2015.

2.4.2 CÁLCULO DE CARGA PARA O GRUPO B

No cálculo das vigas do grupo B foi preciso definir um valor para a contribuição à resistência à flexão do reforço. Para isso foi adotado o método de dimensionamento à flexão com fibras de carbono usado por MACHADO³. Primeiramente foi determinada a deformação correspondente ao peso próprio da viga. Os valores referentes a esta etapa estão indicados na Tabela 3. O resumo das nomenclaturas adotadas pode ser visualizado na Tabela 2.

Tabela 2: Nomenclatura utilizada durante o cálculo.

Nomenclaturas	
Mg	Momento referente ao peso próprio da viga
Fs	Componente de tração no aço
fs	Resistência da tensão de tração no aço
ϵ	Deformação específica correspondente ao peso próprio
ϵ_{fc}	Deformação específica da fibra de carbono à tração
ffc	Resistência da tensão de tração na fibra de carbono
Ffc	Componente de tração na fibra de carbono
Mfc	Momento resisitido pela fibra de carbono

Fonte: Michel Cararo Fernandes, 2015.

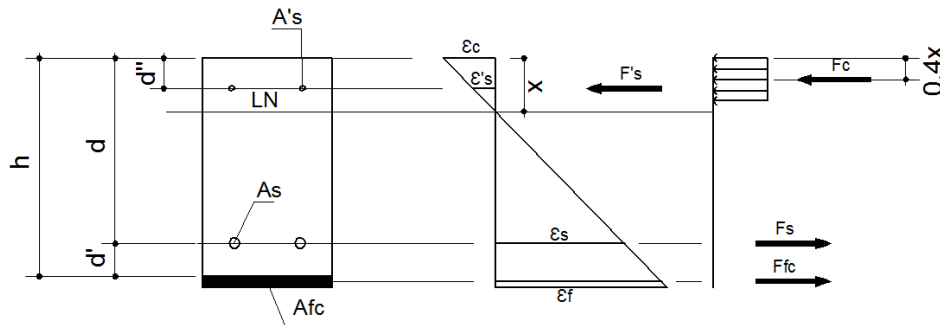
Tabela 3: Características das vigas em relação a deformação.

Mg	Z	Fs	fs	ϵ
(kN.m)	(cm)	(kg)	(kg/cm²)	(‰)
0,1425	15,04	94,75	59,22	0,028

Fonte: Michel Cararo Fernandes, 2015.

A Equação 1 foi usada para calcular o momento majorado com base nas resultantes de tração e compressão em relação ao ponto de aplicação do F_c , o posicionamento das resultantes podem ser visualizadas na Figura 6. As componentes no retângulo maior representam as resultantes normais de uma viga sem reforço, e a componente no quadro menor representa a contribuição do reforço no momento da viga.

Figura 6: Forças resultantes dos componentes estruturais da seção.



Fonte: Michel Cararo Fernandes, 2015.

Equação 1: Equação para cálculo do momento fletor.

$$M_{maj.} = F_s (d - 0,4x) + F'_s (0,4x - d'') + \phi F_f (h - 0,4x)$$

Fonte: Ari de Paula Machado, 2002.

Os valores encontrados para a força resultante da fibra de carbono estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Cálculo do momento com reforço (CFC).

ϵ_{fc} (%)	f_{fc} (kg/cm ²)	F_{fc} (kg)	M_{fc} (kN.m)	M_d (kN.m)	M_{total} (kN.m)
10,728	23601	4673	1,19	7,9735	9,16354

Fonte: Michel Cararo Fernandes, 2015.

Considerando o mesmo posicionamento de carga do grupo A, determinou-se valores para a carga portante (característica e de cálculo) $P_d = 28,15$ kN e $P_k = 20,11$ kN.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Os ensaios de resistência à compressão axial foram realizados no LMCC - Laboratório de Materiais de Construção Civil da UNESC aos 28 dias, os resultados obtidos para os corpos de provas podem ser visualizados na Tabela 5.

Tabela 5: Resultados da resistência à compressão axial dos corpos de prova.

Corpos de prova (28 Dias)	Resistência à compressão (MPa)
CP 01	18,7
CP 02	18,4
CP 03	19,1
CP 04	18,6
CP 05	17,9
Média	18,54
Desvio Padrão	0,44

Fonte: Michel Cararo Fernandes, 2015.

3.2 SLUMP-TEST

Para verificar a trabalhabilidade do concreto, foi realizado o *slump-test*. O ensaio apresentou o resultado de abatimento de aproximadamente 11 cm que pode ser visualizado na Figura 7. O resultado está de acordo com a NBR 6118⁷:2014, que permite uma variação entre 5 a 12 cm para uma consistência medianamente plástica.

Figura 7: Abatimento de cone - (A) Realização do *slump-test*, (B) Resultado.



Fonte: Michel Cararo Fernandes, 2015.

3.3 ENSAIO PILOTO

O ensaio piloto permitiu adequar o comprimento de ancoragem, evitando imprevistos nas fases posteriores. Foi possível analisar que a aderência entre a interface do reforço e a viga estava adequada, resistindo até o momento de ruptura da fibra.

3.4 CARREGAMENTO NO DESLOCAMENTO MÁXIMO PERMITIDO POR NORMA (L/250)

No ponto em que se atingiu o deslocamento máximo de 7,60 mm o grupo B apresentou acréscimo de aproximadamente 20% em relação ao grupo A, como mostra a Tabela 6. De acordo com Machado³ (2002, p.81) “foram documentados acréscimos variando entre 10% e 160%. Entretanto, se levarmos em considerações os conceitos de ductibilidade e de utilização de modo geral, esse intervalo se situa entre 05% e 40%.”

Tabela 6: Resultado do carregamento no deslocamento máximo.

GRUPO A			GRUPO B		
Vigas	Carga (KN)	Flecha (mm)	Vigas	Carga (KN)	Flecha (mm)
A1	32,04	7,60	B1	36,87	7,60
A2	31,09	7,60	B2	43,17	7,60
A3	35,22	7,60	B3	38,02	7,60
Média	32,78			39,35	
Desvio Padrão	2,16			3,35	

Fonte: Michel Cararo Fernandes, 2015.

3.5 CARREGAMENTO NA RUPTURA

No ponto de ruptura o grupo B apresentou capacidade portante em torno de 12% superior ao grupo A, como mostram os valores apresentados na Tabela 7.

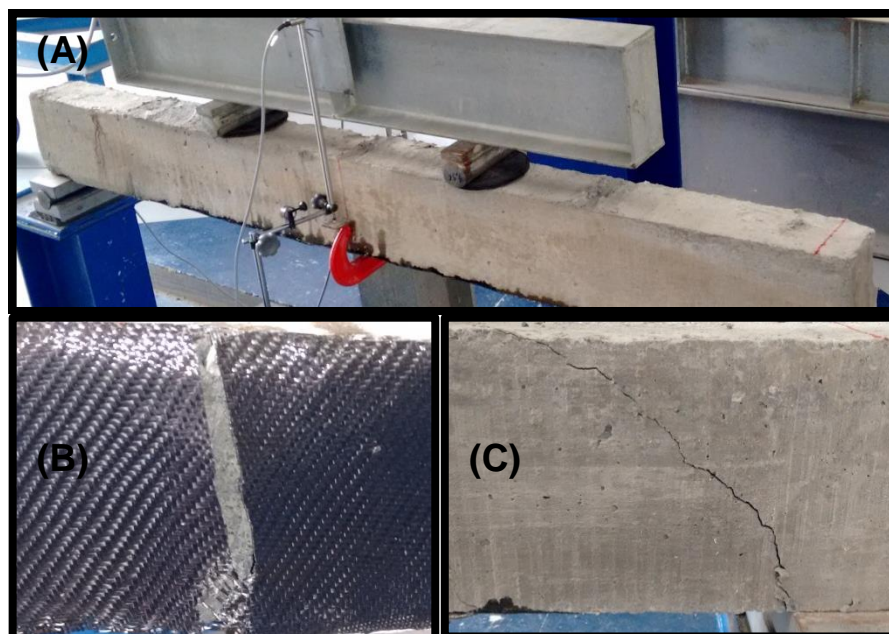
Tabela 7: Resultado do carregamento no ponto de ruptura.

Vigas	GRUPO A		Vigas	GRUPO B	
	Carga (KN)	Flecha (mm)		Carga (KN)	Flecha (mm)
A1	51,26	19,93	B1	56,08	22,72
A2	54,74	28,21	B2	56,76	15,37
A3	45,90	26,02	B3	57,56	18,29
Média	50,63	24,72		56,80	18,80
Desvio Padrão	4,45	4,29		0,74	3,70

Fonte: Michel Cararo Fernandes, 2015.

Apesar de pouca variação no carregamento entre os grupos, o grupo B atingiu um deslocamento 24% menor em relação ao grupo A. Durante os ensaios o grupo B só passou a apresentar fissuras de flexão após a ruptura do reforço com compósitos estruturados com fibra de carbono. Podemos visualizar na Figura 8 que duas vigas apresentaram início de fissuras de cisalhamento nas regiões próximas aos apoios.

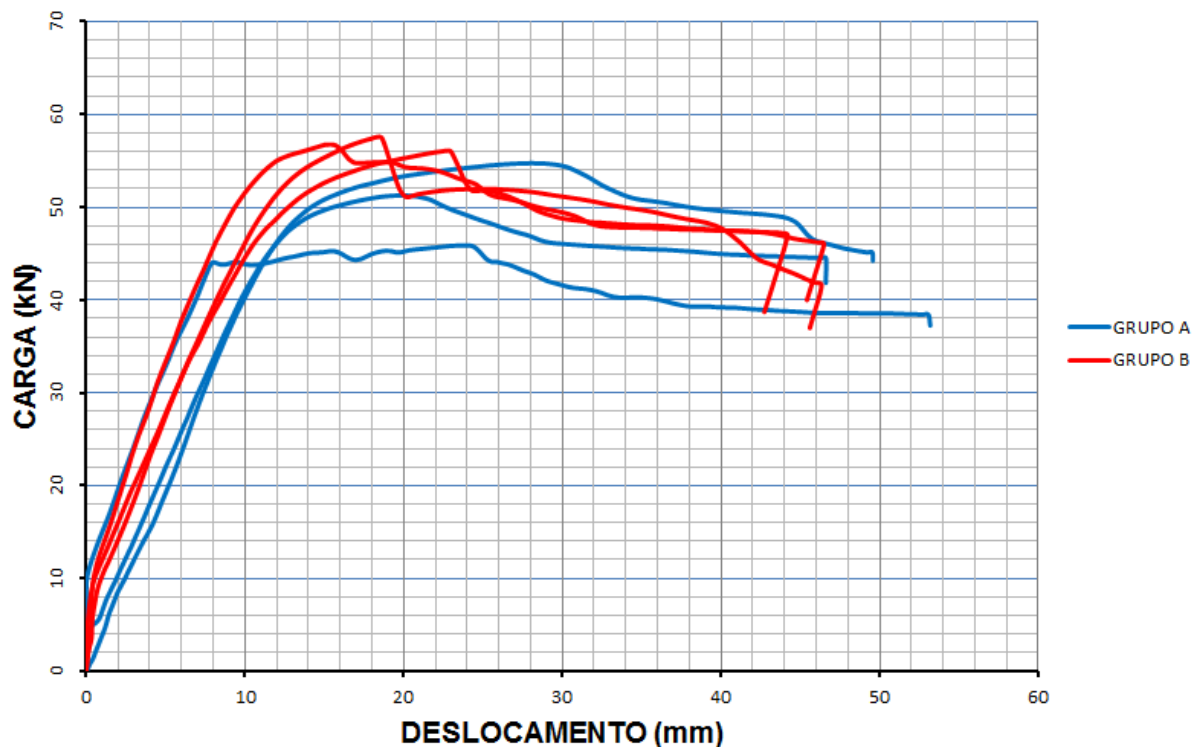
Figura 8: Ensaio das vigas do grupo B – (A) Viga sendo submetida ao ensaio de flexão em quatro pontos; (B) reforço rompido; (C) fissura de cisalhamento no apoio.



Fonte: Michel Cararo Fernandes, 2015.

O comportamento dos grupos pode ser comparado na Figura 9, que apresenta um gráfico mostrando o deslocamento vertical em relação à carga aplicada nas vigas. Podemos ainda observar que uma das vigas do grupo A teve um comportamento diferenciado do restante do grupo após o deslocamento de 7,60 mm, o que poderia levar ao aumento da diferença do percentual entre os grupos no momento de ruptura.

Figura 9: Gráfico do deslocamento vertical *versus* carregamento.

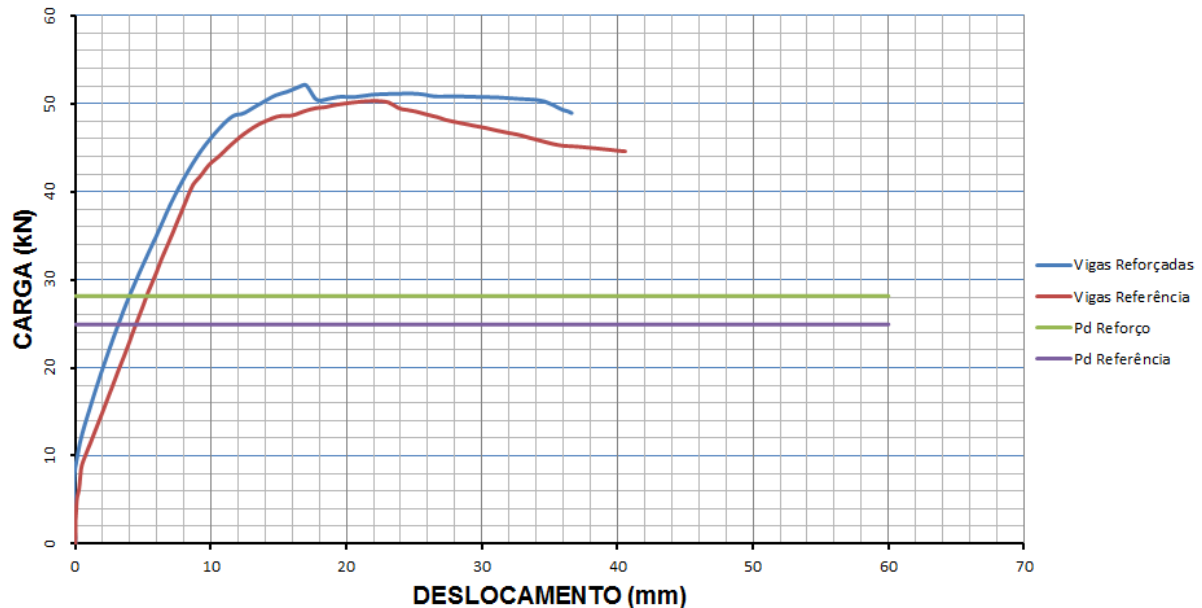


Fonte: Michel Cararo Fernandes, 2015.

3.6 ANÁLISE ENTRE CAPACIDADE DE CARGA CALCULADA E CAPACIDADE DE CARGA ENSAIADA

A Figura 10 mostra o gráfico comparando os valores de carga calculados e os valores de cargas ensaiados. Foi observado que os valores de cálculo mantem-se abaixo dos valores de serviço, ampliando a margem de segurança. No deslocamento máximo ($l/250$) o grupo A suportou cargas 31% superiores em relação à carga determinada por cálculo, e o grupo B atingiu cargas 39% maiores. Já no momento de ruptura o grupo A e B obtiveram valores superiores em 103% e 101% respectivamente.

Figura 10: Gráfico comparativo entre as cargas de cálculo e as cargas de serviço.



Fonte: Michel Cararo Fernandes, 2015.

Mesmo as cargas resistidas no deslocamento máximo permitido estão acima das cargas calculadas. A Tabela 8 mostra a porcentagem superior de carga que cada grupo resiste em nos momentos de ruptura e deslocamento máximo permitido.

Tabela 8: Tabela comparativa entre as cargas de cálculo e as cargas de serviço.

	Grupo A	Grupo B	Varição A	Varição B
Carga (I/250) (kN)	32,78	39,35	31,49%	39,79%
Carga Ruptura (kN)	50,63	56,80	103,10%	101,78%
Pd (kN)	24,93	28,15	-	-

Fonte: Michel Cararo Fernandes, 2015.

4. CONCLUSÕES

Ao finalizar o estudo concluímos:

- O ensaio piloto permitiu uma previsão correta do comportamento das vigas reforçadas e adequação da aplicação do reforço.

- A resina epóxi mostrou-se de fácil homogeneização e aplicação. Entretanto teve-se dificuldade para conseguir cortar as faixas de fibra de carbono nas dimensões corretas, por se tratar de um material maleável e de baixo peso específico. Foi necessária a marcação com fita das seções adequadas.
- Ao atingirem o deslocamento máximo de 7,60 mm, o grupo B apresentou 20% mais de capacidade portante quando comparado ao grupo A.
- No ponto de ruptura o grupo B suportou um carregamento 12% superior em relação ao grupo A, e apresentou um deslocamento vertical 24 % menor.
- As fissuras de flexão só tiveram início após o rompimento do reforço, antes disso era possível apenas visualizar fissuras de cisalhamento nos apoios das vigas.
- Tanto as cargas no deslocamento máximo admissível ($l/250$), quanto para o momento de ruptura, estão acima dos valores definidos por cálculo. Os grupos A e B suportaram respectivamente carregamentos 31% e 39% superiores no deslocamento de 7,60 mm e 103% e 101% superiores no momento de ruptura.

Sugere-se para futuros trabalhos:

- Um estudo viabilizando economicamente a aplicação do reforço CFC.
- Realizar experimentos utilizando o sistema de reforço apresentado no combate de esforços de cisalhamento.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

¹ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575: Edificações habitacionais - desempenho**. Rio de Janeiro, 2013.

⁶ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto - ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2007.

⁷ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto**. Rio de Janeiro, 2014.

⁸CARVALHO, Roberto Chust; FIGUEIREDO FILHO, Jasson Rodrigues de. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**. 3. ed. São Carlos: Editora da Universidade Federal de São Carlos, 2013. 367 p.

⁴ESCOBAR, Celcio José. **Avaliação do desempenho estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com lâminas de CFRP tensionadas.** 2003. 249 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

³MACHADO, Ari de Paula. **Reforço de estruturas de concreto armado com fibras de carbono:** características, dimensionamento e aplicação. São Paulo: Editora Pini Ltda, 2002. 271 p.

²SANTOS, Paulo Mascarenhas dos. **Comparação de reforço com chapas de aço e fibras de carbono em vigas de concreto armado submetidas à flexão simples.** 2008. 55 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Tecnologia, Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2008.

⁵SOUZA, Vicente Custódio Moreira de; RIPPER, Thomaz. **Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto.** São Paulo: Editora Pini Ltda, 1998. 255 p.