

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO COLAPSADAS E REFORÇADAS COM FIBRA DE CARBONO NO COMBATE AO CISALHAMENTO

Marcel Nola Marcon (1); Daiane dos Santos da Silva Godinho (2).

UNESC - Universidade do Extremo Sul Catarinense

(1) Orientando; e-mail: marcelmarcon@hotmail.com,

(2) Orientador; e-mail: dss@unesec.net

RESUMO

A aplicação de reforço com fibra de carbono é uma maneira de reforçar a estrutura em curto prazo, mas para isso é necessário uma verificação das causas para então poder definir qual melhor técnica a ser executada. O reforço em estruturas de concreto armado tem como principal função reestabelecer sua capacidade portante devido ao seu colapso ou até mesmo na alteração da sobrecarga. O presente estudo tem como objetivo avaliar a eficiência da fibra de carbono na resistência ao cisalhamento em vigas já colapsadas. Foram fabricadas três vigas com dimensões e armaduras iguais e levadas ao ensaio de cisalhamento com o objetivo de avaliar a carga ao atingirem o deslocamento máximo permitido pela norma NBR 6118:2014 (L/250) e no momento da ruptura. Na sequência foi realizado o dimensionamento para o reforço utilizando um compósito a base de resina epóxi e fibra de carbono na região da face cisalhada a fim de atender os esforços obtidos no ensaio. Após a aplicação e atingindo o tempo de cura do reforço, todas as vigas foram novamente levadas ao mesmo ensaio. Como resultado verificou-se que apenas uma viga recuperou sua capacidade portante no instante da ruptura. Em média, as cortantes máximas diminuíram 1,19%.

Palavras-Chave: Fibra de carbono, cisalhamento, reforço estrutural.

1. INTRODUÇÃO

Desde tempos antigos até os dias atuais existem grandes números de estruturas de concreto armado que necessitam algum tipo de reforço estrutural devido a sua mudança na sobrecarga ou até mesmo na falta de fiscalização do engenheiro responsável. Com o avanço da tecnologia na construção civil, grandes vãos, maior rapidez na execução, tem-se observado uma preocupação relacionada ao cálculo e detalhamento de estruturas, fabricação e execução dos materiais, mão de obra qualificada, controle de qualidade e durabilidade das obras.

Considerando a vida útil média das construções de 50 anos, eventualmente uma estrutura de concreto armado precisa ser reparada ou reforçada para restaurar sua segurança e prolongar sua durabilidade.

Nas construções podem ocorrer falhas estruturais em diversas etapas construtivas, e se faz necessário um estudo das causas de modo a evitar que os mesmos problemas venham a acontecer no futuro. As manifestações patológicas trazem transtornos não só para o cliente, mas também para o construtor, pois os custos de um reforço estrutural após a obra entregue são maiores se comparados aos custos de uma execução bem-feita. Conforme conceitua Machado (2003, p5).

A patologia das estruturas tem como objetivo fundamental encontrar explicações técnicas e científicas para as anomalias encontradas no comportamento das estruturas, seja durante a sua construção, seja em sua fase de serviço, para que se determinem as suas origens e suas consequências em relação à sua segurança e à confiabilidade da obra, permitindo que se tome uma decisão correta quanto à utilização posterior das estruturas em análise. E, em função de sua duração residual, definir sobre a conveniência da recuperação, do reforço ou mesmo da demolição pura e simples dos elementos ou da estrutura danificada. (Machado, 2003, p5).

Na engenharia existe um estudo chamado de patologia das construções, no qual esse campo abrange o “estudo das origens, manifestações, consequências e ocorrência de falhas e dos sistemas de degradação das estruturas” (Souza; Ripper, 1998, p. 14).

Em alguns casos, tem-se a necessidade de realizar um reforço estrutural, em curto prazo, para que o elemento estrutural atenda a solicitação de carga nela imposta. Para isso é necessário um estudo, junto ao engenheiro responsável, para identificar e solucionar a causa para então poder definir qual melhor técnica a ser executada. Conforme define Ferrari (2002) apud Pimenta (2012, p. 12),

Utiliza-se o reforço estrutural com intuito de aumentar a capacidade resistente de um elemento que por falhas de concepção ou execução de projeto, alteração da função da edificação, desgaste natural, surgimento de patologias, variações térmicas no concreto, falta de manutenção, entre outros motivos, não atendem mais as suas condições originais ou novas necessidades da estrutura. Ferrari (2002) apud Pimenta (2012, p. 12).

Existem várias técnicas de reabilitação de estruturas de concreto armado. Uma das técnicas que está sendo utilizada na construção civil atualmente é a aplicação de PRFC (Polímero reforçado com fibra de carbono). “A fibra de carbono é a que melhor apresenta características mecânicas para o reforço estrutural sendo, por este motivo, o tipo de fibra mais aconselhável para o reforço estrutural” (Carvalho 2011) apud De Souza (2016, p.2). Este reforço possui uma técnica rápida, fácil e eficaz em sua aplicação. O fato das dimensões dos elementos estruturais existentes permanecerem praticamente inalterados é um fato determinante para a escolha

deste tipo de reforço. Outras características são a maleabilidade e o comprimento oferecido do material, em que são fornecidos em “rolo” podendo ser utilizado no comprimento solicitado. Essas vantagens permitem também que o reforço com fibra de carbono seja executado em lugares com difícil acesso.

No presente trabalho foi realizado um estudo para avaliar a eficiência do reforço com fibra de carbono a fim de reforçar vigas quanto ao cisalhamento, para isso, foi utilizado três vigas com a seção e armadura igualmente estudadas no trabalho desenvolvido por Pereira (2016), no qual foi analisado o comportamento de vigas de concreto armado colapsadas e reforçadas com fibra de carbono no combate a flexão.

Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo específico: (1) cálculo e dimensionamento do PRFC (POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRA DE CARBONO); (2) ensaio de cisalhamento em todas as vigas de referência e nas vigas reforçadas; (3) analisar a eficiência da fibra de carbono na resistência ao cisalhamento na viga; (4) fazer análise estatística ANOVA dos dados, para analisar se existe ou não diferença estatística significativa.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

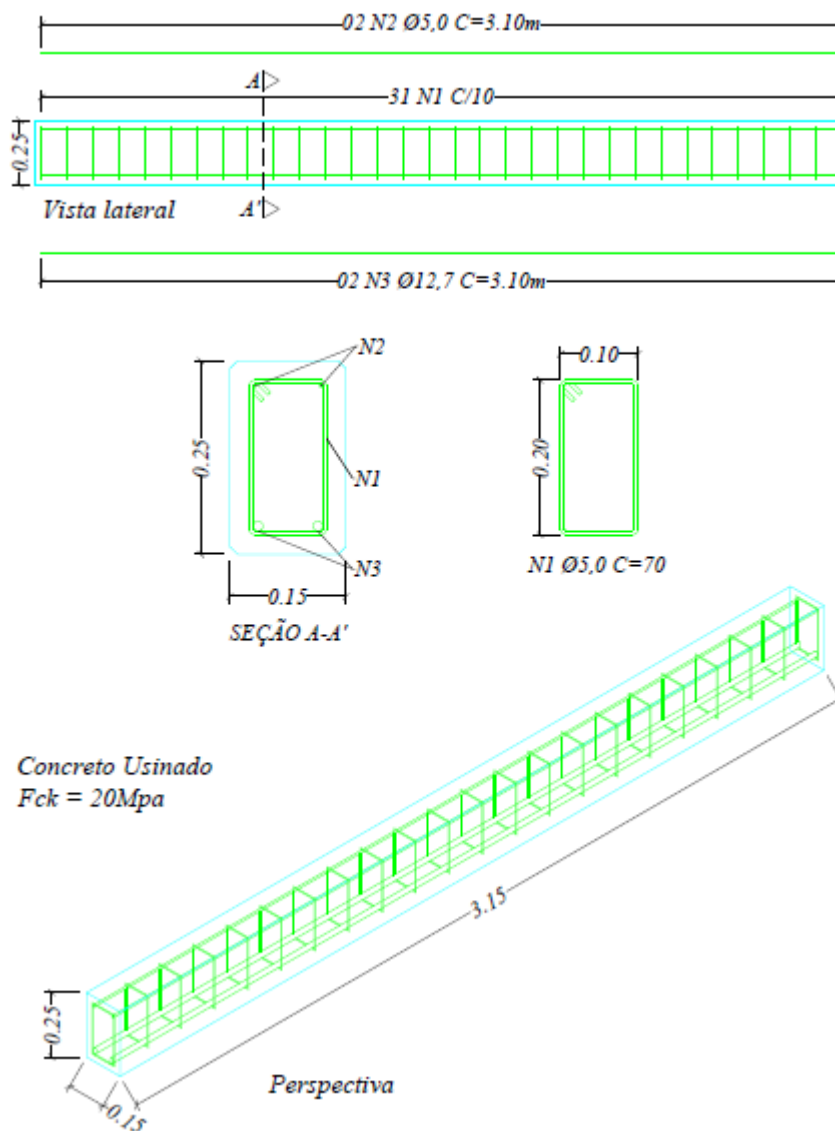
O início do planejamento experimental começou com a análise do comportamento das (03) vigas, no qual as mesmas foram levadas ao rompimento total para verificação da carga máxima.

Nesta primeira etapa, as vigas foram fabricadas com a seção e armadura igualmente estudadas no trabalho desenvolvido por Pereira (2016). Tais vigas possuem resistência característica de 20 Mpa e aço CA-50, dimensões 15x25 cm na seção transversal e 315 cm de comprimento, utilizando Ø 12,5 mm na armadura de flexão e Ø 5,0 mm na armadura de cisalhamento espaçado a cada 10 cm seguindo os critérios do modelo 1 da norma NBR 6118:2014.

Nesta etapa foi estudado apenas o comportamento da viga sem o reforço, a fim de determinar a máxima carga que a mesma pode atingir, tendo como base para a segunda etapa.

Na Figura 01 ilustra o detalhamento da viga para a realização do ensaio

Figura 01: Detalhamento da Viga em concreto armado.



Fonte: Do autor (2016).

Na segunda etapa, foi realizado o cálculo e dimensionamento do reforço das vigas da primeira etapa com fibra de carbono na área cisalhada sendo realizado um dimensionamento com referência no livro “Reforço De Estruturas De Concreto Armado Com Fibras De Carbono” desenvolvido por Ari de Paula Machado (2002).

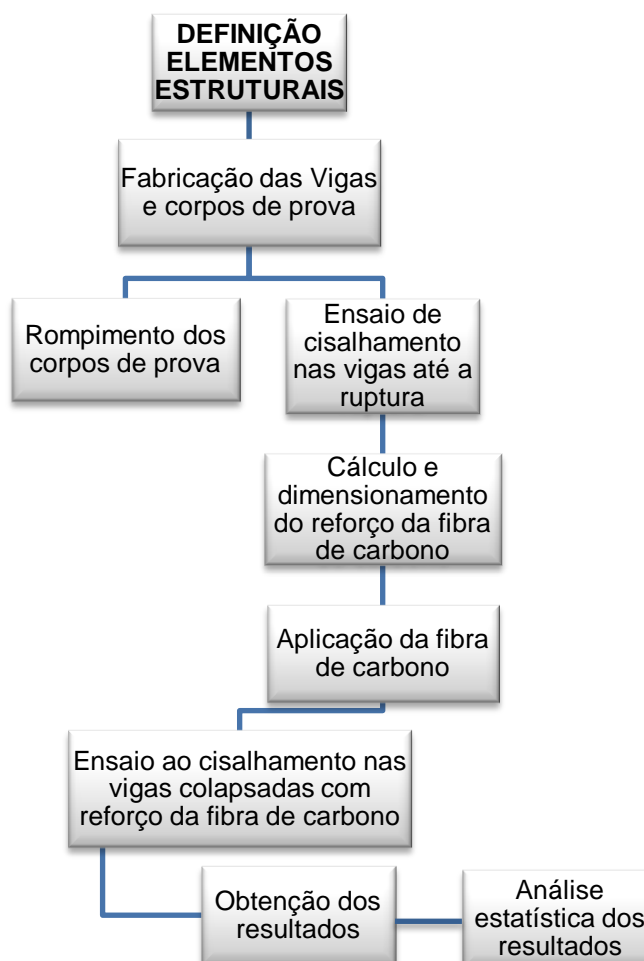
Na terceira etapa foi realizada a aplicação do reforço de fibra de carbono conforme dimensionamento realizado.

Na quarta etapa foram levadas as vigas reforçadas a um novo ensaio de cisalhamento, sendo aplicada a carga no mesmo ponto de aplicação que foi realizado nas vigas de referências.

Na quinta e última etapa, foram realizadas as análises dos resultados.

Como forma de apresentar um quadro resumo do presente artigo, o Fluxograma 01 mostra as etapas da pesquisa.

Fluxograma 01- Fluxograma das etapas da pesquisa.



Fonte: Do autor (2016).

2.1 MATERIAIS

2.1.1 FABRICAÇÃO DAS VIGAS E CORPOS DE PROVA

A concretagem das vigas aconteceu na cidade de Turvo – SC. As três vigas foram concretadas simultaneamente com concreto usinado C20. Como indicado na NBR 6118:2014 para classe de agressividade ambiental II, utilizou-se espaçadores com intenção de garantir o cobrimento da armadura de 2,5 cm. No processo de cura, as mesmas foram concretadas e permaneceram nas formas durante 28 dias, em local protegido. Após o processo de cura, as vigas foram levadas para o Laboratório

Experimental de Estruturas – LEE, localizado no Iparque – UNESC, para a realização dos ensaios de cisalhamento. Paralelos aos ensaios de cisalhamento foram moldados doze corpos de prova cilíndricos ($\varnothing 10 \times 20$ cm). Após a moldagem, os corpos-de-prova foram levados a um local protegido com a finalidade de protegê-lo da ação das intempéries. Até o início do ensaio, os corpos-de-prova ficaram imersos em um tanque de água, conforme especificações na norma NBR 5738:2003 e NBR 5739:2007, com o objetivo de obter a resistência à compressão axial, módulo de elasticidade e tração por compressão diametral. Todos os ensaios foram realizados no Laboratório Experimental de Estruturas – LEE, localizado no Iparque – UNESC. A Figura 02 mostra as etapas de concretagem.

Figura 02(a) – Formas para concretagem



Fonte: Do autor (2016).

Figura 02(c) – CPs concretados



Fonte: do autor (2016).

Figura 02(b) – Vigas Armadas



Fonte: Do autor (2016).

Figura 02(d) – Vigas concretadas



Fonte: do autor (2016).

2.1.2 RESINA EPOXI

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. (Pereira, 2016).

Na pesquisa foi utilizado o produto transparente indicado para laminados de fibra de vidro, carbono e aramida (Kevlar), de cura ambiente. O início da “pega” se dá a partir dos 18 minutos. Após aplicação, o produto apresenta vantagens como fácil impregnação na aplicação, boa adesão, alta dureza e resistência à abrasão, alta isolamento.

O endurecedor à base de poliamina modificado promove a melhor adesão com 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 Figura 03 apresenta a resina epoxi e o endurecedor utilizados.

Figura 03 – Resina epoxi e endurecedor.



Fonte: Do autor (2017).

2.1.3 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, apud Pereira (2016, p. 7)).

No total foram 18 tiras bidirecionais de fibras de carbono recortadas com medidas de 15x22 cm. Na Figura 04 pode-se observar a fibra utilizada no estudo e da tabela 01 as características mecânicas do compósito.

Figura 04 – Fibra de Carbono utilizada



Fonte: Do autor (2017).

Tabela 01 – Características do Compósito

Características do Compósito (Fibra de Carbono + Resina Epoxi)	
Resistência a Tração	3.500 Mpa
Módulo de Elasticidade	266 GPa
Espessura de uma camada	0,38 mm

Fonte: do autor (2017).

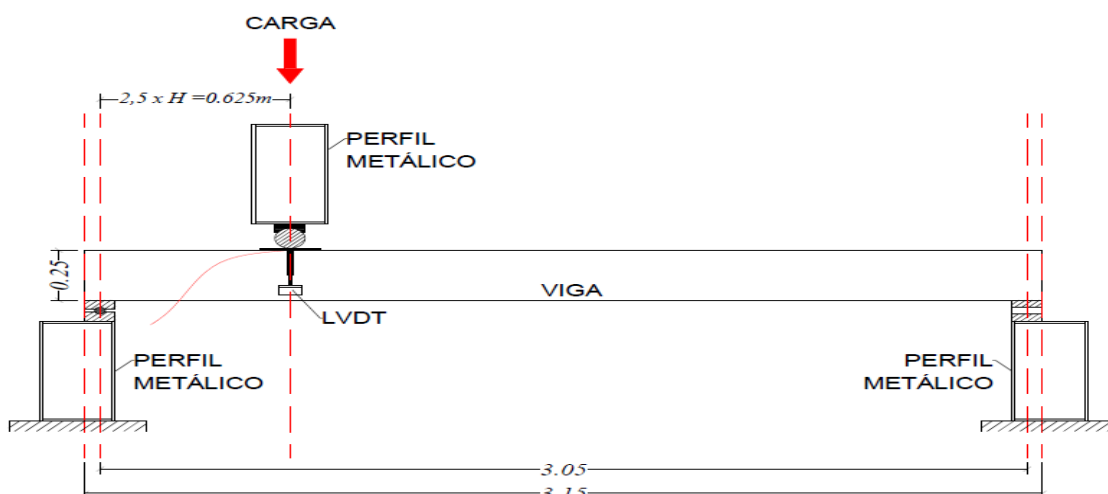
2.1 MÉTODOS

2.2.1 ENSAIO DE CISALHAMENTO DAS VIGAS

Após decorridos 28 dias da concretagem das vigas, as mesmas foram desformadas e transportadas para o LEE – Laboratório Experimental de Estruturas

para a realização dos ensaios. Nestes ensaios teve-se como objetivo obter a ruptura do concreto para que o procedimento de recuperação da viga fosse realizado. Foi ainda analisado o 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, houve decréscimo do valor de carga no equipamento, o mesmo foi desligado e o ensaio concluído. A figura 05 apresenta o posicionamento dos equipamentos para a realização do ensaio.

Figura 05 – Posicionamento dos equipamentos para o ensaio



Fonte: Do autor (2017).

Todo o conjunto de vigas foi submetido a ensaios de cisalhamento. Conforme ilustrado na figura 05, para a realização do ensaio, posicionaram-se as vigas sob um pórtico de reação e aplicou-se a carga a partir de um cilindro hidráulico de controle elétrico com capacidade de 500 kN, a uma distância $2,5h$ do centro do apoio mais próximo, conforme indicado pela norma britânica BS EN 15037-1:2008. Para coletar os dados referentes aos deslocamentos foram utilizados dois transdutores (um em cada lado da viga) de deslocamentos (LVDT), utilizando no mesmo ponto da aplicação de carga. 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 um ponto localizado a $2,5$ da altura da viga. A Figura 06 mostra as vigas após a realização do ensaio.

Figura 06(a) – Viga pronta para o ensaio.



Fonte: Do autor (2017).

Figura 06(b) – Viga colapsada.



Fonte: Do autor (2017).

2.2.2 DIMENSIONAMENTO DO REFORÇO

Para o cálculo do reforço, foi utilizado o método de dimensionamento de Ari de Paula Machado presente no livro “Reforço de Estruturas de Concreto Armado com fibras de Carbono”, seguindo as determinações da norma americana ACI – 440.

Com os dados da carga de ruptura obtidos no ensaio e também com o peso próprio da viga, pode-se obter a cortante máxima para determinar o dimensionamento no combate ao cisalhamento para este esforço. Portanto, a partir da cortante máxima, pode-se fazer todo o procedimento de cálculo da fibra.

VIGA	Cortante Máxima – V _{máx}
V1	4.847,50 Kgf
V2	5.158,80 Kgf
V3	4.126,30 Kgf

A primeira providencia a ser tomada foi à verificação da capacidade resistente da peça ao cisalhamento como mostra a Equação 01.

$$\tau_{wd} = \frac{Vd \times 1,4}{bw.d}$$

Equação (01)

Onde:

τ = Tensão de cálculo de cisalhamento (Kgf/cm²)

Vd = Esforço cortante de cálculo (Kgf)

bw = Largura da viga (cm)

d = distância do centro da armadura tracionada até a face mais comprimida (cm)

VIGA	τ_{wd}
V1	21,17 Kgf/cm ²
V2	22,57 Kgf/cm ²
V3	18,02 Kgf/cm ²

O valor de τ_{wd} tem como objetivo de assegurar que não ocorra o esmagamento da biela comprimida de concreto, que tem seu valor limitado em função de τ_{wu} . Para peças com $bw \leq 5h$.

$$\tau_{wu} = 0,25 f_{cd} \leq 4,5 \text{ Mpa}$$

Equação (02)

Onde:

τ_{wu} = Tensão nominal última de cisalhamento (Kgf/cm²)

h = Altura da viga (cm)

VIGA	τ_{wu}
V1	30,36 Kgf/cm ²
V2	30,36 Kgf/cm ²
V3	30,36 Kgf/cm ²

Após definidas as tensões, calculou-se a taxa de armadura longitudinal, como descrito na Equação 03.

$$\rho_1 = \frac{A_{s,apoio}}{bw \cdot h}$$

Equação (03)

Onde:

ρ_1 = taxa de armadura mínima, no qual, $\psi_1=0,088$ para $0,001 < \rho_1 < 0,015$
 A_s , apoio = Armadura longitudinal da viga (cm²)

VIGA	ρ_1
V1	0,088
V2	0,088
V3	0,088

Em seguida foi estabelecida a tensão reduzida de cálculo τ_c , dada pela equação:

$$\tau_c = \psi_1 \sqrt{f_{ck}}$$

Onde:

τ_c = tensão reduzida de cálculo (Kgf/cm²)

$\psi_1 = 0,088$ para $0,001 < \rho_1 < 0,015$

f_{ck} = Resistência do concreto (MPa)

VIGA	τ_c
V1	3,935 Kgf/cm ²
V2	3,935 Kgf/cm ²
V3	3,935 Kgf/cm ²

Após definido a tensão reduzida de cálculo, determinou-se a nova tensão de cálculo do cisalhamento em função da área de aço do estribo como mostra a Equação 04.

$$\tau_{wd} = \frac{A_{sw} \cdot f_{yd}}{1,15 \cdot s \cdot bw} + \tau_c \quad \text{Equação (04)}$$

Onde:

τ_{wd} = Nova tensão de cálculo do cisalhamento (Kgf/cm²)

A_{sw} = Área de aço do estribo (cm²)

f_{yd} = Resistência de cálculo do aço (Kgf/cm²)

s = Espaçamento entre os estribos (cm)

VIGA	τ_{wd}
V1	15,53 Kgf/cm ²
V2	15,53 Kgf/cm ²
V3	15,53 Kgf/cm ²

Obtida a tensão de cálculo de cisalhamento, definiu-se o esforço cortante de cálculo e o esforço cortante, como mostrado na Equação 05 e na Equação 06.

$$Vd = \tau_{wd} . bw . d \quad \text{Equação (05)}$$

$$V = \frac{\tau_{wd} . bw . d}{1,4} \quad \text{Equação (06)}$$

Onde:

V= Esforço cortante (Kgf)

VIGA	Vd	V
V1	4.978,14 Kgf	3.555,81 Kgf
V2	4.978,14 Kgf	3.555,81 Kgf
V3	4.978,14 Kgf	3.555,81 Kgf

A seguir, determinou-se o esforço cortante máximo de cálculo (Vd ref), como descrito na Equação 07.

$$Vd \text{ ref} = V \text{ max} . 1,4 \quad \text{Equação (07)}$$

Onde:

Vd ref= Esforço cortante máximo de cálculo (Kgf)

V max= Esforço cortante máximo (kgf)

VIGA	Vd ref
V1	6.786,50 Kgf
V2	7.236,32 Kgf
V3	5.776,82 Kgf

Após determinado o esforço cortante máximo de cálculo, definiu-se a tensão máxima de cálculo, mostrado na Equação 08.

$$\tau_{wd(\max)} = \frac{Vd_{ref}}{bw.d} \quad \text{Equação (08)}$$

Onde:

$\tau_{wd(\max)}$ = Tensão máxima de cálculo do cisalhamento (Kgf/cm²)

VIGA	$\tau_{wd(\max)}$
V1	21,17 Kgf/cm ²
V2	22,57 Kgf/cm ²
V3	18,02 Kgf/cm ²

A seguir, determinou-se a diferença entre o esforço cortante máximo de cálculo e o esforço cortante de cálculo, mostrado na Equação 09.

$$\Delta Vd = Vd_{ref} - Vd \quad \text{Equação (09)}$$

Onde:

ΔVd = diferença entre o esforço cortante máximo de cálculo e o esforço cortante de cálculo (Kgf)

VIGA	ΔVd
V1	1.808,36 Kgf
V2	2.258,18 Kgf
V3	796,68 Kgf

Após definido a diferença entre o esforço, foi estabelecida um coeficiente de segurança de 0,85, como descrito na Equação 10.

$$\Delta Vd_{ref} = \frac{Vd_{ref}}{0,85} \quad \text{Equação (10)}$$

Onde:

ΔVd ref= diferença entre o esforço cortante máximo de cálculo e o esforço cortante de cálculo com coeficiente de minoração (Kgf).

VIGA	ΔVd ref
V1	2.127,48 Kgf
V2	2.656,68 Kgf
V3	937,27 Kgf

Na sequencia, calculou-se o comprimento efetivo de colagem de uma lamina de fibra e carbono e o comprimento efetivo de aderência, descritos na Equação 11 e Equação 12.

$$L0 = \frac{2500}{(tf \cdot Efc)^{0,58}} \quad \text{Equação (11)}$$

$$Le = \frac{1}{\sqrt{n}} \cdot L0 \quad \text{Equação (12)}$$

Onde:

L0= comprimento efetivo de colagem de uma lamina de fibra e carbono (cm)

Le= comprimento efetivo de aderência da fibra de carbono (cm)

tf= espessura de uma camada do compósito de fibra de carbono (cm)

Efc= Módulo de elasticidade da fibra de carbono (Kgf/cm²)

VIGA	L0	Le
V1	3,09 cm	3,09 cm
V2	3,09 cm	3,09 cm
V3	3,09 cm	3,09 cm

Em seguida, determinaram-se os fatores de multiplicação K1 e K2, prescritos na Equação 13 e na Equação 14, respectivamente.

$$K1 = \left(\frac{fck}{27} \right)^{\frac{2}{3}} \quad \text{Equação (13)}$$

$$K2 = \frac{dfe}{df}$$

Equação (14)

Sendo, $dfe = df - 2Le$; No qual, $df = d$

Onde:

$K1$ = fator de multiplicação em função da resistência do concreto

$K2$ = fator de multiplicação em função do reforço de cisalhamento

dfe = comprimento efetivo da lamina de fibra de carbono (cm)

df = comprimento da lâmina de fibra de carbono (cm)

VIGA	df	dfe	K1	K2
V1	21,37 cm	15,19 cm	0,819	0,71
V2	21,37 cm	15,19 cm	0,819	0,71
V3	21,37 cm	15,19 cm	0,819	0,71

A seguir, calculou-se o fator de redução da resistência da fibra de carbono e a tensão limite de ruptura, expressas na Equação 15 e Equação 16, respectivamente.

$$R = \frac{K1 . K2 . Le}{11900 . \epsilon fu}$$

Equação (15)

$$ffc = R . fu$$

Equação (16)

Onde:

R = fator de redução da resistência da fibra de carbono

ϵfu = deformação última da fibra de carbono (cm)

ffc = Tensão limite de ruptura da fibra de carbono (Kgf/cm²)

fu = Resistência última da fibra de carbono (MPa)

Sendo que, $R \leq \frac{0,005}{\epsilon fu}$

VIGA	R	ffc	$\frac{0,005}{\epsilon fu}$
V1	0,09	3150 Kgf/cm ²	0,29
V2	0,09	3150 Kgf/cm ²	0,29
V3	0,09	3150 Kgf/cm ²	0,29

Finalmente, definiram-se os espaçamentos e o número de camadas das fibras de carbono, descrita na Equação 17 e Equação 18, respectivamente. Foi estabelecido definido que as lâminas de fibra de carbono teriam 15,00 cm de largura.

$$sfc = \frac{2 \cdot tf \cdot wf \cdot ffc \cdot df}{\Delta Vd \text{ ref}} \quad \text{Equação (17)}$$

$$\frac{dfc}{sfc} = 2 \cdot tf \cdot ffc \cdot df \quad \text{Equação (18)}$$

Sendo que:

$$\frac{dfc}{sfc} < 1 \quad \text{Para uma camada de fibra de carbono}$$

Onde:

sfc=espaçamento entre eixos, para a fibra de carbono (cm)

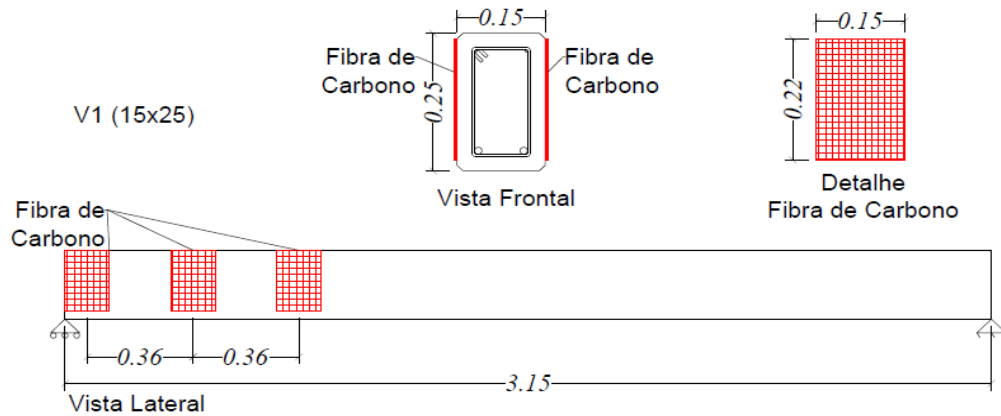
wf= espessura de uma camada do compósito de fibra de carbono (cm)

$\Delta Vd \text{ ref}$ = diferença entre o esforço cortante máximo de cálculo e o esforço cortante de cálculo com coeficiente de minoração (Kgf).

VIGA	sfc	$\frac{dfc}{sfc}$
V1	36,00 cm	0,42
V2	28,00 cm	0,52
V3	81,00 cm	0,18

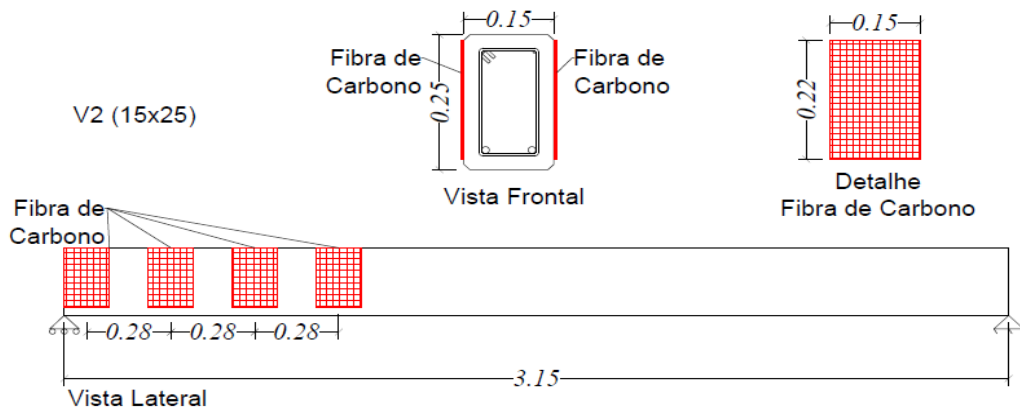
Portanto, foi definido que todas as vigas precisaram do reforço com fibra de carbono. De acordo com o dimensionamento, executou-se conforme ilustrado nas Figuras 07:

Figura 07 (a) - V1, Lâminas de 15x22 cm espaçadas a cada 36 cm, entre eixo:



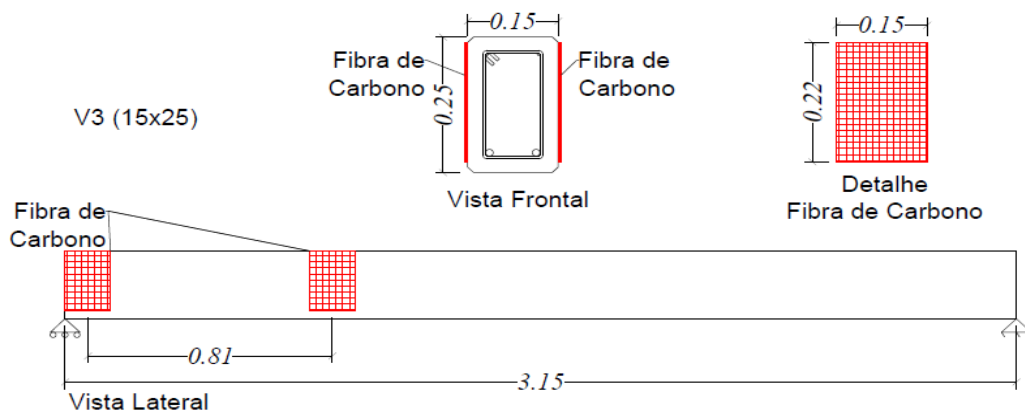
Fonte: Do autor (2017).

Figura 07 (b) - V2, Lâminas de 15x22 cm espaçadas a cada 28 cm, entre eixo:



Fonte: Do autor (2017).

Figura 07 (c) - V3, Lâminas de 15x22 cm espaçadas a cada 81 cm, entre eixo:



Fonte: do autor (2017).

2.2.3 APLICAÇÃO DA FIBRA DE CARBONO

Finalizados os dimensionamentos, a próxima etapa foi executada à aplicação do reforço nas vigas colapsadas. Nesta fase, a região cisalhada foi reforçada, aplicando o reforço na lateral da viga, conforme dimensionamento. A primeira etapa a ser realizada foi à limpeza da superfície no local de aplicação do reforço para garantir uma superfície com melhor aderência e livre de impurezas. Aplicação feita com lixa. Em seguida foi preparada a resina epoxi e o endurecedor que tem-se a proporção de 100% da resina e 50% do endurecedor. Após a mistura, o componente tem aproximadamente 25 minutos até que o processo de polimerização se inicie. Feita a aplicação com rolo. Em seguida foi aplicada a fibra de carbono conforme o dimensionamento realizado. Por último, foi aplicada mais uma demão da resina epoxi, finalizando o compósito de PRFC, como mostrado na Figura 08.

As etapas construtivas para o reforço com fibra de carbono foram as seguintes:

- 1- Preparação da superfície onde será aplicada a fibra de carbono (Limpeza);
- 2- Aplicação de uma camada de resina epoxi na superfície do concreto;
- 3- Aplicação da fibra de carbono sobre a superfície;
- 4- Aplicação de uma camada de resina epoxi sobre a fibra de carbono.

Figura 08(a) – Reforço V1



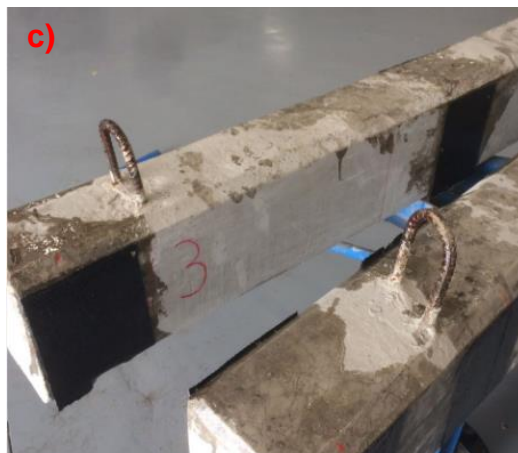
Fonte: Do autor (2017)

Figura 08(b) – Reforço V2



Fonte: Do autor (2017)

Figura 08(c) – Reforço V3



Fonte: do autor (2017)

Durante 5 dias a cura total deve acontecer e a colagem, a partir deste dia, já pode sofrer agressões químicas e/ou mecânicas. Após as vigas serem reforçadas, foi realizado no LEE (Laboratório Experimental de Estruturas) um novo ensaio de cisalhamento para estas vigas. Foi utilizado o mesmo procedimento dos primeiros ensaios, sendo feita a verificação da carga no deslocamento máximo permitido, além da carga de ruptura no ponto de aplicação da carga. Na Figura 09 mostra o comportamento da viga após a aplicação de carga.

Figura 09(a) – V1 colapsada após reforço.



Fonte: Do autor (2017).

Figura 09(b) – V2 colapsada após reforço.



Fonte: Do autor (2017).

Figura 09(c) – V3 colapsada após reforço.



Fonte: Do autor (2017).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DOS CORPOS DE PROVA.

Realizou-se o ensaio de resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade aos 28 dias, dos corpos de provas moldados. As amostras foram mantidas em cura submersa durante 28 dias. Os resultados obtidos no ensaio foram reunidos na Tabela 02. O concreto atingiu resistência esperada em todos os exemplares.

Tabela 02 – Resultados obtidos dos corpos de prova

Amostra	Resistência à compressão Axial (MPa)	Tração por compressão Diametral (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)
CP1	21,2	8,9	32,41
CP2	19,4	9,6	31,96
CP3	20,6	9,2	31,67
Média	21,07	9,07	32,01
Desvio Padrão	0,34	0,12	0,30

Fonte: Do autor (2017).

3.2 VIGAS REFORÇADAS COM FIBRA DE CARBONO

Como forma de diferenciar as vigas de referência com as vigas reforçadas, foi criada uma nomenclatura, conforme Tabela 03.

Tabela 03 – Nomenclatura das vigas

VIGA	NOMENCLATURA
V	Viga de Referência
Vref	Viga Reforçada com Fibra de Carbono

Fonte: Do autor (2017).

3.3 VIGAS NO SEU DESLOCAMENTO MÁXIMO PERMITIDO POR NORMA (L/250)

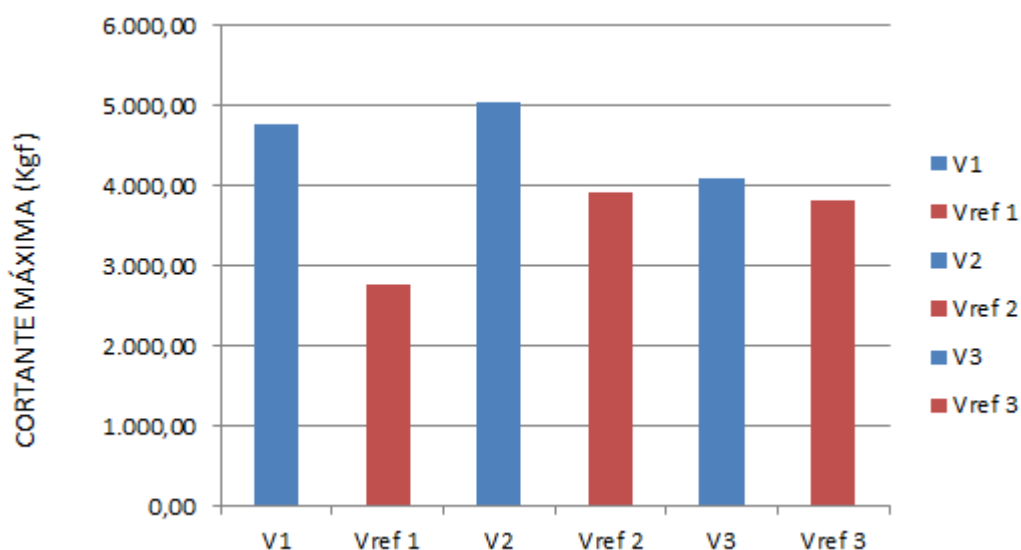
Considerado o deslocamento máximo determinado pela NBR 6118:2014 (L/250), observou-se que as vigas de referência(V) absorveram uma carga média de 4.639,43 Kgf. Já as vigas reforçadas (Vref), obtiveram um resultado médio de 3.496,00 Kgf. O grupo de vigas reforçadas obteve um decréscimo de 1.33% em sua cortante máxima, em relação ao grupo de vigas de referência. Verificou-se que as vigas reforçadas, no seu deslocamento máximo permitido por norma, não apresentaram uma completa recuperação em nenhuma das 3 vigas. Na Tabela 04 a seguir podem-se verificar as cargas obtidas no deslocamento máximo por norma L/250 (12,60 mm). A Figura 10 faz a comparação de cargas nos seus deslocamentos no instante do deslocamento máximo permitido por norma, entre vigas de referência e vigas reforçadas.

Tabela 04 – Cortante máxima no deslocamento máximo permitido por norma (L/250)

VIGA	Cortante Máxima – V _{máx}	Deslocamento Máximo
V1	4.769,20 Kgf	12,44 mm
V2	5.053,40 Kgf	12,33 mm
V3	4.095,70 Kgf	12,43 mm
Vref 1	2.761,40 Kgf	12,42 mm
Vref 2	3.913,40 Kgf	12,53 mm
Vref 3	3.813,20 Kgf	12,51 mm

Fonte: Do autor (2017).

Figura 10 – Comparativo das cortantes máximas das vigas de referências e das vigas reforçadas após aplicação de carga no seu deslocamento máximo permitido por norma.



Fonte: Do autor (2017).

De acordo com a figura 10 pode-se observar que as vigas reforçadas com fibras não tiveram sua capacidade cisalhante melhorada significativamente. Verificou-se que a Vref 1 e Vref 2 e Vref 3 tiveram um decréscimo na sua capacidade cisalhante de 2.007,80 Kgf, 1.140,00 Kgf e 282,50 Kgf respectivamente, no instante em que atinge a carga máxima no seu deslocamento máximo permitido por norma (L/250).

Para verificar se os valores de cortante no momento do deslocamento máximo permitido (L/250) são diferentes, aplicou-se uma análise estatística de variância (ANOVA),

Análise estatística de variância (ANOVA), com nível de confiança de 95%, ou seja, para um fator significativo deve-se obter pvalue $\geq 0,05$. (Pereira, 2016).

Pode-se analisar que os valores obtidos nos ensaios das vigas V e das vigas Vref são estatisticamente iguais, com valor-P = 0,0698, tendo ainda fator $F < F$ crítico, comprovando a semelhança entre as amostras. A figura 11 apresenta os resultados obtidos no ANOVA.

Figura 11 – Análise estatística ANOVA para o deslocamento máximo.

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
V	3,00	13.918,30	4.639,43	241.926,86
Vref	3,00	10.488,00	3.496,00	407.237,88

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	1.961.159,68	1,00	1.961.159,68	6,04	0,0698	7,7086
Dentro dos grupos	1.298.329,49	4,00	324.582,37			
Total	3.259.489,17	5,00				

Fonte: Do autor (2017).

3.4 RESULTADOS DAS VIGAS NA SUA CARGA DE RUPTURA

Em relação a cortante máxima no seu instante de ruptura, verificou-se que as vigas reforçadas após o colapso apresentaram uma completa recuperação em apenas uma viga (Vref 3). As Vref 1 e Vref 2 colapsaram com uma carga menor que a sua viga de referência.

Na tabela 05 a seguir podem-se verificar as cargas obtidas no seu instante de ruptura. Em média as vigas absorveram uma carga média de 4.710,87 Kgf. Já as vigas reforçadas (Vref), obtiveram um resultado médio de 3.947,07 Kgf. O grupo de vigas reforçadas obteve um decréscimo de 1,20% em relação às vigas de referência. A figura 12 faz a comparação de cargas nos seus deslocamentos no instante da ruptura, entre vigas de referência e vigas reforçadas.

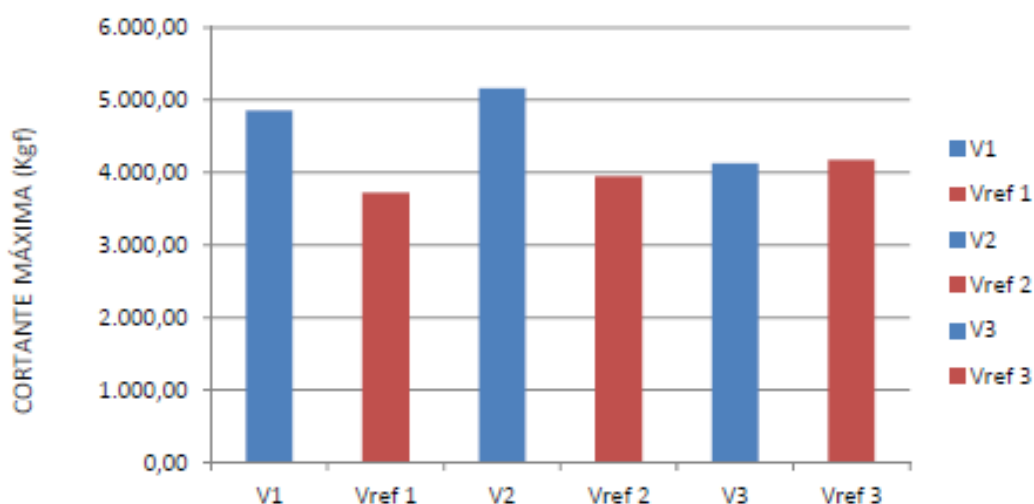
Tabela 05 – Cortante máxima no deslocamento máximo de ruptura.

VIGA	Cortante Máxima – Vmáx	Deslocamento
V1	4.847,50 Kgf	13,54 mm
V2	5.158,80 Kgf	12,33 mm
V3	4.126,30 Kgf	14,38 mm
Vref 1	3.722,80 Kgf	19,97 mm
Vref 2	3.946,70 Kgf	21,82 mm
Vref 3	4.171,70 Kgf	15,83 mm

Fonte: Do autor (2017).

De acordo com a figura 12, Pode-se observar que nas Vref 1, e Vref 3, as vigas reforçadas com fibras de carbono não tiveram sua capacidade cisalhante melhorada significativamente. Elas tiveram um decréscimo na sua capacidade portante de 1.124,70 Kgf e 1.211,10 Kgf, respectivamente, no instante em que atinge a carga máxima. Já a viga Vref 3 teve um acréscimo na carga resistida em 45,40 Kgf.

Figura 12 – Comparativo das cortantes máximas das vigas de referências e das vigas reforçadas após aplicação de carga.



Fonte: Do autor (2017).

Para análise dos resultados, realizou-se um teste ANOVA, para avaliar se existe ou não diferença estatística entre os resultados de carga de ruptura em todas as vigas de referência e reforçadas.

Essa análise mostrou que a carga para ruptura forneceram valores estatisticamente iguais ($p > 0,05$) entre todos os grupos, com um nível de confiança de 95%. (Deghenhard, 2015).

Para estes resultados, obteve-se fator $F < F_{crítico}$ e valor- $P \geq 0,05$, ou seja, não houve diferença estatística. A figura 13 exibe os resultados obtidos.

Figura 13 – Teste Anova para cortante de ruptura.

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
V	3,00	14.132,60	4.710,87	280.515,56
Vref	3,00	11.841,20	3.947,07	50.377,90

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
-------------------	----	----	----	---	---------	-----------

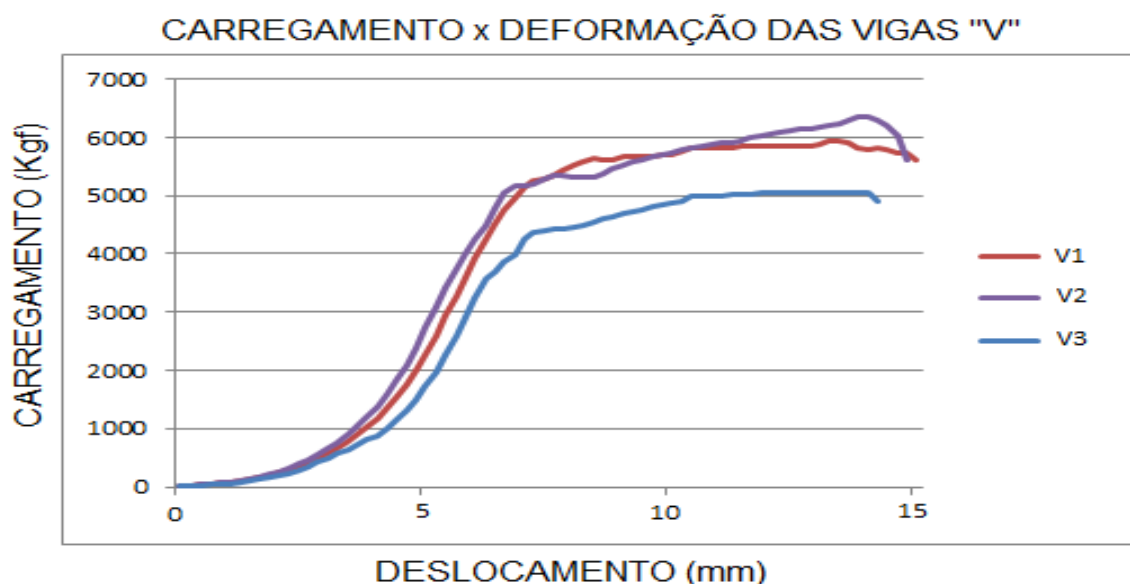
Entre grupos	875.085,66	1,00	875.085,66	5,29	0,08	7,7086
Dentro dos grupos	661.786,93	4,00	165.446,73			
Total	1.536.872,59	5,00				

Fonte: Do autor (2017).

3.5.1 DESLOCAMENTO DAS VIGAS DE REFERENCIAS

Na figura 14 podem-se analisar os resultados obtidos no carregamento máximo suportado pelas vigas de referência no instante da sua ruptura. Apesar dos carregamentos apresentarem distintos, nota-se que as vigas V1 V2 e V3 mostraram deformações semelhantes. Pode-se observar que a V1 e V3, apresentou comportamento semelhante, no qual, houve pouca variação de carregamento a partir do deslocamento 11 mm, ocorrendo o colapso no instante 13 mm e 14 mm, respectivamente.

Figura 14 - Gráfico do Carregamento x Deformação das vigas "V".



Fonte: Do Autor (2017).

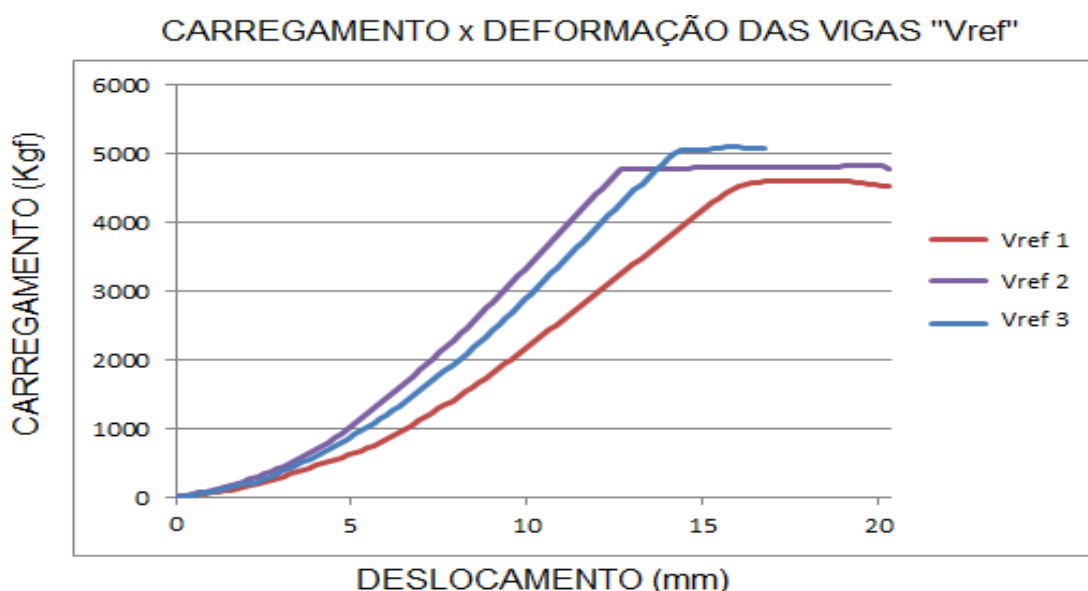
Vale ressaltar que na figura 14, a V2 apresentou um comportamento distinto das outras duas, onde, quanto mais carga resistia, mais sofria deslocamento. A partir do deslocamento 14 mm ocorreu um decréscimo da carga no equipamento, e consequentemente o colapso da viga.

3.5.2 DESLOCAMENTO DAS VIGAS REFORÇADAS

Os resultados obtidos no carregamento máximo até o instante da ruptura nas vigas reforçadas após colapso estão apresentados na figura 15. Diferentemente das Vigas de Referência, as Vigas de Reforçadas 1, 2 e 3 apresentaram deslocamento distintos, ocorrendo sua ruptura nos deslocamentos 19 mm, 21 mm e 15 mm, respectivamente. Nota-se também que houve um aumento significativo na deformação de todas as vigas, em comparação com as Vigas de Referência.

Pode-se observar que, a carga resistida pelas vigas “Vref” foram menores que se comparado com as vigas “V”, com exceção da “Vref 3”, que no caso, recuperou, apesar de pequena, sua capacidade portante.

Figura 15 - Gráfico do Carregamento x Deformação das vigas “Vref”.



Fonte: Do Autor (2017).

3.6 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS COM O TRABALHO DE SOUZA (2016)

No estudo realizado por Souza (2016), as vigas estudadas obtiveram um aumento na sua capacidade portante, tanto no deslocamento máximo ($L/250$) quanto na carga de ruptura.

A pesquisa de Souza (2016) consistia em ensaiar, de modo experimental, vigas de concreto armado a cisalhamento a quatro pontos, com aplicação de carga a 45 cm

do apoio, tendo dimensão de 12x20 cm de comprimento 190 cm com estribos de diâmetro 5,0 mm espaçados a cada 30,0 cm e fibras com lâminas de 5x20 cm espaçadas a cada 5,0 cm.

Foram utilizadas três vigas sem reforço e três vigas com reforço de fibra de carbono. Como resultados as vigas de referência (sem reforço) apresentaram em média 4.578,0 Kgf de carga resistente no momento da ruptura; já as vigas reforçadas apresentaram em média 5.136,0 Kgf, mostrando resistência 12,19% superior, comprovando sua capacidade cisalhante para este grupo de vigas. Diferentemente da pesquisa realizada, que no caso diminuiu sua resistência em 1,20%.

Um dos motivos que na pesquisa de Souza (2016) tenha aumentado sua resistência pode ser na quantidade de lâminas de fibra de carbono, que no caso foi maior, e no seu espaçamento, no qual foi espaçado mais próximo. Na pesquisa realizada, segundo o dimensionamento, foi com lâminas maiores e com menos quantidade.

No presente trabalho, observou-se que a aplicação do PRFC não apresentou um resultado satisfatório em no seu deslocamento máximo permitido por norma e no instante da ruptura. Diferentemente no desenvolvido por Souza (2016), que comprovou que as vigas reforçadas com compósito estruturado com fibra de carbono apresentaram um aumento na resistência das vigas.

Vale ressaltar que no estudo realizado, visualmente, no momento da aplicação da carga, o compósito de fibra de carbono começou a descolar da viga no apoio, podendo ser um dos motivos para que não atingisse a carga esperada, conforme ilustrado na figura 16.

Figura 16 – Fibra deslocada da viga após aplicação de carga.



Fonte: Do Autor (2017)

Outro motivo poderia ser a imperfeição da superfície de aplicação, uma vez que a viga apresentava rachaduras, o que dificultava a aplicação da fibra de carbono, fazendo com que o compósito não trabalhasse com sua máxima eficiência.

4 CONCLUSÕES

Ao final da pesquisa conclui-se que:

- A aplicação da fibra de carbono para o combate ao cisalhamento, não se apresentou como uma solução de reforço da viga com objetivo de recuperar sua capacidade portante;
- Ao atingirem o deslocamento máximo permitido por norma, as vigas “Vref” apresentaram em média uma redução de 1,33% na capacidade portante quando comparado às vigas “V”, no qual foi um resultado significativo, impossibilitando que o reforço recuperasse a capacidade portante da viga;
- Ao atingirem o instante da ruptura, as vigas “Vref” apresentaram em média uma redução de 1,19% na capacidade portante quando comparado às vigas “V”;
- Pode-se observar que, conforme os critérios estabelecidos pela ANOVA os resultados mostraram que os valores foram estatisticamente iguais, havendo semelhanças entre as amostras.
- A aplicação do reforço em 2 das 3 vigas, em sua região estudada, apresentou-se insuficiente para a absorção dos esforços solicitantes, apresentando um resultado inesperado.
- Deve-se ter bastante atenção durante o processo executivo usando mão-de-obra qualificada para o procedimento (Dos Santos, 2008). No qual este tipo de execução é um procedimento delicado, exigindo mão de obra qualificada.

Sugere-se para futuros trabalhos:

- A partir do estudo realizado, redimensionar a fibra de carbono para estribos utilizando espaçamento máximo exigido pela norma 6118:2014.
- Realizar um estudo do comportamento das vigas reforçadas e dimensionadas com PRFC ao cisalhamento em uma situação de incêndio;

5. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Concreto - procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova**. Rio de Janeiro, 2003.

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

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

PEREIRA, Raí Scheffer - **Análise Do Comportamento De Vigas De Concreto Armado Danificadas e Recuperadas Com Fibra De Carbono**. Criciúma. 2016. 27p.

MACHADO, Ari De Paula. **Reforço de Estruturas de Concreto Armado com Fibras de Carbono**. Editora PINI, 2002.

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

PIMENTA, Taia Marinho. **Comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com chapas metálicas, coladas com geopolímero, e com mantas de sisal coladas com resina epóxi**. Paraíba, 2012. 65p.

DE SOUZA, Fernando Cechinel - **Análise experimental de reforço com fibra de carbono no combate ao cisalhamento em vigas de concreto armado**. Criciúma. 2016. 15p.

DEGHENHARD, Caroline Crozeta - **Análise experimental da capacidade portante em vigas de concreto armado sujeitas a flexão com reforço metálico colado na face tracionada**. Criciúma. 2013. 19p.

DOS SANTOS, Paulo Mascarenhas, **Comparação de Reforço com Chapas de Aço e Fibras de Carbono em Vigas de Concreto Armado Submetidas à Flexão Simples**. Feira de Santana, 2008. 61p.

EN 1168:2005 – Precast Concrete Products – Hollow Core Slabs. Brussels. CEN (Comité Européen de Normalisation), 2005.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). **440 – Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement**. Anaheim, CA, 2016.