

ESTUDO EXPERIMENTAL DO REFORÇO À FLEXÃO EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO COM BALANÇO UTILIZANDO COMPÓSITOS COM TECIDOS DE FIBRAS DE CARBONO

Ana Carolina Neves de Araújo ¹, Emil Sánchez ², Marta de Souza Lima Velasco ³

Resumo: Esse trabalho apresenta um estudo sobre o comportamento e o desempenho de vigas de concreto armado reforçadas à flexão utilizando-se compósitos de fibra de carbono. O programa experimental constituído pelo ensaio de sete vigas biapoeadas com um vão em balanço, todas com a mesma seção transversal, armaduras de aço e vãos idênticos, sendo o momento positivo máximo igual ao do momento negativo máximo. O concreto utilizado foi projetado para fornecer uma resistência à compressão de 20 MPa e o aço empregado foi o CA-50. Foi ensaiada uma viga de referência sem reforço. As outras seis vigas foram pré-carregadas e reforçadas sob carregamento constante, sendo que três delas foram igualmente reforçadas nas duas regiões de momentos máximos, e as outras três tiveram sua armadura de reforço, em relação às três primeiras, duplicada na região de momento máximo negativo, sendo mantida a área do reforço na região de momento positivo.

O comportamento estrutural dessas vigas foi avaliado em termos de flechas, deformação da armadura, fissuração, modo e carga de ruptura. Por meio da análise realizada verificou-se o aumento de resistência e rigidez das vigas reforçadas, constatando-se que o reforço em vigas de concreto armado com compósitos de fibra de carbono é uma técnica eficiente e de fácil execução.

Experimental Study of R/C Beams Strengthened in Flexure with Externally-Bonded Carbon Fiber Polymers

Abstract: This article presents an experimental study on the flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with externally-bonded carbon fiber polymers. The experimental program consists of the manufacture and tests of seven simple supported R/C beams with one cantilever. The beams have the same cross-section, length, and internal steel reinforcement. The beams were designed in a way that the mid-span bending moment is the same as the cantilever bending moment. The concrete mix was designed for achieving a compressive strength of 20 MPa, and the applied steel reinforcement had a specified yield stress of 500 MPa. A reference beam was tested without the bonded reinforcement. The six strengthened beams were preloaded and the carbon fiber polymer applied under constant deformation. Three beams were equally strengthened in the regions that correspond to the maximum bending moments. In relation to these three first beams, the other three had the strengthening cross-section area duplicated in the region of the maximum negative moment, keeping the same strengthened cross-section area in the region of the positive moment. The structural behavior of these beams was evaluated in terms of deflection, straining of the steel reinforcement, cracking, failure type and failure load. The analysis showed an increase in the strength and the stiffness of the beams, and also that the strengthened technique is efficient and easy to accomplish.

INTRODUÇÃO

A grande quantidade de obras civis, tais como pontes, viadutos e edificações, com problemas estruturais e que necessitam de reforço, levam à pesquisa por novas técnicas e materiais para a execução desses serviços (Araújo 2002). Além da deterioração devida ao tempo, as falhas de projeto e de execução, o aumento do carregamento inicialmente projetado, a mudança na utilização da estrutura e o emprego de materiais de baixa qualidade, são problemas que necessitam de soluções eficientes (Beber et al. 2000, El-Mihilmy et al. 2001, Grace et al. 2001, Pinto et al. 2001).

¹ Enga Civil, M. Sc., Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro, Brasil.

² D. Sc., Professor da Universidade Federal de Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil, e-mail: emilsanchez@uol.com.br

³ D. Sc., Professora da Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro, Brasil

Os materiais compósitos, tais como os de fibra de carbono, além de possuírem algumas propriedades mecânicas superiores às do aço, apresentam outras vantagens sobre esses. A rapidez e facilidade de execução, a leveza e trabalhabilidade do material, e a resistência à corrosão, são fatores que levaram à adoção progressiva desses materiais compósitos. Na literatura tem-se uma vasta gama de pesquisas que abordam esse tipo de reforço (Shehata et al. 2000, Silva et al. 2000, Spadea et al. 1998, Ziraba et al. 1994).

Os trabalhos encontrados na literatura, em geral, abordam os aspectos e parâmetros relativos à resistência da viga reforçada, porém, a ductilidade do elemento estrutural é primordial no comportamento do mesmo. Neste trabalho, é desenvolvida uma abordagem energética para a obtenção da ductilidade, por meio da definição de um índice que possa avaliar a capacidade de deformação da viga reforçada.

PROGRAMA EXPERIMENTAL

O objetivo principal deste estudo experimental é avaliar o comportamento e o desempenho de vigas de concreto armado reforçadas à flexão com compósitos de fibra de carbono (CFC), por meio da determinação da flecha, das deformações das armaduras internas de aço, das aberturas das fissuras e da obtenção da carga de ruptura para as vigas reforçadas (Araújo 2002).

Foram testadas sete vigas de concreto armado com resistência à compressão em torno de 20 MPa, e com geometria e armaduras longitudinais e transversais idênticas. Essas vigas são biapoiadas e com um vão em balanço, carregadas de forma a se obter momentos máximos positivos e negativos de mesmo valor.

A viga de referência, VR, foi utilizada para possibilitar as comparações de incremento de resistência e rigidez após o reforço. A viga VR foi levada à ruptura, que se deu por flexão na região de momento máximo negativo.

A segunda, terceira e quarta vigas - V1, V2 e V3 -, foram igualmente reforçadas à flexão por meio da colagem de uma camada de tecido de fibra de carbono, com a mesma largura na face inferior, entre os apoios, e na face superior, na região do balanço. Nessas três vigas a ruptura foi de flexão na região de momento máximo negativo com o rompimento do tecido de fibra de carbono. Concluiu-se então que seria interessante analisar o comportamento da viga para um acréscimo da armadura de reforço no balanço.

As vigas V4, V5 e V6 foram reforçadas à flexão com uma camada de tecido com as mesmas dimensões que a utilizada nas vigas V1, V2 e V3 para a região de momento positivo, e com o dobro da largura do tecido para a região de balanço, desse modo, duplicando-se a armadura de reforço, esperava-se que a ruptura ocorresse na região de momento máximo positivo.

O ensaio da viga VR foi realizado em uma única etapa, já que não seria realizado nenhum tipo de reforço. Para as demais vigas o ensaio foi realizado em duas etapas, para simular uma situação mais próxima das condições reais de uma estrutura real. As vigas foram pré-ensaiadas, reforçadas sob carregamento teoricamente constante, e posteriormente levadas à ruptura. Desenvolveu-se então um sistema de manutenção de carga, com o objetivo de conservar o carregamento aplicado durante o tempo necessário para aplicação e cura do reforço (Araújo 2002).

PROPRIEDADE DOS MATERIAIS

Concreto

O concreto utilizado nas vigas, projetado para alcançar uma resistência à compressão de 20 MPa aos 28 dias, foi misturado de forma a se obter 2,5 m³ de material, de acordo com (NBR-5738 1993) e (NBR-5739 1994), num caminhão betoneira com capacidade de 8 m³, e apresentou 100 mm de slump.

Foram moldados ao todo 25 corpos-de-prova cilíndricos com dimensões de 150 mm X 300 mm (NBR-5738 1993). Após 24 horas os corpos-de-prova foram desformados e mantidos sob as condições ambientes do laboratório. Os ensaios foram realizados aos sete dias e aos 28 dias após a concretagem, e nos dias dos ensaios das vigas VR, V2, V4 e V6. Todos os corpos-de-prova foram ensaiados à compressão (NBR-5739 1994). Os valores médios de resistência do concreto à compressão são mostrados na Tabela 1.

Aço

Para as armaduras longitudinal e transversal foram utilizadas barras de aço CA-50 e CA-60. Os diâmetros das barras da armadura longitudinal foram de 5,0 mm, para armadura de montagem na região comprimida, e de 12,5 mm para a armadura longitudinal de tração.

A armadura transversal consistiu de estribos de 6,3 mm de diâmetro, com espaçamento de 10 mm ao longo de todo o comprimento da viga.

Nove amostras de aço foram ensaiadas à tração (NBR-6118 2000), sendo três amostras para cada diâmetro. Os valores obtidos nos ensaios de tração foram superiores aos mínimos exigidos pela norma. A Tabela 2 mostra o resumo dos dados e os valores adotados nos cálculos.

Tabela 1: Resultados dos ensaios de resistência do concreto à compressão.

Ensaio da viga	Idade do concreto (dias)	Quantidade de corpos-de-prova	$f_{c\text{ medio}}$ (MPa)
-----	7	3	22,7
-----	28	5	25,4
VR	35	5	26,1
V2	94	4	29,0
V4	120	4	29,1
V6	134	4	29,2

Tabela 2 – Resumo dos dados obtidos nos ensaios à tração das barras de aço.

Corpo de prova	Tipo de aço	Diâmetro nominal (mm)	Tensão (kN)	
			Esc.	Rupt.
CP1 - 5,0	CA-60	5,00	835	910
CP2 - 5,0	CA-60	5,00	854	913
CP3 - 5,0	CA-60	5,00	856	916
Valor adotado	CA-60	5,00	848	913
CP1 - 6,3	CA-50	6,30	580	835
CP2 - 6,3	CA-50	6,30	588	872
CP3 - 6,3	CA-50	6,30	536	817
Valor adotado	CA-50	6,30	568	841
CP1 -12,5	CA-50	12,50	640	680
CP2 -12,5	CA-50	12,50	643	696
CP3 -12,5	CA-50	12,50	643	693
Valor adotado	CA-50	12,50	642	690

Tecido de Fibras de Carbono

Para o reforço à flexão das vigas V1, V2, V3, V4, V5 e V6 foram utilizadas tecidos de fibra de carbono fornecidos pela Rheotec Adtivos de Concreto Ltda, do tipo N-300, com as seguintes características fornecidas pelo fabricante:

- Largura = 50 mm;
- Espessura = 0,165 mm;
- Área da seção transversal = 82,50 mm²;
- Módulo de elasticidade = 235 GPa;
- Deformação específica na ruptura = 1,55 %;
- Resistência à tração > 3550 MPa;

Para o reforço das seis vigas foram usadas tiras de tecido de fibra de carbono com dimensões de 5 cm x 195 cm na parte inferior entre os apoios, e com dimensões de 5 cm x 195 cm na parte superior do balanço para as vigas V1, V2 e V3, e com dimensões de 10 cm x 195 cm na parte superior do balanço para as vigas V4, V5 e V6.

PRODUTOS NECESSÁRIOS PARA A APLICAÇÃO DO CFC

Para a colagem das tiras de tecido de fibras de carbono no reforço à flexão das vigas, foi necessária a aplicação dos quatro produtos descritos nos itens seguintes.

Argamassa para Reparo

Após a cura do concreto foi constatada a necessidade de aplicar uma argamassa de reparo na superfície superior da viga, na região que receberia o tecido, devido às irregularidades observadas. Foi usado então a Renderoc S30, da Fosroc, que é uma argamassa não retrátil, à base de cimento e polímero, usada para a execução de reparos superficiais de concreto onde são necessárias baixa permeabilidade e boa aderência ao substrato. Essa argamassa fornece aos 28 dias uma resistência à compressão de 28 MPa segundo prescrições do fabricante, o que torna viável sua aplicação neste estudo.

Em seguida, foi aplicada a Tec-Poxi PR da Rheotec, responsável pela aderência da argamassa epoxídica ao substrato. Esta resina é de uso obrigatório no sistema utilizado, e fornece uma resistência à tração em torno de 20 MPa após 24 horas.

Argamassa Epoxídica

Essa camada também conhecida como “adesiva” é responsável pela regularização final da superfície. Não é de uso obrigatório para este sistema de reforço, sendo usada neste caso para obtenção de uma regularização fina da superfície final. Foi empregada nesse trabalho a argamassa epoxídica Tec-Putty, da Rheotec, que possui uma resistência à compressão em torno de 60 MPa, e à tração em torno de 24 MPa após 24 horas.

Resina Epoxídica

Esta resina é a componente básica do sistema de reforço. Foi aplicada neste trabalho a Tec-Poxi da Rheotec, responsável pela aderência da argamassa epoxídica ao tecido de fibra de carbono. Possui uma resistência à compressão em torno de 60 MPa, e à tração em torno de 55 MPa após 24 horas de aplicação.

GEOMETRIA DAS VIGAS

As vigas são biapoiadas com um balanço, e possuem seção transversal retangular de 15 cm x 30 cm, e comprimento total de 400 cm.

Foram aplicadas duas cargas concentradas, uma na metade do vão entre os apoios e outra na extremidade do balanço. O esquema estático, o diagrama de momentos fletores e as armaduras internas das vigas são mostrados nas Figuras 1, 2 e 3, respectivamente.

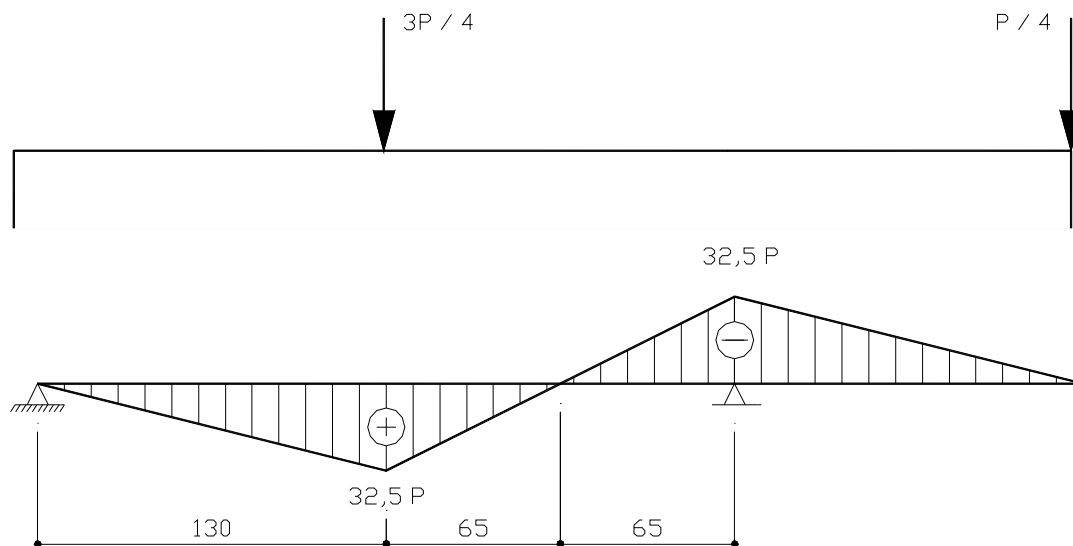


Figura 2: Diagrama de momentos fletores das vigas ensaiadas (momentos em kN*cm e cotas em cm).

Como as vigas foram dimensionadas inicialmente para se obter momentos máximos, negativo e positivo, iguais (NBR-6152 1980), quando do dimensionamento do reforço a flexão das vigas V1, V2 e V3, estas também receberam a mesma armadura de reforço, uma tira de CFC de 5 cm de largura, nessas duas regiões.

Após o término dos ensaios dessas três primeiras vigas reforçadas, decidiu-se que as demais vigas receberiam o dobro de armadura de reforço na região de momento negativo, uma vez que todas as vigas reforçadas ensaiadas romperam nessa região. A tira de CFC passou de 5 cm de largura para 10 cm de largura na região de balanço, e permaneceu com 5 cm de largura no vão biapoiado. Os detalhamentos das armaduras de reforço aplicados nas vigas V1, V2 e V3 e nas vigas V4, V5 e V6 são mostrados na Figura 4.

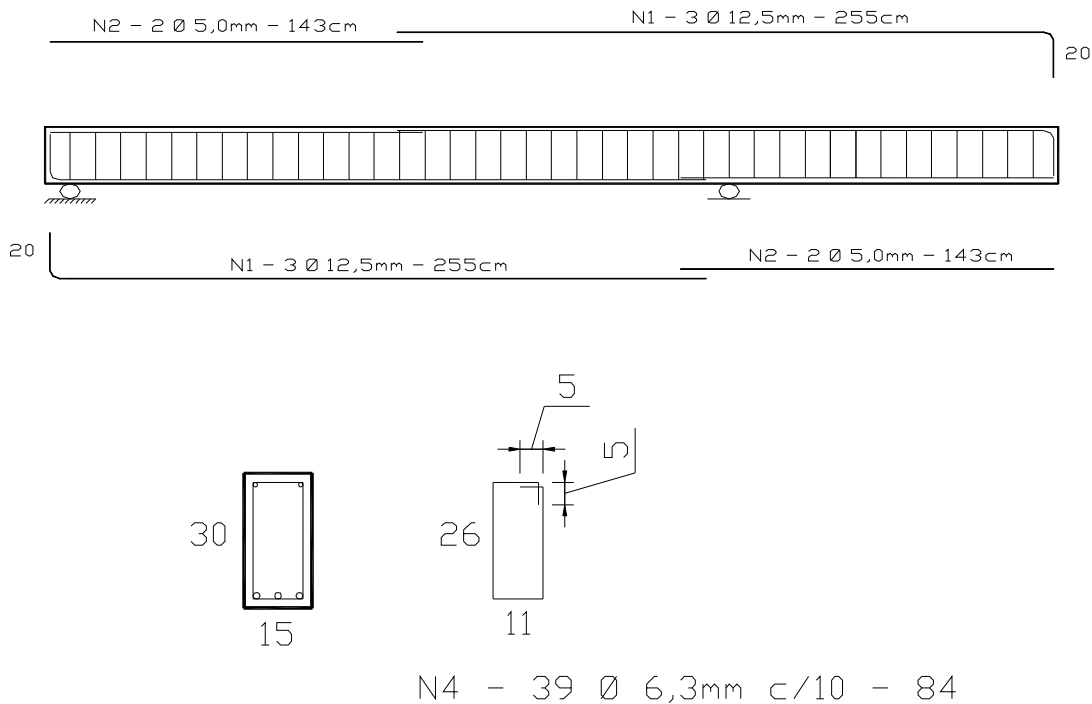


Figura 3: Detalhamento das armaduras das vigas (cotas em cm).

INSTRUMENTAÇÃO DAS VIGAS

Com o objetivo de verificar a eficiência do reforço e o comportamento das vigas, essas foram instrumentadas interna e externamente para medir as flechas e as deformações das armaduras de aço, como mostra a Figura 5.

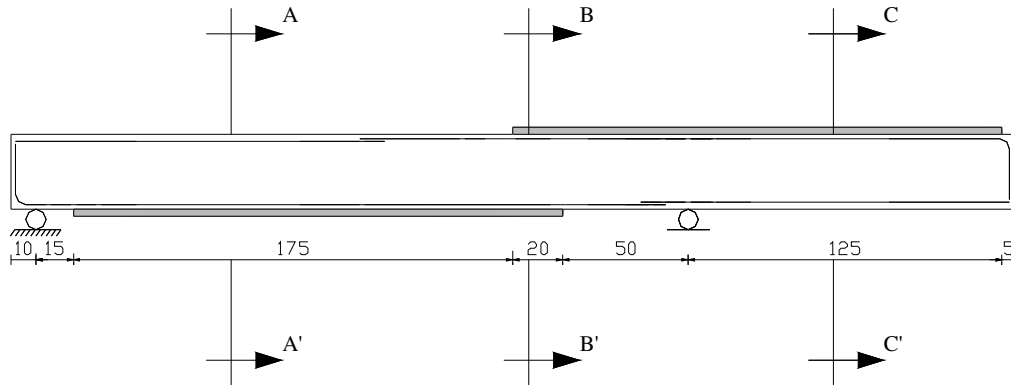
Os extensômetros elétricos de resistência foram usados para a determinação das deformações específicas nas armaduras. As flechas foram medidas por meio de deflectômetros elétricos. A leitura das cargas aplicadas foi realizada por meio de uma célula de carga com capacidade para 500 MPa. A leitura de aberturas de fissuras em alguns estágios de carregamento foi obtida com a utilização de uma lupa associada a uma escala graduada.

EXECUÇÃO DOS ENSAIOS DAS VIGAS

As vigas foram ensaiadas no Laboratório de Estruturas da Pontifícia Universidade Católica (PUC)-Rio, onde foi montado um sistema de pórtico para a sustentação de um macaco hidráulico com capacidade de 1000 kN.

Para a aplicação do reforço foi necessário interromper o ensaio e dar seqüência a este somente seis dias depois. Sendo assim, não foi possível manter o equipamento de aplicação de carga ligado durante esse tempo. Foi necessário então desenvolver um sistema de manutenção de carga, representando assim situações reais de reforços. Esse sistema foi executado por meio de parafusos fixados nas regiões próximas às duas regiões de aplicação das cargas, e apertados até

se alcançar a deformação existente na viga quando essa estivesse submetida a um carregamento que lhe fornecesse fissuras pouco menores que 0,2 mm. A Foto 1 mostra esse sistema de aplicação de carga.



Detalhe das seções das vigas V1, V2 e V3.

Detalhe das seções das vigas V4, V5 e V6.

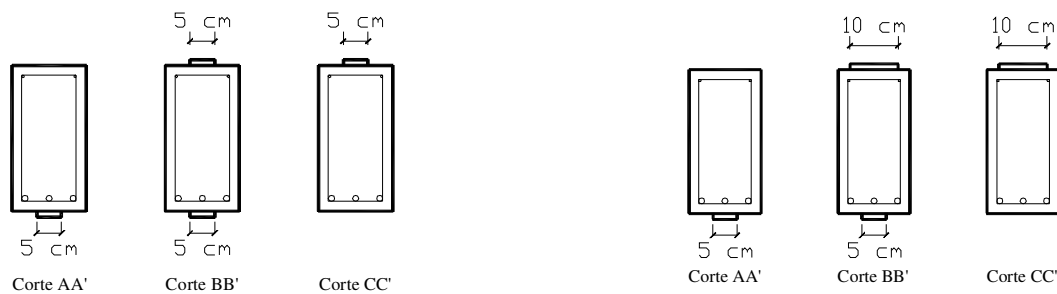


Figura 4: Disposições do tecido de CFC para as vigas reforçadas.

ENSAIO DAS VIGAS

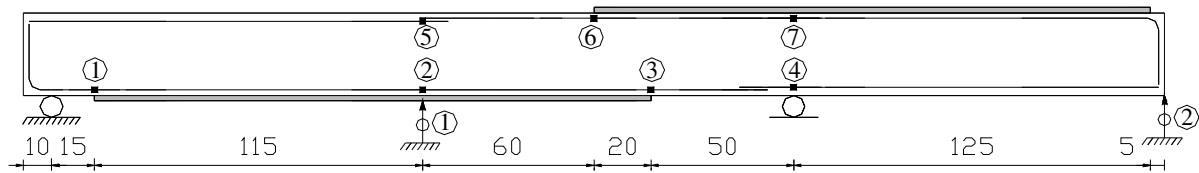
Viga de Referência – VR

As primeiras fissuras na VR surgiram com a aplicação de carga de 50 kN, porém, a fissuração tornou-se mais acentuada a partir da carga de 70 kN. A determinação da abertura das fissuras foi iniciada com a carga de 110 kN, quando foi observada uma fissura com abertura de 0,2 mm na região de momento máximo negativo. A fissuração aumentou até a aplicação da carga de 160 kN, quando se observou uma fissura com abertura de 0,8 mm na região em balanço.

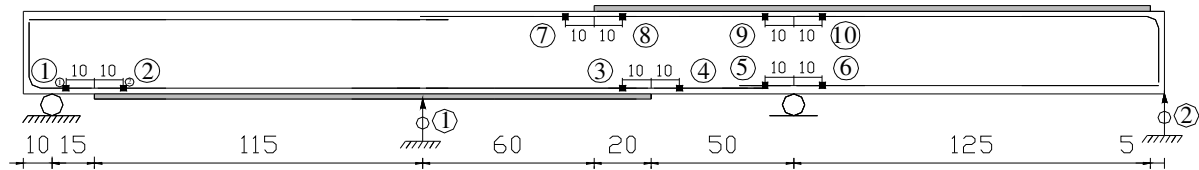
O incremento de carga inicial foi de 5 kN até se atingir 30 kN. Após esta carga o incremento passou a ser de 10 kN, até se atingir 170 kN. O rompimento da viga se deu por flexão na região de momento negativo, para uma carga de 176 kN, que superou um pouco o resultado teórico previsto de 162 kN. A Foto 2 ilustra o local onde ocorreu a ruptura da viga.


Um fator importante a ser ressaltado, é que teoricamente o momento positivo foi dimensionado para ser praticamente igual ao negativo, no entanto, além do rompimento ter ocorrido no balanço, esta região também apresentou uma fissuração mais intensa que a compreendida entre os dois apoios.

Vigas VR, V1 e V4 – vigas instrumentadas com sete extensômetros e dois deflectômetros



Vigas V2, V3, V5 e V6 – vigas instrumentadas com dez extensômetros e dois deflectômetros



Legenda:  ① extensômetro e sua respectiva posição na viga


 ① deflectômetro e sua respectiva posição em relação à viga

Figura 5: Detalhamento das seções instrumentadas (cotas em cm).



Foto 1: Pórtico utilizado para a realização dos ensaios.



Foto 2: Ruptura no balanço obtida para a viga de referência VR.

Vigas Reforçadas

A carga foi aplicada inicialmente em incrementos de 5 kN até se atingir 30 kN. Em seguida a aplicação foi em incrementos de 10 kN, até que fosse notado uma quantidade significativa de fissuras com aberturas consideráveis, pouco menores que 0,2 mm. Essa carga correspondia a cerca de 90 kN. O ensaio foi interrompido, o sistema de manutenção de carga aplicado, a máquina desligada e o reforço inicializado. Após o tempo mínimo necessário para a aplicação de carga, quatro dias após o término da aplicação do reforço segundo o fabricante, deu-se continuidade ao ensaio.

A ruptura nas vigas que receberam a mesma quantidade de reforço nas regiões de momentos máximos positivos e negativos, vigas V1, V2 e V3, ocorreu por flexão na região de momento máximo negativo, assim como para a viga de referência VR. Nas vigas V1 e V3 a ruptura se deu por intermédio da ruptura do tecido de fibra de carbono nessa região (Foto 3). Na viga V2, além da ruptura do tecido de fibra de carbono, houve também o descolamento da camada de regularização do concreto (Foto 4). Outro fato importante observado foi a fissuração, que foi muito mais intensa nas regiões de momento máximo negativo do que nas de máximo positivo.

Já as últimas três vigas, V4, V5 e V6, as quais tiveram suas armaduras de reforço, em relação às três primeiras vigas reforçadas, duplicadas na região de momento máximo negativo e mantidas na região de momento máximo positivo, e apresentaram significativas mudanças de comportamento. Primeiro em relação à fissuração, que se apresentou bastante homogênea nas duas regiões. Segundo em relação à ruptura. A viga V4, mesmo com o dobro da armadura na região em balanço, e apresentando uma fissuração com maiores aberturas na região de momento máximo positivo, rompeu na região de momento máximo negativo por intermédio da ruptura do tecido de fibra de carbono nessa região, porém, com uma carga superior às das três primeiras vigas ensaiadas. Já as vigas V5 e V6, romperam na região de momento máximo positivo também por intermédio da ruptura do tecido de fibra de carbono nessa região (Foto 5).

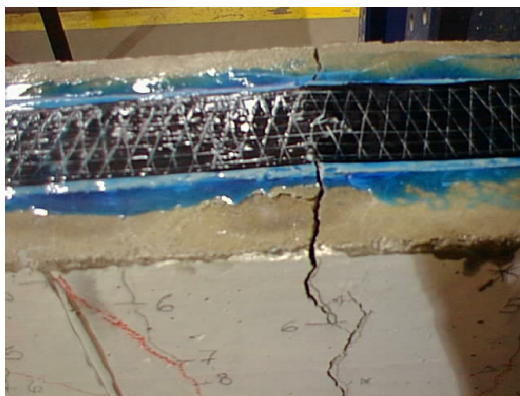


Foto 3: Ruptura no balanço das vigas V1, V3 e V4.



Foto 4: Ruptura no balanço da viga V2.



Foto 5: Ruptura na região de momento máximo das vigas V5 e V6.

Os valores para as cargas máximas e os valores teóricos calculados são mostrados na Tabela 4. A Tabela 5 mostra a relação entre os valores da resistência de cada viga e o da viga de referência. Logo após cada análise são tecidos comentários sobre as mesmas.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

O valor teórico obtido para a carga última da viga VR foi praticamente igual ao resultado experimental obtido.

A região em balanço se mostrou mais sensível aos esforços aplicados, uma vez que foi dimensionada para ter a mesma resistência que a região de momento máximo positivo, e recebendo a mesma área de reforço nas três primeiras vigas, e o dobro de armadura nas outras três, verificou-se que quatro das seis vigas reforçadas tiveram ruptura nesta região, além da viga de referência, ou seja, 66,67% das vigas reforçadas, e 71,42% do total das vigas romperam na região de momento máximo negativo.

As vigas mostraram um comportamento bastante uniforme, sendo os resultados encontrados compatíveis entre si, donde tornam-se válidos para uma análise comparativa.

Tabela 3: Resultado das vigas ensaiadas.

Viga	Armadura de reforço A _f (mm ²)		f _y (MPa)	f _c (MPa)	f _f (MPa)	Tipo de ruptura	P _{exp} (kN)	P _{teórico} (kN)	$\frac{P_{exp}}{P_{teórico}}$	Variação (%)
	Momento									
	positivo	negativo								
VR	0,00	0,00	642	26	-	Flexão no balanço	175,77	162,60	1,081	8,10
V1	8,25	8,25	642	26	1788	Flexão no balanço	206,15	179,43	1,149	14,89
V2	8,25	8,25	642	29	2051	Flexão no balanço	219,55	183,50	1,196	19,65
V3	8,25	8,25	642	29	2051	Flexão no balanço	200,52	183,50	1,093	9,28
V4	8,25	16,50	642	29	2062	Flexão no balanço	227,97	183,68	1,241	24,11
V5	8,25	16,50	642	29	2062	Flexão no vão	207,50	183,68	1,130	12,97
V6	8,25	16,50	642	29	2071	Flexão no vão	215,46	183,84	1,172	17,20

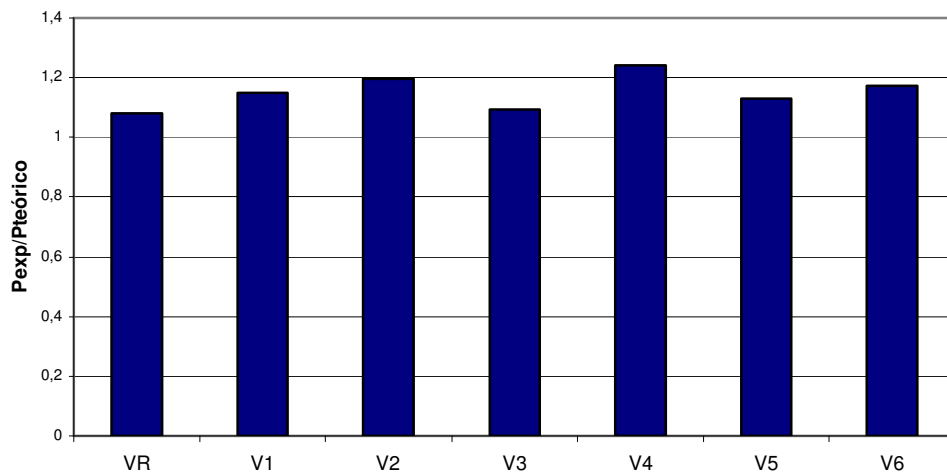


Figura 6: Gráfico comparativo entre as cargas de ruptura experimentais e teóricas.

Para as vigas com reforço na região de balanço igual ao reforço na região biapoiada, $A_{f(bal.)} = A_{f(vão)}$, o acréscimo da resistência teórico médio foi de 12,1 %, e para o experimental foi de 18,8 %, ou seja, 6,7 % superior. Observa-se que todos os valores experimentais foram superiores aos valores teóricos (Tabela 4).

Para as vigas com reforço na região de balanço igual ao dobro do reforço na região biapoiada, $A_{f(bal.)} = 2A_{f(vão)}$, o acréscimo da resistência teórico médio foi de 13,0 %, e para o experimental foi de 23,5 %, ou seja, 10,5 % superior. Observa-se que todos os valores experimentais foram superiores aos valores teóricos (Tabela 4).

A diferença entre a variação média teórica das vigas do primeiro grupo (V1, V2 e V3), em relação às vigas do segundo grupo (V4, V5 e V6), foi de 0,9 %. Já a variação experimental média entre esses grupos foi de 4,7 %.

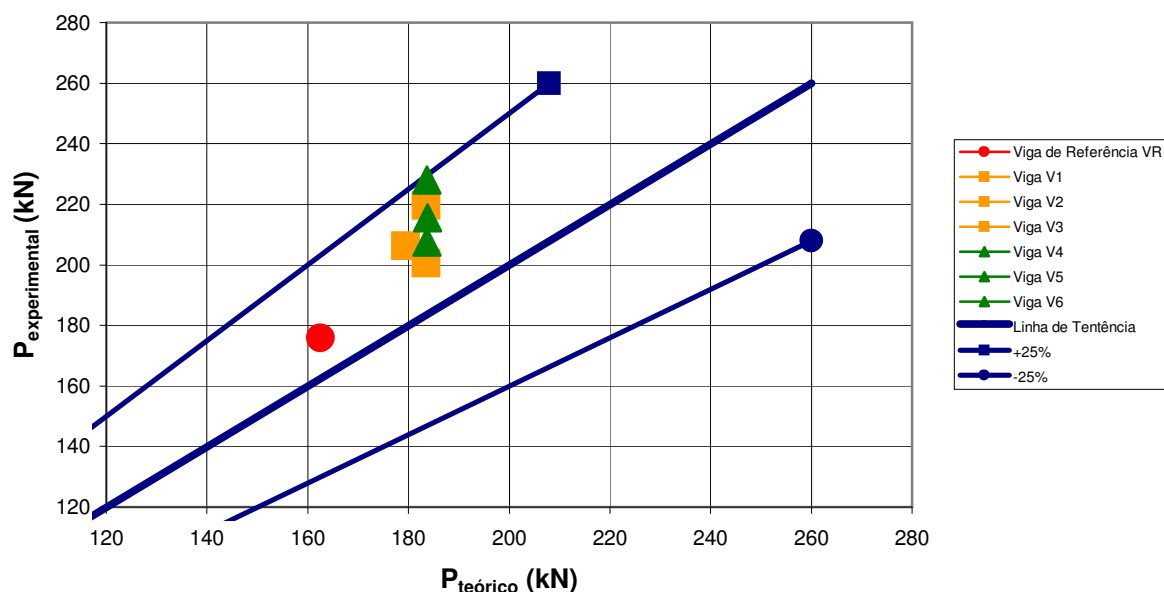


Figura 7: Gráfico comparativo entre as cargas de ruptura teóricas e experimentais das vigas reforçadas e da viga de referência.

Tabela 4 : Acréscimo da resistência nas vigas reforçadas.

Razão	Valor Teórico	Variação (%)	Variação média (%)	Valor Experimental	Variação (%)	Variação média (%)
$\frac{V1}{VR}$	1,104	10,4	12,1	1,173	17,3	18,8
$\frac{V2}{VR}$	1,129	12,9		1,249	24,9	
$\frac{V3}{VR}$	1,129	12,9		1,141	14,1	
$\frac{V4}{VR}$	1,130	13,0	13,0	1,297	29,7	23,5
$\frac{V5}{VR}$	1,130	13,0		1,181	18,1	
$\frac{V6}{VR}$	1,131	13,1		1,226	22,6	

Ductilidade

As vigas ensaiadas foram analisadas quanto à ductilidade de acordo com o método de (NAAMAN 1995), que utiliza critérios energéticos. Segundo esses autores, pode-se aplicar esse estudo para as flechas, curvaturas e rotações. Neste trabalho a ductilidade foi analisada quanto à flecha e quanto à deformação, por meio dos gráficos de carga x flecha e de carga x deformação, respectivamente, obtidos experimentalmente. Avaliou-se a ductilidade da viga também pela deformação do aço. A expressão para a ductilidade energética escreve-se:

$$\mu = \frac{1}{2} \left(\frac{E_{Total}}{E_{Elástica}} + 1 \right)$$

onde μ é o índice de ductilidade, E_{Total} é a energia total e $E_{Elástica}$ é a energia elástica.

A ductilidade de deformação das vigas foi analisada somente nas regiões de momento máximo. Não foi possível calcular a ductilidade de deformação para a viga V2, uma vez que as leituras dos extensômetros dessa viga foram perdidas na segunda etapa do ensaio, o que não possibilitou a obtenção dos gráficos $P \times \delta$.

Primeiramente a ductilidade energética foi analisada por meio de flechas, em seguida efetua-se uma comparação entre as médias das ductilidades energéticas de deformação e de flecha.

Ductilidade Energética de Flecha

Na Tabela 5 são mostradas as ductilidades energéticas obtidas para cada viga, onde μ é o índice de ductilidade energética; μ_D , o índice de ductilidade energética de deformação; $\bar{\mu}_D$, o índice médio de ductilidade energética de deformação; μ_F , o índice de ductilidade energética de flecha; $\bar{\mu}_F$, o índice médio de ductilidade energética de flecha; μ_{F1} , o índice de ductilidade energética obtido por meio do diagrama $P \times \delta$ do deflectômetro localizado na posição 1 e μ_{F2} é o índice de ductilidade energética obtido por meio do diagrama $P \times \delta$ do deflectômetro localizado na posição 2.

Para a viga VR, as ductilidades energéticas obtidas por meio de valores lidos no deflectômetro 1 são menores que as ductilidades energéticas obtidas por meio de valores lidos no deflectômetro 2, isto é, $\mu_{F1} < \mu_{F2}$, indicando que a região do balanço acumula mais energia que a região biapoiada.

Para as vigas com reforço na região de balanço igual ao reforço na região biapoiada, $A_{f(bal.)} = A_{f(vão)}$, as ductilidades energéticas obtidas por meio de valores lidos no deflectômetro 1 são menores que as ductilidades energéticas obtidas por meio de valores lidos no deflectômetro 2, $\mu_{F1} < \mu_{F2}$. Verifica-se assim uma maior acumulação de energia na região do balanço.

Para as vigas com reforço na região de balanço igual ao dobro do reforço na região biapoiada, $A_{f(bal.)} = 2A_{f(vão)}$, que romperam na região de momento positivo (vigas V5 e V6), as ductilidades energéticas obtidas por meio de valores lidos no deflectômetro 1 são maiores que as ductilidades energéticas obtidas por meio de valores lidos no deflectômetro 2, $\mu_{F1} > \mu_{F2}$, o que era previsto, pois a seção em balanço foi enrijecida. Para a viga V4, cujo reforço foi duplicado na região em balanço, mas mesmo assim rompeu na região de momento máximo negativo, obteve-se $\mu_{F1} < \mu_{F2}$, como nas quatro primeiras vigas ensaiadas.

Verifica-se dessa análise que a ductilidade energética para a flecha é um critério plausível para avaliar o comportamento do reforço à flexão com CFC de vigas de concreto armado.

O acréscimo de reforço no balanço reduz a ductilidade energética nessa região, tal como observado nos resultados obtidos para as vigas V5 e V6.

Ductilidade Analisada Por Meio dos Valores Médios

Na Tabela 6 são comparadas as médias das ductilidades energéticas de deformação e de flecha.

Para a viga de referência VR a média das ductilidades energéticas obtidas por meio das deformações são maiores que as ductilidades energéticas obtidas por meio das flechas, isto é, $\bar{\mu}_D > \bar{\mu}_F$.

Para as vigas com reforço na região de balanço igual ao reforço na região biapoiada, $A_{f(bal.)} = A_{f(vão)}$, as ductilidades energéticas obtidas por meio das deformações são maiores que as ductilidades energéticas obtidas por meio das flechas, isto é, $\bar{\mu}_D > \bar{\mu}_F$, assim como para a viga VR. Para a viga V2 não foi possível obter a média das ductilidades devido à deformação, pois não foram lidos os valores dos extensômetros na segunda etapa dos ensaios.

Tabela 5: Ductilidades energéticas para as vigas ensaiadas.

Vigas	Local		μ	$\bar{\mu}$	Variação (%)
VR	Extensômetro no aço	Deformação 2	1,54	1,50	16,67
		Deformação 4	1,15		
		Deformação 5	1,11		
		Deformação 7	2,20		
	Deflectômetro	Flecha 1	1,20	1,25	
		Flecha 2	1,30		
V1	Extensômetro no aço	Deformação 4	2,03	2,09	9,09
		Deformação 5	2,10		
		Deformação 7	2,13		
	Deflectômetro	Flecha 1	1,86	1,90	
		Flecha 2	1,93		
	V2	Extensômetro no aço	*	*	
Deflectômetro		Flecha 1	1,76	1,80	
		Flecha 2	1,84		
V3	Extensômetro no aço	Deformação 5	1,16	2,11	13,74
		Deformação 6	2,27		
		Deformação 9	1,38		
		Deformação 10	3,61		
	Deflectômetro	Flecha 1	1,50	1,82	
		Flecha 2	2,14		
V4	Extensômetro no aço	Deformação 2	2,67	1,80	2,78
		Deformação 4	1,54		
		Deformação 5	1,33		
		Deformação 7	1,65		
	Deflectômetro	Flecha 1	1,61	1,75	
		Flecha 2	1,89		
V5	Extensômetro no aço	Deformação 5	1,53	1,54	18,08
		Deformação 6	1,54		
	Deflectômetro	Flecha 1	1,89	1,88	
		Flecha 2	1,86		
V6	Extensômetro no aço	Deformação 6	1,20	1,25	3,85
		Deformação 10	1,29		
	Deflectômetro	Flecha 1	1,35	1,30	
		Flecha 2	1,24		

(*) os canais dos extensômetros foram perdidos durante o ensaio.

Para as vigas com reforço na região de balanço igual ao dobro do reforço na região biapoiada, $A_{f(bal.)} = 2A_{f(vão)}$, que romperam na região de momento positivo (vigas V5 e V6), as ductilidades energéticas obtidas por meio das deformações são menores que as ductilidades energéticas obtidas por meio das flechas, isto é, $\bar{\mu}_D < \bar{\mu}_F$. Já a viga V4, cujo reforço foi duplicado na região em balanço mas mesmo assim rompeu na região de momento máximo negativo, obteve-se $\bar{\mu}_D > \bar{\mu}_F$, como nas quatro primeiras vigas ensaiadas.

Tabela 6: Comparação entre as ductilidades energéticas médias $\bar{\mu}_D$ e $\bar{\mu}_F$.

Reforço	Vigas	$\bar{\mu}_D$	$\bar{\mu}_F$	Variação (%)
Sem reforço	VR	1,50	1,25	16,67
vão = A_f	V1	2,09	1,90	9,09
	V2	*	1,80	*
balanço = A_f	V3	2,11	1,82	13,74
vão = A_f	V4	1,80	1,75	2,78
	V5	1,54	1,88	18,08
balanço = $2A_f$	V6	1,25	1,30	3,85

(*) os canais dos extensômetros foram perdidos durante o ensaio.

A análise da ductilidade energética para a deformação forneceu resultados coerentes, o que confere a este parâmetro uma característica de balizador da análise do comportamento e do desempenho das vigas reforçadas. O acréscimo de reforço diminui a ductilidade energética relativa às deformações.

CONCLUSÕES

Este trabalho avalia o comportamento e o desempenho de seis vigas de concreto armado reforçadas à flexão. As vigas, biapoiadas e com um vão em balanço, possuem mesmas seções transversais, armaduras e vãos. O concreto usado, calculado inicialmente para atingir 20 MPa , alcançou resistência à compressão de até 29 MPa . Foram ensaiadas uma viga de referência, que não recebeu reforço, três vigas que receberam armadura de reforço na região de momento negativo igual à do momento positivo, e outras três vigas cuja armadura de reforço na região do momento negativo foi duplicada, e na de momento positivo mantida. Este estudo foi restrito a uns poucos parâmetros, para possibilitar uma melhor avaliação do comportamento estrutural das vigas reforçadas, levando a resultados mais fundamentados e consistentes, evitando-se a dispersão de resultados face a uma ampla gama de variáveis que interferem neste comportamento. Fatos como a aplicação de um pré-carregamento, existência de um balanço e vigas com dimensões reais, evitando o fator escala em relação ao comportamento estrutural, tornam os ensaios realizados mais próximos da realidade.

Um fator importante a ser ressaltado é em relação ao carregamento realizado, onde houve a preocupação em se obter o momento máximo positivo igual ao momento máximo negativo, possibilitando a comparação entre a região biapoiada e a região em balanço (Araújo 2002). Os ensaios mostraram um comportamento diferenciado dessa última região em relação à região compreendida entre os dois apoios.

A carga resistida pelas vigas foi aumentada em torno de 21% após essas receberem o reforço, valor superior ao calculado por meio de modelos teóricos, em torno de 13%, mas dentro do esperado, validando a sistemática de cálculo utilizada. Notou-se também que não houve uma correlação direta entre a quantidade de área do reforço e o aumento da resistência da viga. Esses fatos indicam que outros parâmetros, tais como a deformação específica do aço e do concreto, as flechas, a ductilidade energética e a rigidez, devem ser levados em consideração numa análise de vigas reforçadas com CFC.

Nesses ensaios não ocorreram problemas nas ancoragens dos reforços, fato que diferiu de vários outros trabalhos encontrados na literatura, onde vigas romperam por descolamento do material de reforço. A utilização de um dimensionamento apurado, aliado a cuidados especiais na execução do reforço, levou ao sucesso dos ensaios, ou seja, alcançou-se a ruptura por flexão em todas as vigas.

Analisando-se os índices de ductilidade das vigas tem-se as seguintes conclusões:

- a) o método de ductilidade energética utilizado mostrou-se consistente para uma análise do comportamento estrutural de vigas reforçadas com CFC;
- b) sugere-se neste trabalho o cálculo da ductilidade energética por meio da deformação na armadura, uma vez que seus resultados apresentaram correlação com os obtidos para a ductilidade energética de flecha;
- c) com os resultados encontrados por meio dos índices de ductilidade, foi possível verificar o aumento da rigidez das vigas quando do aumento de armadura de reforço na estrutura, confirmando assim que há uma correlação entre a rigidez e o aumento de resistência da peça reforçada;

Os resultados experimentais confirmam a eficiência do reforço com CFC em vigas de concreto armado, mostrando ser essa uma alternativa muito interessante para o reforço estrutural desses elementos. Sua facilidade e rapidez de aplicação são fatores que também merecem destaque.

REFERÊNCIAS

- Araújo, A. C.N. (2002). “Estudo Experimental do Reforço à Flexão de Vigas de Concreto Armado Utilizando Compósito de Fibra de Carbono.” Dissertação de Mestrado, PUC–Rio. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR-5738 (1993). *Moldagem e Cura de Corpos-de- Prova de Concreto Cilíndricos ou Prismáticos*, Brasil.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR-5739 (1994). *Concreto: Ensaio de Compressão de Corpos-de-Prova de Concreto Cilíndricos*, Brasil.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR-6118 (2000). *Projeto de Estruturas de Concreto*, Brasil.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR-6152 (1980). *Determinação das Propriedades Mecânicas à Tração de Materiais Metálicos*, Brasil.
- Beber, A.J., Campos Filho, A. e Campagnolo, J. L. (2000). “Reforço de Estruturas de Concreto com Tecidos de Fibra de Carbono.” *XXIX Jornadas Sudamericanas Ingenieria Estructural*, CD-ROM. Uruguay.
- Da Silva, A. O. B. e Moreno JR., A. L. (2000). “Reforço à Flexão em Vigas de Concreto de Alta Resistência à Compressão Através de Colagem Externa de Mantas Flexíveis de Fibras de Carbono (PRFC).” *XXIX Jornadas Sudamericanas de Ingenieria Estructural*, CD-ROM. Uruguay.
- El-Mihilmy, M. e Tedesco, J.W. (2001). “Prediction of Anchorage Failure for Reinforced Concrete Beams Strengthening with Fiber-Reinforced Polymer Plates.” *ACI Structural Journal*, 98(3), 301-314.
- Grace, N. F. (2001). “Strengthening of Negative Moment Region of Reinforced Concrete Beams Using Carbon Fiber-Reinforced Polymer Strips.” *ACI Structural Journal*, 98(3), 347-358.
- Naaman, A. E. e Jeong, S.M. (1995). “Structural Ductility of Concrete beams Prestressed with FRP Tendons. In: Non Metallic (FRP) Reinforcement of Concrete Structures.” *Proceedings of the Second International RILEM Symposium (FRPRCS-2). E&F.N. SPON*, 379-386. Great Britain.
- Pinto, C. T. M. P. (2000). “Reforço à Flexão de Vigas de Concreto Armado com Fibras de Carbono.” Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro.
- Shehata, I. A. E. M., Cerqueira, E. C., Pinto, C. T. M. e Shehata, L. DA C. D. (2000). “Reforço de Vigas de Concreto com Fibras de Carbono.” *XXIX Jornadas Sudamericanas de Ingenieria Estructural*, CD-ROM. Uruguay.
- Spaeda, G., Bencardino, F. e Swamy, R.N. (1998). “Structural Behavior of Composite RC Beams with Externally Bonded CFRP.” *Journal of Composites for Construction*, 2(3), 132-137.
- Ziraba, Y.N., Baluch, M. H., Basunbul, I. A., Sharif, A. M., Azad, A. K. e Al-Sulaimani, G. J. (1994). “Guidelines Toward the Design of Reinforced Concrete Beams with External Plates.” *ACI Structural Journal*, 91(6), 639-646.

