

RECUPERAÇÃO ESTRUTURAL DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO COLAPSADAS UTILIZANDO REFORÇO DE FIBRA DE CARBONO

Raí Scheffer Pereira (1), Daiane Dos Santos Da Silva Godinho (2)

UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense
(1) raí_s.pereira@hotmail.com, (2) dss@unesc.net

RESUMO

O reforço estrutural utilizando fibra de carbono, quando bem dimensionado e executado, pode recuperar a capacidade portante de vigas de concreto armado que já atingiram o colapso por esforços de flexão, em casos de sobrecarga excessiva, acidentes naturais, sinistros ou outras circunstâncias de utilização. Nesse contexto, esse estudo tem por objetivo avaliar experimentalmente a recuperação da capacidade portante de vigas já colapsadas por flexão, que receberam reforço com fibra de carbono na face tracionada. Foram confeccionadas três vigas, de mesmas dimensões e armaduras, e submetidas ao ensaio de flexão à quatro pontos até a ruptura, avaliando-se a carga para atingir o deslocamento máximo permitido pela NBR 6118:2014 (L/250) e carga máxima no momento do colapso. Na sequência foi realizado o dimensionamento teórico para o reforço utilizando um compósito a base de resina epóxi e fibra de carbono na região de maior solicitação de tração para atender os esforços obtidos no ensaio. Após a execução e atingindo o tempo de cura do reforço, todas as vigas foram novamente submetidas ao mesmo ensaio. Como resultado verificou-se que as vigas não só recuperaram suas capacidades portantes, como às aumentaram em média 1,75% na carga resistente no deslocamento máximo (L/250) e em 5,31% na carga de ruptura.

Palavras-chave: Fibra de carbono; Reforço; Recuperação estrutural.

1 INTRODUÇÃO

O envelhecimento e a degeneração das estruturas de concreto armado constituem-se em um processo natural e inevitável. Tais estruturas têm quando da sua idealização, a perspectiva de um determinado tempo de vida útil em função da finalidade e da forma de utilização. (RELVAS, 2003, p. 1). Quando esta estrutura é alterada de sua proposição inicial (acréscimo de solicitações não previstas originalmente), por exemplo, há o risco de sobrecarregamento e colapso. Dentre os esforços que atuam

em vigas e que contribui para esse desgaste, há o esforço de flexão, causado pelo momento fletor. (NBR 15575, 2013 p.7).

A partir do momento em que a estrutura atinge o seu estado limite último e ocorre o rompimento, uma das alternativas possíveis para evitar a demolição é a recuperação desta estrutura. Para tal recuperação, é necessário um estudo para avaliar quais providências que precisam ser tomadas, ou seja, qual tipo de recuperação a ser adotada. Hoje em dia pode-se recuperar uma estrutura de diferentes formas, como por exemplo utilizando chapas e perfis metálicos, complementação ou adição de armadura, utilização de polímeros reforçados com diferentes fibras, etc.

Contudo, embora os sistemas “clássicos” de reforço permitissem responder de forma positiva a muitas das necessidades existentes, a introdução do compósito fibra de carbono/resina epóxi na engenharia de estruturas produziu uma alteração radical na abordagem aos problemas de reforço de estruturas. As suas propriedades mecânicas e físicas muitíssimo superiores aos materiais convencionais oferecem assim um novo caminho à engenharia de estruturas. (CARVALHO, 2011 p. 3).

A crescente utilização do reforço estrutural utilizando polímeros reforçados com fibra de carbono mostra que esta alternativa de recuperação vem mostrando resultados quanto às necessidades e incentiva o estudo e ao desenvolvimento de aprimoramentos utilizando este método.

O reforço de vigas com este elemento vem tendo grande aplicação, principalmente pela facilidade de aplicação e bom desempenho, apesar de custo ainda significativo. Esta necessidade ocorre em geral pela alteração de utilização do sistema estrutural e com aumento no carregamento. Eventualmente erros de concepção da estrutura também podem levar a necessidade de reforços. (RELVAS, 2003, p. 2).

Algumas características que fizeram o PRFC (Polímero Reforçado com Fibra de Carbono) ser implantado na construção civil como material de reforço estrutural são o seu baixo peso, acrescentando uma quantidade insignificante de peso morto à estrutura; material não corrosivo, garantindo durabilidade e pouca manutenção; pouca espessura, facilitando a ocultação do reforço; facilidade de instalação, economizando tempo. (MACHADO, 2006, p. 20). Para o estudo deste trabalho foram utilizadas três vigas de concreto armado, com seção transversal de 15x25 cm e 315 cm de comprimento, submetendo-as ao ensaio de flexão. Posteriormente, determinou-se um

reforço de PRFC para estas vigas, denominadas V11, V12 e V13, sendo aplicado este reforço em toda região tracionada das peças e ensaiado novamente à flexão, sendo este o ponto de análise do presente trabalho, portanto todo o procedimento de recuperação estrutural ocorreu neste estudo.

Como objetivos específicos, esta pesquisa se propôs: (a) cálculo e determinação do reforço utilizando o sistema de compósitos estruturados com fibra de carbono (PRFC); (b) ensaio de flexão em todas as vigas de referência e nas vigas reforçadas após colapso; (c) análise da eficiência e da resistência proveniente do reforço; (d) fazer análise estatística dos dados obtidos nos ensaios (ANOVA), a fim de verificar se existe diferença estatística entre os resultados.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A fase experimental se iniciou analisando o comportamento das vigas sem o reforço (vigas de referência) até a ruptura.

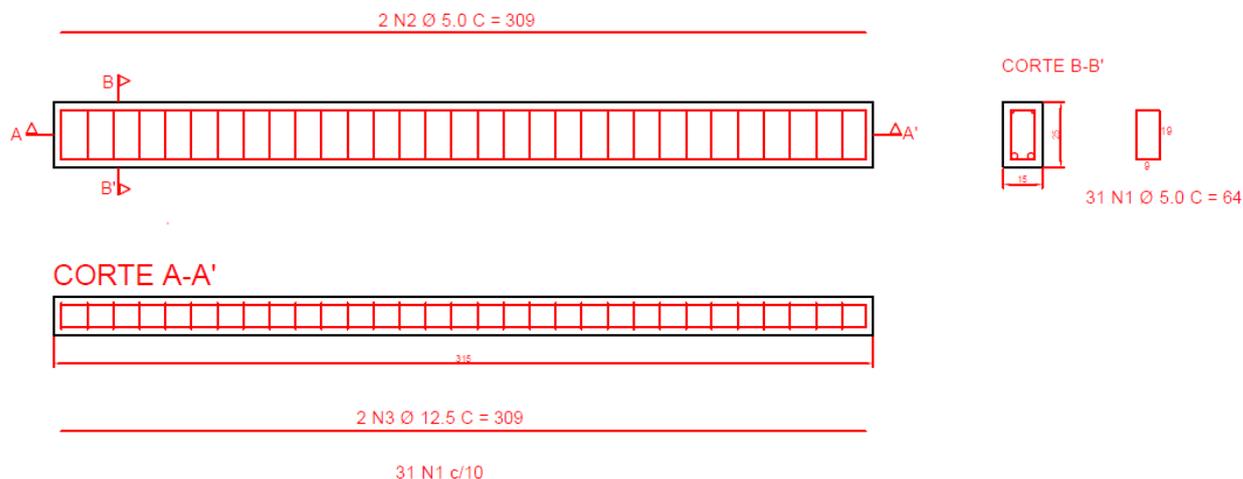
Foram confeccionadas três vigas de concreto armado, utilizando concreto C20 usinado, denominadas V11, V12 e V13. Tais vigas possuíam dimensões 15x25 cm na seção transversal e 315 cm de comprimento. Foi utilizado \varnothing 12,5 mm (CA50) na armadura de flexão e \varnothing 5,0 mm (CA60) na armadura de cisalhamento. Realizou-se uma análise do fator x/d e constatou-se que com as dimensões adotadas e com apenas a carga do peso próprio atuante as vigas apresentaram $x/d = 0,4048$, o que as classificam no domínio 3 (três) de deformações. Para o dimensionamento dos estribos, foi utilizado o modelo 1 de cálculo disposto na NBR 6118:2014, adotando-se ângulos de inclinação dos estribos de 90 graus e ângulos de inclinação das bielas de compressão de 45 graus. Para todas as vigas estudadas o espaçamento dos estribos foi de 10 cm.

Em um primeiro momento foi estudado o comportamento das vigas de referência, até a ruptura, servindo como base para o desenvolvimento seguinte.

Após o ensaio que levou as vigas de referência à ruptura, a segunda etapa foi a recuperação propriamente dita, sendo realizado um dimensionamento com referência no Manual de Dimensionamento desenvolvido pela Exata Engenharia e Assessoria S/C Ltda, na qual o dimensionamento do reforço é feito com base nos conceitos do

estado limite último. (RELVAS, 2003). Na figura 1 pode-se verificar o detalhamento de todas as vigas estudadas.

Figura 1: Detalhamento de armaduras em todas as vigas



Fonte: Autor, 2016.

2.1 MATERIAIS

2.1.1 FABRICAÇÃO DAS VIGAS

Foram concretadas todas as vigas simultaneamente, além de nove corpos de prova, como mostrado nas figuras 2 e 3. Foi utilizado ainda vibrador de imersão e para o acabamento esponjas e colher de pedreiro. Como indicado na NBR 6118:2014 para classe de agressividade ambiental II, utilizou-se espaçadores para garantir o correto posicionamento e o cobrimento das armaduras.

Figura 2: (A) Fôrmas e armaduras posicionadas; (B) Concretagem



Fonte: Autor, 2016.

Figura 3: (A) Moldagem dos corpos de prova; (B) Vigas concretadas



Fonte: Autor, 2016.

2.1.2 MATERIAIS CONSTITUINTES: RESINA EPÓXI E FIBRA DE CARBONO

2.1.2.1 RESINA EPÓXI

De acordo com o fabricante (Silaex), as resinas epóxi líquidas são muito utilizadas em laminados de fibras sintéticas como de vidro, carbono e kevlar e também com naturais tipo juta, sisal, algodão, etc. Devido a sua alta resistência mecânica e química, ela é utilizada em laminados especiais onde as resinas convencionais de laminação, como os poliésteres insaturados, não atendem o necessário. São muito utilizadas em

tubulações, tanques, aeronaves, embarcações, veículos de alta performance, artigos esportivos, revestimentos especiais, etc.

O produto utilizado neste estudo é transparente, indicado para laminados de fibra de vidro, carbono e aramida (Kevlar), de cura ambiente. A resina epóxi inicia sua cristalização dependendo do seu grau de pureza, viscosidade, teor de umidade e temperatura ambiente. O tempo de pega e início da primeira “semente” cristalizada é de 18 minutos, sendo um produto de vantagens como fácil impregnação na aplicação, boa adesão, alta dureza e resistência à abrasão, alta isolamento, etc.

Foi misturado junto à resina um endurecedor à base de poliamina, que promove uma melhor adesão e boa resistência térmica, química e mecânica com baixa exotermia, possuindo boa solubilização na resina com proporções não críticas, permitindo cura homogênea com boa velocidade e propriedades finais bastante controláveis. A seguir na figura 4 pode-se verificar a resina e o endurecedor utilizados para esta pesquisa.

Figura 4: Resina epóxi e endurecedor utilizados



Fonte: Autor, 2016.

2.1.2.2 FIBRA DE CARBONO

As fibras de carbono resultam do tratamento térmico (carbonização) de fibras precursoras orgânicas, tais como o poliácridonitril (PAN) ou com base no alcatrão derivado do petróleo ou do carvão (PITCH) em um ambiente inerte. O processo de

produção consiste na oxidação dessas fibras precursoras seguido do processamento a elevadas temperaturas (variando de 1000 °C a 1500 °C). Nesse processo térmico, as fibras resultantes apresentam os átomos de carbono perfeitamente alinhados ao longo da fibra precursora, característica que confere extraordinária resistência mecânica ao produto final. (MACHADO, 2002 p. 29).

Foram utilizadas nesta pesquisa 10 tiras bidirecionais de fibras de carbono com medidas de 130x10 cm, sendo estas as máximas dimensões disponibilizadas pelo fabricante. Como as fibras disponibilizadas apenas possuíam dimensão de largura de 10 cm, houve a necessidade de cortar algumas fibras em suas metades para que a aplicação do reforço cobrisse a totalidade de 15 cm de base das vigas, não havendo traspasse de fibra nesta direção. Na figura 5 pode-se verificar a fibra utilizada neste estudo, e na figura 6 as características do compósito consideradas para a pesquisa.

Figura 5: Fibra de Carbono utilizada



Fonte: Autor, 2016.

Figura 6: Quadro de características do compósito

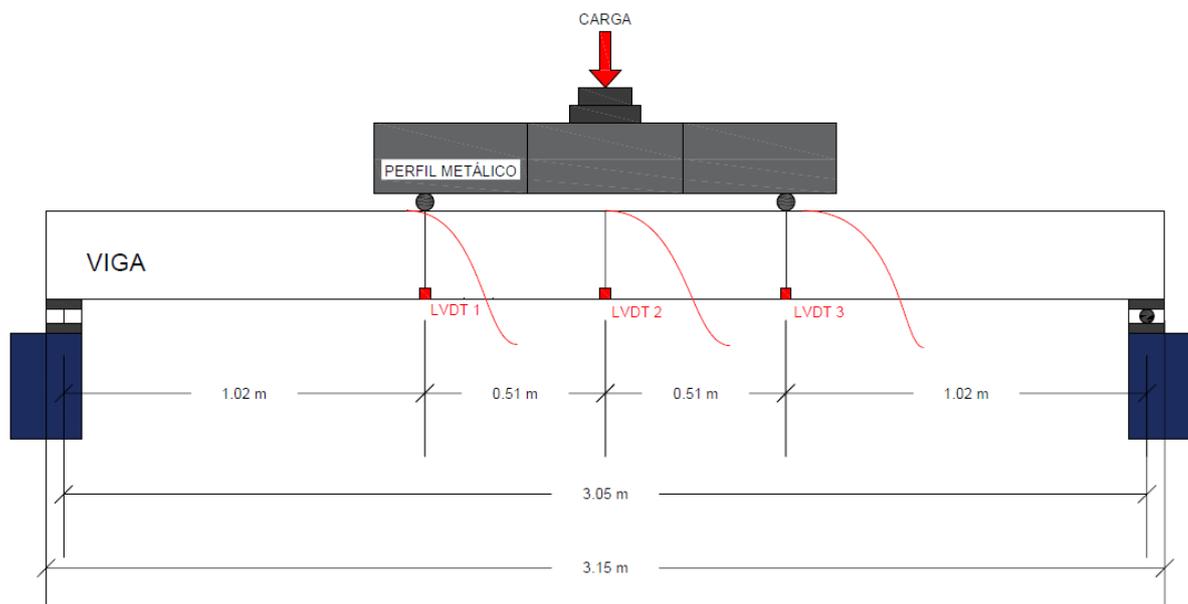
Características do Compósito (Fibra de Carbono + Resina Epóxi)	
Resistência à Tração	3500 MPa
Módulo de Elasticidade	266 Gpa
Espessura de 01 camada	0,38 mm

Fonte: Autor, 2016.

2.2 MÉTODOS

Para a realização dos ensaios, utilizou-se das instalações do LEE (Laboratório Experimental de Estruturas) da Unesc, localizado no Iparque. O equipamento utilizado consta de um pórtico metálico equipado de um cilindro hidráulico, com capacidade de 500 KN e uma célula de carga acoplada na base. Para coletar os dados referentes aos deslocamentos foram utilizados para todos os ensaios três transdutores de deslocamentos (LVDT), utilizando um no centro da viga e os outros dois nos terços médios de cada lado. Os equipamentos foram conectados ao sistema de aquisição de dados Quantum X®, que utiliza o software Catman Easy®. O cilindro hidráulico aplicava a carga no centro de um perfil metálico de 0,3 KN, que por sua vez transferia a carga para dois pontos também localizados nos terços das vigas. A figura 7 mostra a descrição do equipamento utilizado para todos os ensaios.

Figura 7: Equipamento para o ensaio de flexão à 4 pontos



Fonte: Autor, 2016.

2.2.1 ENSAIO DE FLEXÃO NAS VIGAS DE REFERÊNCIA

A desforma das vigas ocorreu aos 28 dias, e logo após foram transportadas para o LEE (Laboratório Experimental de Estruturas) para a realização dos ensaios. Nestes ensaios teve-se como objetivos obter a ruptura do concreto e a danificação das estruturas, para que assim o procedimento de recuperação fosse possível de ser estudado. Foram ainda analisados cargas obtidas no deslocamento máximo permitido por norma ($L/250$) e carga de ruptura, para que esses valores servissem de parâmetro para comparações futuras. No instante em que as vigas atingiram seus estados de ruptura e assim por diante houve decréscimo do valor de carga no equipamento, o mesmo foi desligado e o ensaio concluído, não havendo grande escoamento da armadura. A figura 8 a seguir mostra o ensaio citado.

Figura 8: (A) Viga pronta para ensaio; (B) Viga sendo ensaiada até o colapso



Fonte: Autor, 2016.

Após esta etapa, as vigas de referência rompidas foram armazenadas no interior do laboratório à temperatura ambiente, como mostra a figura 9.

Figura 9: Armazenagem das vigas rompidas



Fonte: Autor, 2016.

2.2.2 DETERMINAÇÃO DO REFORÇO

Com os dados dos ensaios nas vigas de referência, pôde-se obter o momento máximo que cada viga resistiu, através de sua respectiva carga de ruptura, e a partir dele poder saber qual a quantidade necessária de reforço para absorção deste esforço.

2.2.3 CÁLCULO DO REFORÇO

Para o cálculo do reforço necessário, foi utilizado o método de dimensionamento de Relvas, como descrito na apostila Manual de Reforço de Vigas de Concreto Armado à Flexão com Fibra de Carbono, seguindo determinações da ACI - 440. Com a carga de ruptura máxima obtida em cada uma das vigas, obteve-se o momento fletor correspondente, e logo determinou-se a posição da linha neutra, como mostrado na equação 1. A seguir tem-se todo o desenvolvimento do cálculo para determinação do reforço.

$$Md = bw \cdot 0,85 \cdot fcd \cdot x \cdot (d - 0,5x)$$

Equação (1)

Onde:

Md = Momento fletor de cálculo (KN.cm)

bw = Largura da seção transversal da viga (cm)

fcd = Resistência de cálculo do concreto (KN/cm²)

x = Posição da linha neutra (cm)

d = Altura útil (cm)

	Md	x
VIGA 11	3784,20 KN.cm	11,1891 cm
VIGA 12	3831,80 KN.cm	11,4094 cm
VIGA 13	3861,20 KN.cm	11,5480 cm

Com o valor da linha neutra, obtém-se na equação 2 a força cortante resistida pelo concreto na seção.

$$Rcd = 0,85 \cdot fcd \cdot bw \cdot x$$

Equação (2)

Onde:

Rcd = Força cortante resistida pelo concreto na seção transversal (KN)

fcd = Resistência de cálculo do concreto (KN/cm²)

bw = Largura da seção transversal da viga (cm)

	Rcd
VIGA 11	203,80 KN
VIGA 12	207,81 KN
VIGA 13	210,34 KN

Em seguida determinou-se a tensão de tração no aço, conforme equação 3.

$$\sigma S = \frac{Rcd}{A_s}$$

Equação (3)

Onde:

σ_s = Tensão de tração no aço (KN/cm²)

Rcd = Força cortante resistida pelo concreto na seção transversal (KN)

A_s = Área de aço da armadura de flexão (cm²)

	σ_s
VIGA 11	70,30 KN/cm ²
VIGA 12	71,66 KN/cm ²
VIGA 13	72,53 KN/cm ²

Com os resultados da tensão de tração do aço, calculou-se sua deformação específica, como descrito na equação 4.

$$\varepsilon_s = \frac{\sigma_s}{E}$$

Equação (4)

Onde:

ε_s = Deformação específica do aço (%/100)

σ_s = Tensão de tração no aço (KN/cm²)

E = Módulo de elasticidade do aço (GPa)

	ε_s
VIGA 11	3,35 x 10 ⁻³
VIGA 12	3,41 x 10 ⁻³
VIGA 13	3,45 x 10 ⁻³

Na sequência, calculou-se a deformação específica da fibra pela equação 5. Devido à sua deformação, acrescenta-se 20% ao valor do **x**.

$$\varepsilon_t = \varepsilon_s \cdot \frac{(h-x)}{(d-x)}$$

Equação (5)

Onde:

ε_t = Deformação específica da fibra de carbono (%/100)

ε_s = Deformação específica do aço (%/100)

h = Altura da seção transversal da viga (cm)

x = Posição da linha neutra (cm)

d = Altura útil (cm)

	x	ε_t
VIGA 11	13,4269 cm	3,35 x 10-3
VIGA 12	13,6913 cm	3,41 x 10-3
VIGA 13	13,8576 cm	3,45 x 10-3

A seguir determinou-se a tensão de tração no compósito PRFC pela equação 6.

$$F_f = E_f \cdot \varepsilon_t$$

Equação (6)

Onde:

F_f = Tensão de tração no compósito PRFC (KN/cm²)

E_f = Módulo de elasticidade do compósito PRFC (GPa)

ε_t = Deformação específica da fibra de carbono (%/100)

	F_f
VIGA 11	129,81 KN/cm ²
VIGA 12	133,50 KN/cm ²
VIGA 13	128,74 KN/cm ²

O próximo passo é o cálculo da área de fibra para a largura necessária, descrito na equação 7.

$$A_f = \frac{M_d - A_s \cdot f_{yd} \cdot (d - 0,5 \cdot x)}{F_f \cdot (h - 0,5 \cdot x)} \quad \text{Equação (7)}$$

Onde:

M_d = Momento fletor de cálculo (KN.cm)

A_s = Área de aço da armadura de flexão (cm²)

f_{yd} = Resistência do aço à tração (KN/cm²)

d = Altura útil (cm)

x = Posição da linha neutra (cm)

F_f = Tensão de tração no compósito PRFC (KN/cm²)

h = Altura da seção transversal da viga (cm)

Com o valor da área de fibra A_f , faz-se a divisão desta área pela espessura de uma camada do compósito PRFC, e tem-se a largura necessária.

	A_f	Largura necessária
VIGA 11	0,71 cm ²	18,75 cm
VIGA 12	0,72 cm ²	18,96 cm
VIGA 13	0,76 cm ²	20,14 cm

Como as vigas possuíam 15 cm de base, para a determinação da quantidade de camadas faz-se a divisão da largura necessária pela b_w da viga, como mostrado na equação 8.

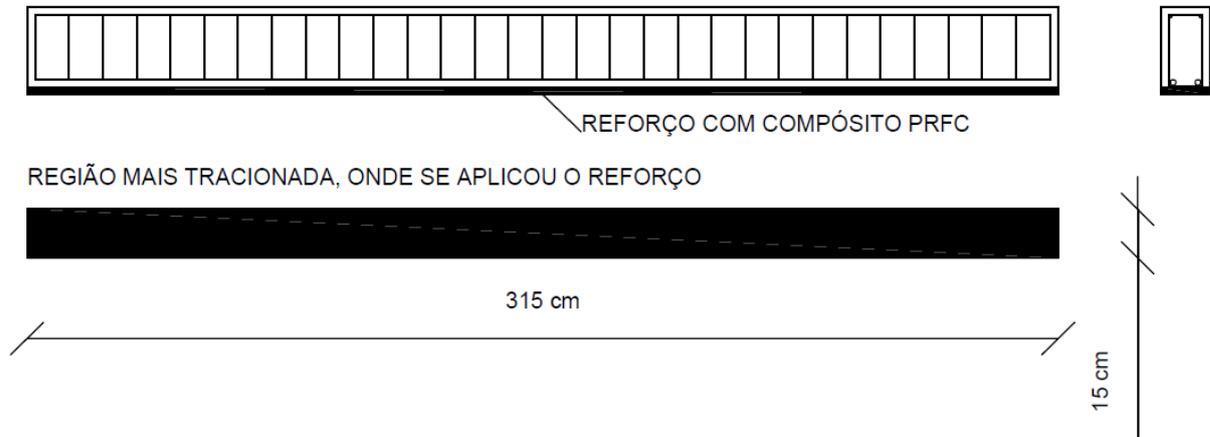
$$N^{\circ} \text{ CAMADAS} = \frac{\text{Largura necessária calculada}}{b_w} \quad \text{Equação (8)}$$

De acordo com as análises descritas, foi determinado para todas as vigas em estudo a necessidade de uma camada do reforço PRFC para a absorção dos esforços solicitantes.

2.2.4 APLICAÇÃO DO REFORÇO PRFC

Com a determinação da quantidade de camadas, o seguinte passo foi a aplicação do reforço. Neste estudo, toda a região tracionada da viga foi reforçada, aplicando-se o reforço em toda largura e em todo o comprimento das vigas, como mostrado na figura 10. A instalação do reforço inicia-se com a limpeza da região onde se deseja aplicar o reforço, para garantir uma superfície livre de impurezas e de melhor aderência. O processo foi realizado com escova e lixa. Em seguida, foi feita a mistura da resina epóxi e do endurecedor e aplicado uma primeira demão, como mostrado na figura 11, sendo feita na proporção 100% de resina para 50% de endurecedor, conforme recomenda o fabricante. Após esta homogeneização, a mistura tem aproximadamente 18 minutos para que se inicie o processo de polimerização, logo dentro deste prazo foi realizada a aplicação da mistura nas peças de concreto. A aplicação foi feita com pincel e rolo plástico. Em seguida foram posicionadas as fibras longitudinalmente, sendo transpassadas uma sobre a outra 5 cm para garantir o travamento e aderência do reforço. De acordo com a ACI-440, é aconselhado fazer traspasse das fibras entre 50 mm e 100 mm para garantir a aderência (depende do tipo de fibra ou conforme especificações de projeto). Após o posicionamento foi passado mais uma demão da mistura sobre as fibras, selando o sistema e formando o compósito PRFC como mostrado na figura 12.

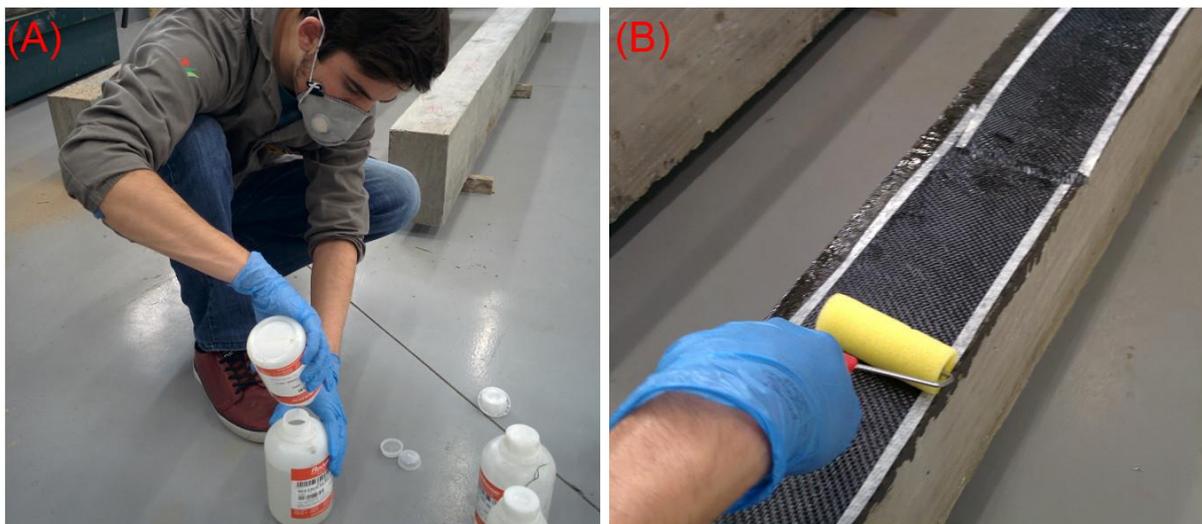
Figura 10: Esquema de reforço



Fonte: Autor, 2016.

O tecido foi cuidadosamente pressionado com o pincel e rolo plástico para forçar a impregnação. Após 5 dias, a cura total deve acontecer e a peça já pode sofrer agressões químicas e/ou mecânicas, de acordo com catálogo disponibilizado pelo fabricante.

Figura 11: (A) Mistura do endurecedor com a resina epóxi; (B) Aplicação do reforço



Fonte: Autor, 2016.

Figura 12: Vigas reforçadas



Fonte: Autor, 2016.

2.2.5 ENSAIO DE FLEXÃO NAS VIGAS REFORÇADAS APÓS COLAPSO

Após as vigas serem reforçadas como descrito anteriormente, foi realizado no LEE (Laboratório Experimental de Estruturas) um novo ensaio de flexão para estas vigas nestas condições. Teve-se o mesmo critério dos primeiros ensaios, sendo verificado a carga no deslocamento máximo permitido, além da carga de ruptura, como mostrado nas figuras 13.

Figura 13: (A) Ensaio em viga colapsada e reforçada; (B) Fissura na viga colapsada e reforçada



Fonte: Autor, 2016.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO AXIAL, COMPRESSÃO DIAMETRAL E MÓDULO DE ELASTICIDADE

Os resultados obtidos indicam que aos 28 dias, o concreto atingiu a resistência esperada em todos os exemplares, sendo um resultado bastante satisfatório. Além dos resultados das Resistências à Compressão Axial, os resultados da Resistência à Tração por Compressão Diametral e Módulo de Elasticidade se dispõem na figura 14.

Figura 14: Tabela para resultados dos ensaios nos corpos de prova

Amostra	Resistência à Compressão Axial (MPa) - 28 dias	Tração por Compressão Diametral (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)
CP 1	21,9	2,6	34,33
CP 2	21,8	2,6	30,06
CP 3	22,4	2,7	30,2
Média	22,02	2,6	31,53
Desvio Padrão	0,31	0,1	2,42

Fonte: Autor, 2016.

3.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE FLEXÃO À 4 PONTOS

Como forma de diferenciar as vigas rompidas inicialmente e as vigas reforçadas com fibra de carbono após o colapso, adotou-se uma nomenclatura conforme descrita na figura 15.

Figura 15: Nomenclatura adotada

V	Vigas de referência
VR	Vigas reforçadas após colapso

3.2.1 RESULTADOS DAS VIGAS NO DESLOCAMENTO MÁXIMO (L/250)

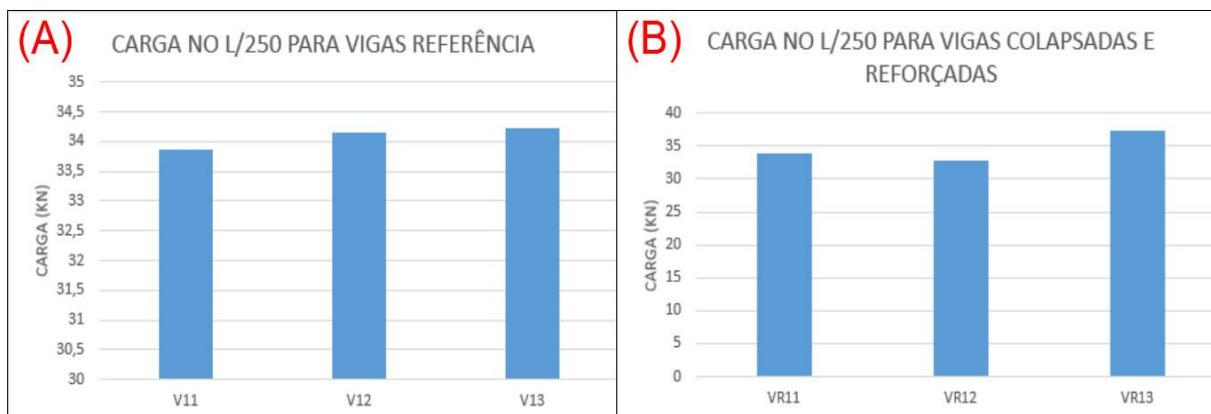
Observou-se no deslocamento máximo permitido pela NBR 6118:2014 (L/250) que as vigas de referência (V) suportaram em média 34,08 KN. Já as vigas recuperadas (VR) resistiram em média 34,69 KN. Devido à resistência da fibra de carbono à tração e a capacidade deste material absorver tais tensões, constatou-se que as vigas reforçadas após o colapso apresentaram uma completa recuperação, obtendo uma deformação praticamente igual ao estado anterior às suas rupturas, tendo ainda elevando em média suas resistências. Na figura 16 a seguir pode-se verificar as cargas obtidas no deslocamento máximo por norma L/250 (12,20 mm). A figura 17 faz a comparação de cargas no deslocamento (L/250) entre vigas de referência e vigas que receberam o reforço após o colapso.

Figura 16: Tabela com carga e deslocamento máximo permitido por norma (L/250) atingidos nos ensaios

VIGA	CARGA (KN)	DESLOCAMENTO (mm)
V11	33,86	12,09
V12	34,16	12,02
V13	34,22	12,07
VR11	33,97	12,16
VR12	32,73	12,09
VR13	37,36	12,08

Fonte: Autor, 2016.

Figura 17: (A) Carga ao atingir deslocamento máximo permitido para vigas referência; (B) Carga ao atingir deslocamento máximo permitido para vigas reforçadas após colapso



Fonte: Autor, 2016.

De acordo com a figura 17, apurou-se que a viga 11 teve uma excelente recuperação na sua capacidade portante no instante que atinge o deslocamento máximo por norma. Já a viga 12 teve um decréscimo na carga resistida; a viga 13 obteve um acréscimo significativo, entretanto manteve-se semelhante sua deformação máxima.

Para verificar se os valores de carga no momento do deslocamento máximo permitido (L/250) são diferentes, aplicou-se uma análise estatística de variância (ANOVA), com nível de confiança de 95%, ou seja, para um fator significativo deve-se obter $p_{value} \geq 0,05$. A figura 18 descreve os resultados obtidos no ANOVA, onde pode-se analisar que os valores obtidos nos ensaios das vigas V e das vigas VR são estatisticamente iguais, com $p_{value} = 0,68$, tendo ainda fator $F < F_{crítico}$, comprovando a semelhança entre as amostras.

Figura 18: Teste ANOVA para carregamento no L/250

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
V	3	102,24	34,08	0,0372		
VR	3	104,06	34,68667	5,744433		
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,552067	1	0,552067	0,190973	0,684665	7,708647
Dentro dos grupos	11,56327	4	2,890817			
Total	12,11533	5				

Fonte: Autor, 2016.

3.2.2 RESULTADOS DAS VIGAS NA CARGA DE RUPTURA

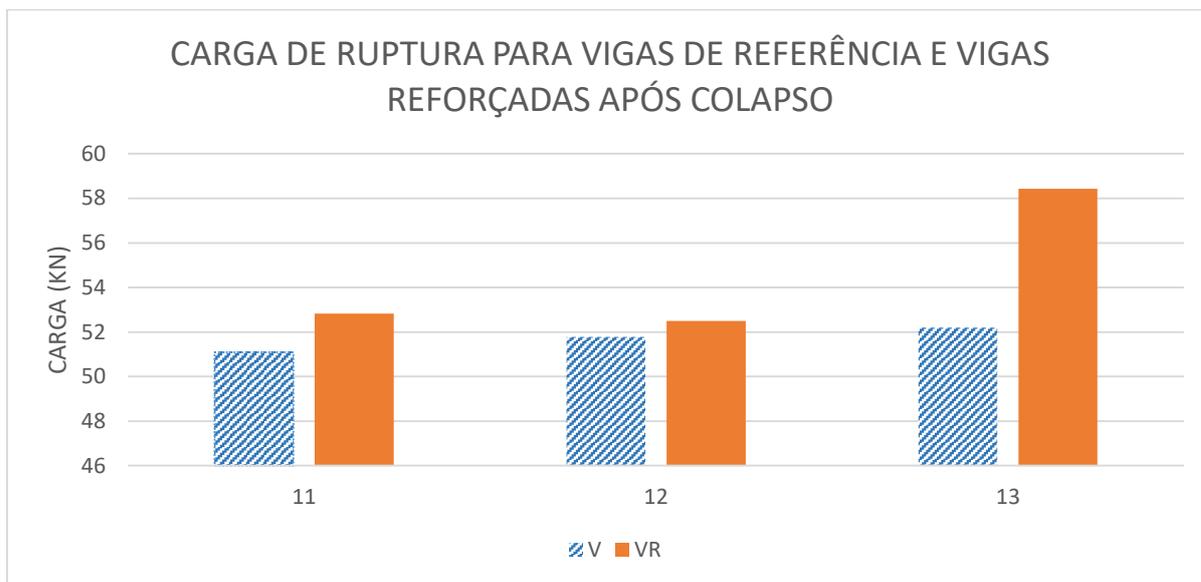
Como pode-se verificar na figura 19, as vigas recuperadas com o reforço de PRFC obtiveram sua reabilitação muito positiva, superando as cargas de ruptura em comparação com as mesmas antes dos seus respectivos colapsos, comprovando que a quantidade de camadas foi satisfatória para suportar as solicitações. Observou-se visualmente que a aderência entre o reforço e o concreto em determinadas regiões não ocorreu perfeitamente, devido a imperfeições na superfície de aplicação, porém foi um fato que não contribuiu para a resistência esperada, fazendo com que o compósito trabalhasse com eficiência. Para os valores obtidos na carga de ruptura, acrescentou-se 0,65 KN referentes aos pesos da estrutura de ensaio, como perfil metálico e apoios metálicos.

Figura 19: Resultados para cargas máximas obtidas e respectivos deslocamentos para vigas de referência e vigas reforçadas após colapso

CARGA DE RUPTURA E DESLOCAMENTO PARA VIGAS DE REFERÊNCIA E VIGAS REFORÇADAS APÓS COLAPSO		
	CARGA (KN)	DESLOCAMENTO (mm)
V11	50,45	21,84
V12	51,13	21,73
V13	51,54	33,17
VR11	52,18	27,86
VR12	51,85	27,15
VR13	57,78	24,58

Fonte: Autor, 2016.

Figura 20: Comparação de resistências na carga de ruptura para vigas V e VR

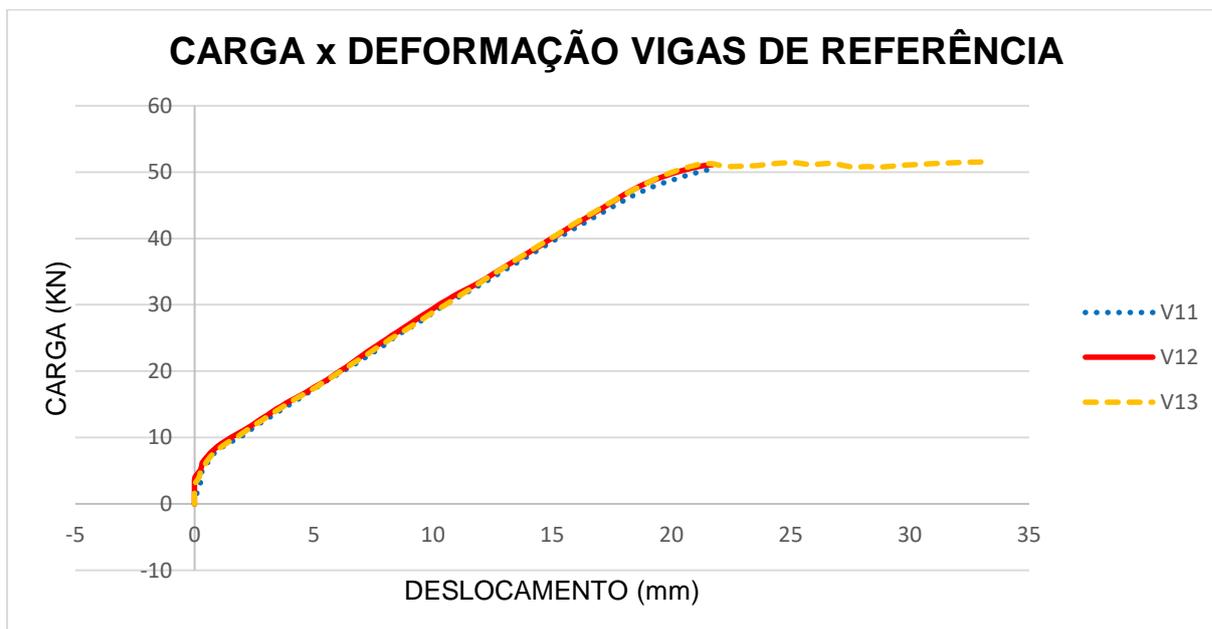


Fonte: Autor, 2016.

3.2.2.1 VIGAS DE REFERÊNCIA (V)

Na figura 21 pode-se verificar os resultados obtidos no carregamento máximo suportado pelas vigas de referência antes da ruptura, na qual em média resistiram 51,69 KN. Nota-se que as vigas 11 e 12 atingiram um comportamento muito semelhante, ocorrendo a ruptura com o carregamento muito próximo um do outro. Porém a viga 13 apresentou um comportamento um pouco distinto. A sua carga resistida e deformação acompanharam a atuação das outras, porém a partir do instante na deformação em 22 mm ocorreu um decréscimo da carga no equipamento, devido a acomodação do concreto. Apenas no instante da deformação em 24 mm, ocorreu um novo aumento de carga e assim mantendo até a ruptura do concreto e consequentemente o colapso definitivo.

Figura 21: Carga de ruptura nas vigas de referência (V)



Fonte: Autor, 2016.

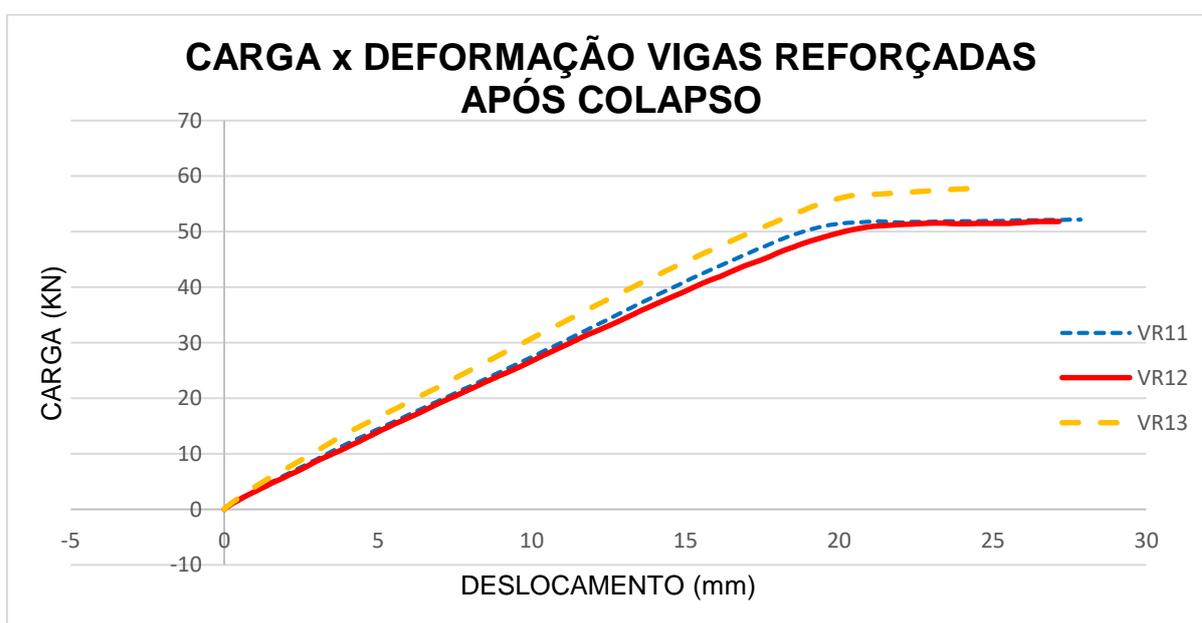
3.2.2.2 VIGAS REFORÇADAS APÓS COLAPSO (VR)

Os resultados obtidos no carregamento máximo antes da ruptura nas vigas reforçadas após colapso estão dispostos na figura 22. Pode-se observar que houve um aumento na deformação de todas as vigas, exceto a viga 13, em comparação com as mesmas antes da recuperação. Levando em consideração o ensaio de flexão em uma viga já rompida, admite-se que os esforços de tração são absorvidos pela armadura e também pela fibra de carbono, sendo esta considerada como uma armadura externa. Ainda analisando a figura 22, notou-se que a viga 13 resistiu mais e deformou menos que as outras vigas. Deve-se ressaltar que esta viga recebeu o reforço depois das outras, sendo a execução aperfeiçoada e melhor conduzida, logo a colagem e aderência do compósito na peça de concreto se deu mais eficiente, resultado numa maior resistência.

O modo de ruptura para todas as vigas reforçadas se deu pelo destacamento do reforço na região de maior solicitação, caracterizado como tipo frágil, o que pode ter sido gerado pelas irregularidades que existiam na superfície do concreto, por fissuras

de cisalhamento ou ainda pelas fissuras de flexão. Também observou-se que as fissuras no concreto, que já existiam em consequência dos ensaios nas vigas referência, permaneceram com suas aberturas inalteradas por um determinado período, dando a entender que o reforço impede esse crescimento da abertura de fissuras, “costurando-as”.

Figura 22: Carga de ruptura nas vigas reforçadas após colapso com fibra de carbono



Fonte: Autor, 2016.

Para a conferência da variação de valores e confiabilidade dos resultados, realizou-se também um teste ANOVA entre os resultados de carga de ruptura em todas as vigas de referência e reforçadas, como descrito na figura 23. Para estes resultados, obteve-se fator $F < F_{\text{crítico}}$ e $p_{\text{value}} \geq 0,05$, ou seja, não houve diferença estatística.

Figura 23: Teste ANOVA para carga de ruptura

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>		<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>	
V	3		155,07	51,69	0,3031	
VR	3		163,76	54,58667	11,10563	
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	12,58602	1	12,58602	2,206383	0,211622	7,708647
Dentro dos grupos	22,81747	4	5,704367			
Total	35,40348	5				

Fonte: Autor, 2016.

3.3 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS COM O TRABALHO DE FERNANDES (2015)

De acordo com o trabalho de Fernandes (2015), as vigas estudadas obtiveram um aumento de suas resistências, tanto no deslocamento máximo (L/250) quanto na carga de ruptura.

Ainda de acordo com Fernandes (2015), na carga obtida no deslocamento máximo (L/250), é citado em bibliografia de autoria de Machado (2002, p.81) “foram documentados acréscimos variando entre 10% e 160%, entretanto levando em consideração conceitos de ductibilidade e de utilização de modo geral, este intervalo se situa entre 5% e 40%”.

O trabalho desenvolvido por Fernandes (2015) consistia em ensaiar vigas de concreto armado à flexão à quatro pontos, utilizando três vigas com reforço e três vigas sem reforço. Como resultados as vigas de referência (sem reforço) apresentaram em média 50,63 KN de carga resistente no momento da ruptura; já as vigas reforçadas apresentaram em média 56,80 KN, mostrando resistência 12% superior, o que comprova a eficiência do material.

De acordo com o estudo desenvolvido por Fernandes (2015), comprovou-se que as vigas reforçadas com compósito estruturado com fibra de carbono apresentaram fissuras somente após a ruptura/destacamento do reforço. No caso do presente estudo, as fissuras, que já se encontravam visíveis, tiveram seu alargamento apenas

quando houve o destacamento do reforço, comprovando o comportamento satisfatório do reforço até o momento de seu rompimento.

3.4 CONCLUSÕES

Ao final do estudo, pode-se concluir que:

- O reforço utilizando PRFC tem uma eficiência na absorção dos esforços solicitantes até a sua ruptura, porém esta eficiência pode variar de acordo com a qualidade de aplicação;
- As vigas recuperadas com o reforço obtiveram em média um acréscimo de 1,75% na resistência ao atingirem o deslocamento máximo por norma, além de um acréscimo médio de 5,31% na resistência de carga de ruptura;
- As vigas recuperadas com o reforço apresentaram em média uma redução de 1,45% no máximo deslocamento vertical quando atingiram suas cargas de ruptura;
- A resina epóxi apresentou-se de fácil homogeneização e aplicação, contudo as fibras de carbono mostraram-se de difícil corte para obter-se as dimensões corretas;
- As fissuras de cisalhamento obtiveram um aumento nas suas aberturas apenas quando o reforço destacou-se do concreto;
- A quantidade de reforço aplicada nas vigas em sua região de maior tração apresentou-se suficiente para a absorção dos esforços solicitantes, resultando numa plena recuperação estrutural.

3.4 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Comparação da eficiência do reforço PRFC na recuperação portante de vigas de concreto armado e outros tipos de reforços;
- Realizar o estudo do comportamento do reforço com fibra de carbono em vigas de concreto armado até o escoamento do aço.

4 REFERÊNCIAS

- _____. **NBR 6118: Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado**. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 15575: Edificações habitacionais - desempenho**. Rio de Janeiro, 2013.
- MACHADO, Ari De Paula. **Reforço de Estruturas de Concreto Armado com Fibras de Carbono**. Editora PINI, 2002.
- MACHADO, Ari De Paula. **Fibras de Carbono – Manual Prático de Dimensionamento**. Edição BASF, 2006.
- DA SILVA, Erick Almeida. **Técnicas de Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto Armado**. Dissertação de Graduação. São Paulo, 2006.
- JUVANDES, L. F. P. **Reforço e Reabilitação de Estruturas de Betão Usando Materiais Compósitos de PRFC**. Tese de Doutorado em Engenharia. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, p. 302, 1999.
- BEBER, Andriei José. **Avaliação do Desempenho de Vigas de Concreto Armado Reforçadas com Compósitos de Fibra de Carbono**. Tese de Doutorado em Engenharia. CPGEC/UFRGS, p. 3. Porto Alegre, 2003.
- RELVAS, Fernando José. **Manual de Reforço de Vigas de Concreto Armado à Flexão com Fibra de Carbono**. Curso prático de diagnóstico, reparo, proteção e reforço, Exata Engenharia e Consultoria S/C Ltda. Edição Abece, 2003.
- CARVALHO, Tiago. **Reforço à Flexão de Vigas de Betão Armado com Compósitos de CFRC**. Dissertação de Graduação. Universidade Nova de Lisboa, p. 185, 2011.
- CARVALHO, Roberto Chust; FIGUEIREDO FILHO, Jasson Rodrigues de. **Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado Segundo a NBR 6118:2003**, 3ª Edição São Carlos: Ed. Edufscar, 2013.
- FERNANDES, Michel Cararo. **Análise Experimental de Vigas de Concreto Armado Sujeitas à Flexão Reforçadas com Fibra de Carbono**. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil. Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC. Criciúma, 2015.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). **440 – Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement**. Anaheim, CA, 2016.