

Estudo Experimental do Reforço à Força Cortante de Corpos-de-prova de Concreto com Compósitos de Fibras de Carbono

*Tatiana Cardoso d'Almeida Diogo**

*Emil Sánchez***

*Luiz Antonio Vieira Carneiro****

Resumo

Este trabalho teve como objetivo avaliar experimentalmente a resistência à força cortante de corpos-de-prova prismáticos de concreto reforçados com compósito de resina e fibras de carbono (CFC). Para tanto foram ensaiados dezoito corpos-de-prova prismáticos (15 cm x 15 cm x 50 cm) utilizando-se o teste modificado IOSIPESCU (1967). Os parâmetros adotados foram a resistência média do concreto à compressão (20 MPa, 50 MPa e 70 MPa), o número de camadas de reforço (uma ou duas) em ambos os lados e o ângulo de inclinação do CFC em relação à direção do maior comprimento dos corpos-de-prova (0°, 15° e 30°). Constatou-se que para maiores valores de resistência média do concreto à compressão, maiores os valores da força de ruptura e da tensão de aderência entre o CFC e o substrato de concreto nos corpos-de-prova. Na maioria dos casos os corpos-de-prova reforçados com duas camadas apresentaram menores resistências que os reforçados com uma camada, sendo essa tendência mais destacada para os concretos de maior resistência à compressão. Foi verificado, em geral, que os maiores valores da força de ruptura foram para os corpos-de-prova que tiveram a camada de reforço colada a 15°, independentemente do número de camadas de reforço.

Palavras-chave: Compósitos de Fibras de Carbono; Ensaio de Iosipescu; Concreto Estrutural.

1 Introdução

A técnica de reforço de elementos de concreto estrutural com compósitos de fibras de carbono (CFC) já está consagrada pelo uso, e tem-se se mostrado eficiente e de ótimo custo-benefício.

Este artigo relata o estudo experimental (DIOGO, 2010) realizado para avaliar a resistência à força cortante de corpos-de-prova de concreto reforçados com folhas unidirecionais de compósito de resina e fibras de carbono.

Uma das formas de ensaios existentes para corpos-de-prova de aço ao cisalhamento é o ensaio elaborado por IOSIPESCU (1967), que será adotado neste trabalho com algumas modificações. Os corpos-de-prova serão reforçados com CFC na região de maior solicitação à força cortante, onde surge a fissura que precede a ruptura do corpo-de-prova.

Nas formulações teóricas admite-se que a resistência nominal à força cortante de um elemento

estrutural é obtida a partir do somatório das resistências dos materiais que o compõem, ou seja, é igual à soma da parcela resistente à força cortante relativa ao concreto e da parcela resistente à força cortante relativa ao CFC. Sendo o objetivo deste estudo avaliar a parcela resistida pelo CFC variando-se a inclinação do reforço em relação ao eixo longitudinal do corpo-de-prova.

Os ensaios e formulações deste trabalho são aliceadas em ROSS (2002) e ADAM e WALRATH (1983).

2 Programa Experimental

2.1 Concreto

Os corpos-de-prova de concreto simples reforçados ao cisalhamento com CFC tinham as seguintes características: 1) resistências médias do concreto à

* M. Sc., Engenheira do Exército Brasileiro.

** D. Sc., Professor do PPGECC da UFF.

*** D. Sc., Professor do Instituto Militar de Engenharia.

compressão – 20 MPa, 50 MPa e 70 MPa; 2) reforço com uma e duas camadas de CFC em ambos os lados dos corpos-de-prova; 3) ângulo de inclinação do CFC em relação ao comprimento longitudinal dos corpos-de-prova igual a 0°, 15° e 30°.

Foram ensaiados 18 corpos-de-prova com dimensões de 50 cm de comprimento e seção transversal quadrada de 15 cm, reforçados em ambos os lados com CFC de 21 cm de comprimento e 5 cm de largura. Os corpos-de-prova reforçados se diferenciam em função das variáveis adotadas, sendo identificados de acordo com a seguinte nomenclatura:

I 0/1 I 0/2 I 15/1 I 15/2 I 30/1 I 30/2
 II 0/1 II 0/2 II 15/1 II 15/2 II 30/1 II 30/2
 III 0/1 III 0/2 III 15/1 III 15/2 III 30/1 III 30/2

Os algarismos romanos **I**, **II** e **III** referem-se à resistência do concreto, $f_c = 20$ MPa, $f_c = 50$ MPa e $f_c = 70$ MPa, respectivamente. Os números 0, 15 e 30 correspondem aos ângulos de inclinação do CFC em relação à direção do maior comprimento do corpo-de-prova. Os números finais indicam o número de camadas empregado em cada lado do corpo-de-prova.

A concretagem dos corpos-de-prova cilíndricos e prismáticos e os ensaios foram realizados no laboratório de Materiais de Construção e Concreto do IME. Foram realizadas três séries de concretagem com as seguintes dosagens em massa: 1:2,18:2,87:0,54, 1:1,67:2,34:0,39 e 1:1,44:2,07:0,32 (cimento : areia : agregado graúdo : relação água/aglomerante), para a obtenção de resistência à compressão de 20 MPa, 50 MPa e 70 MPa, respectivamente. A Tabela 2.1 apresenta as quantidades de materiais empregados por metro cúbico de concreto. O cimento empregado foi o CP II – Ultra Forte da Holcim para $f_c = 20$ MPa e $f_c = 50$ MPa e o CP V – Ultra Rápido da Holcim para $f_c = 70$ MPa.

A areia para o $f_c = 20$ MPa tinha dimensão máxima característica D_{max} inferior à 4,8 mm e para $f_c = 50$ MPa tinha valor inferior à 2,4 mm. Para $f_c = 70$ MPa foi utilizada areia com 40% de dimensão máxima característica de 1,2 mm, 30% de 0,6 mm e 30% de 0,3 mm. A brita gnaisse empregada foi previamente lavada, sendo que metade em peso do tipo "0" ($D_{max} = 9,5$ mm) e metade do tipo "1" ($D_{max} = 19,0$ mm) para $f_c = 20$ MPa, e somente do tipo "0" para as demais resistências.

Para $f_c \geq 50$ MPa foram empregados microssilica

Silmix e superplastificante Muraplast FK22 da MC-Bauchemie Brasil Indústria e Comércio Ltda (Tabela 3.1).

Na concretagem dos corpos-de-prova foram executados ensaios de abatimento do tronco de cone para cada betonada; os corpos-de-prova cilíndricos de dimensões 150 mm × 300 mm foram moldados de acordo com a NBR 5738:2003, para avaliação da resistência à compressão simples, resistência à tração indireta do concreto e módulo de elasticidade do concreto. A Tabela 2.2 apresenta os valores do abatimento do tronco de cone obtidos para cada betonada.

Tabela 2.2 – Valores do abatimento de tronco de cone.

Abatimento de tronco de cone (mm)		
$f_c = 20$ MPa	$f_c = 50$ MPa	$f_c = 70$ MPa
100	100	140

Para se determinar a resistência à compressão simples do concreto foram realizados ensaios de compressão em obediência à norma NBR 5739:1994, na data de execução dos ensaios de avaliação do reforço ao cisalhamento dos corpos-de-prova de concreto reforçados com CFC. A Tabela 2.3 mostra os valores obtidos para a resistência do concreto à compressão simples.

Tabela 2.3 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão do concreto.

f_c (MPa)	CP	f_c (MPa)	Idade (dias)	Valores Estatísticos (MPa)
20	1	22,9	133	Média = 20,8
	2	19,6	133	D. P. = 1,46
	3	20,0	133	Coef. variação = 7,03%
50	1	58,1	126	Média = 51,1
	2	53,3	126	D. P. = 4,92
	3	47,1	126	Coef. variação = 9,63%
	4	45,9	126	
70	1	76,3	119	Média = 71,1
	2	70,3	119	D. P. = 3,99
	3	66,6	119	Coef. variação = 5,61%

As resistências à compressão médias foram:

- série I $f_{cm} = 20,8$ MPa;
- série II $f_{cm} = 51,1$ MPa;
- série III $f_{cm} = 71,1$ MPa.

Tabela 2.1 – Consumo de material por metro cúbico de concreto.

MATERIAL	QUANTIDADE POR M ³		
	$f_c = 20$ MPa	$f_c = 50$ MPa	$f_c = 70$ MPa
Cimento (kg)	352	401	457
Microssilica (kg)	–	40	46
Areia (kg)	766	736	726
Brita (kg)	1.010	1.034	1.039
Água (l)	190	174	160
Superplastificante (l)	–	6,2	8,5

Para se obter a resistência à tração indireta do concreto foram realizados ensaios de tração por compressão diametral em obediência à NBR 7222:1994. Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 2.4.

A obtenção do valor do módulo de elasticidade longitudinal do concreto foi realizada por meio de ensaios em obediência à norma NBR 8522:2008. Para a determinação do módulo de elasticidade do concreto utilizou-se o plano de carga tipo III, que corresponde à simulação de uma estrutura em seu primeiro carregamento, onde se calcula apenas o módulo de deformação secante.

Tabela 2.4 – Resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral.

f_{cm} (MPa)	Corpos-de-prova	$f_{ct,sp}$ (MPa)	Idade (dias)	Média (MPa)
20,8	1	3,37	201	3,40
	2	3,43	201	
51,1	1	4,87	196	4,81
	2	4,75	196	
71,1	1	5,83	189	5,83

A NBR 8522:2008 prescreve que somente devem ser considerados válidos os resultados de ensaios de corpos-de-prova cujas resistências não diferem mais de 20% da resistência prevista f_c , e que o módulo secante adotado corresponde à tensão $0,3f_{c,28}$. Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 2.5.

2.2 Compósito de Fibras de Carbono

O material estrutural do CFC empregado no reforço foi o tecido de fibras de carbono Tec-fiber da RheoSet (Figura 2.1) cortado em tiras de 5 cm de largura e 21 cm de comprimento. As características técnicas fornecidas pelo fabricante são as seguintes: 1) base em tecido de fibras de carbono unidirecional; 2) cor preta; 3) massa específica= 300 g/m²; 4) largura= 50 cm; 5) espessura=0,165 mm; 6) módulo de elasticidade= 235 GPa; 7) resistência à tração= 3.550 MPa; 8) deformação específica na ruptura= 1,55%.

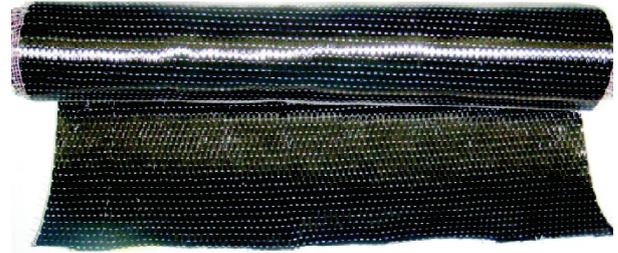


Figura 2.1 – Tecido de fibras de carbono Tec-fiber da RheoSet.

Antes da colagem dos tecidos de fibras de carbono, os corpos-de-prova foram previamente limpos com álcool. Em seguida foi aplicada a resina de imprimação Tec-Poxi PR da RheoSet, que é responsável pela aderência perfeita da camada de resina epoxídica ao substrato de concreto. A resina de imprimação tem as seguintes características fornecidas pelo fabricante: 1) o aspecto é de um líquido incolor; 2) bicomponente na proporção em massa de 66,7% do componente A e 33,3% do componente B; 3) viscosidade (CF4)= 65 a 75 segundos; 4) massa específica= 1,05 g/cm³; 5) sólido por volume no mínimo de 98%; 6) tempo de vida útil da mistura (*pot-life*)= 40 min (25°); 7) secagem ao toque= 4 horas; 8) secagem ao manuseio= 6 horas; 9) secagem completa= 10 horas; 10) cura final em 7 dias; 11) alongamento por ruptura= 0,218 mm/mm; 12) resistência à tração= 20 MPa ± 2 MPa (após 24 horas); 13) rugosidade do substrato de 60 a 80 microns; 14) tempo de aplicação= 2 horas a 10° C, 1 hora a 20° e 15 minutos a 35° C; 15) rendimento= 250 g/m² a 300 g/m².

Para a colagem dos tecidos de fibras de carbono nos corpos-de-prova, foi empregada a resina saturante epoxídica Tec-poxi da RheoSet com as seguintes características fornecidas pelo fabricante: 1) o aspecto é de um líquido viscoso azul transparente; 2) bicomponente na proporção em massa de 66,7% do componente A e 33,3% do componente B; 3) viscosidade (CF4)= 50 +/- 5 segundos (150 – 200 cps); 4) massa específica= 1,06 g/cm³; 5) sólido por volume no mínimo de 98%; 6) tempo de vida útil da mistura (*pot-life*)= 60 min (25°); 7) cura final em 7 dias; 8) resistência à compressão= 60 MPa mínimo (7 dias – 25° C); 9) consumo= 1,1 kg por m²/mm de espessura.

Tabela 2.5 – Módulo de elasticidade longitudinal secante do concreto.

f_{cm} (MPa)	CP	Tensão de ruptura (MPa)	Tensão p/ $0,3f_c$ (MPa)	Deform. específica p/ $0,3f_c$ (‰)	Deform. específica p/ $0,5 MPa$ (‰)	Módulo de elasticid. secante (GPa)
20,8	1	28,91	9,0	0,325	0,019	19,8
51,1	1	68,8	15,0	0,505	0,055	32,3
71,1	1	59,79	21,0	0,614	0,054	36,5
	2	72,9	21,0	0,627	0,117	40,8
						Média = 38,65

Para obtenção da resistência à tração do CFC foram realizados ensaios em corpos-de-prova de CFC em obediência à norma ASTM D 3039 / D 3039 M.

Foram realizados ensaios à tração em três corpos-de-prova de uma camada de CFC unidirecional revestidos com resina epoxídica, com dimensões de 1,5 cm de largura e 25 cm de comprimento. O ensaio foi realizado na máquina EMIC DL 10000 do Laboratório de Ensaios Mecânicos do IME (Figura 2.2). Foram coladas, com a mesma resina epoxídica, duas (uma em cada lado) pequenas chapas de alumínio (placas de fixação) em cada uma das extremidades da amostra. Foram feitas ranhuras em ambos os lados de cada uma das "chapas" para promover uma melhor aderência entre a mesma e o tecido de fibras de carbono, e desse modo evitar o escorregamento entre a garra de fixação e o corpo-de-prova. Para determinação da tensão de ruptura, a espessura considerada foi a indicada pelo fabricante de 0,165 mm. Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 2.6.



Figura 2.2 – Ensaio à tração do CFC na máquina EMIC DL 10000.

2.3 Corpos-de-prova Reforçados com CFC

Os corpos-de-prova prismáticos foram confeccionados em formas metálicas untadas com óleo, e tinham seção retangular de 15 cm de lado e 50 cm de comprimento.

O concreto foi lançado manualmente e o adensamento foi realizado por meio de vibrador de imersão, durante e imediatamente após a colocação do concreto nas formas. Os corpos-de-prova foram retirados das formas após sete dias após a concretagem e permaneceram submersos em tanque de água e cal por um período de 14 dias.

Antes da aplicação do reforço em CFC os corpos-de-prova foram limpos com álcool. Posteriormente foi marcado a lápis o posicionamento do reforço. Em seguida foi aplicada uma demão de resina de imprimação. No dia seguinte à imprimação foi dada uma demão de resina epoxídica nos corpos-de-prova e outra na manta de fibras de carbono. Desse modo foi feita a colagem do CFC aos corpos-de-prova, pressionando-os de modo a retirar todo o ar entre os materiais. Para finalizar foi dada mais uma demão da resina epoxídica no tecido conforme orientações do fabricante.

Para medir a deformação específica do CFC durante o ensaio de cisalhamento dos corpos-de-prova foram utilizados quatro extensômetros elétricos de resistência (EER), dois em cada reforço de CFC (Figura 2.3).

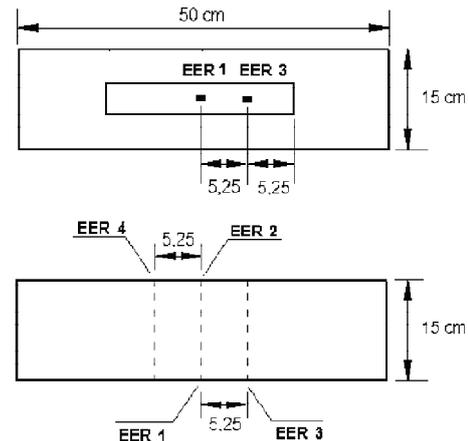


Figura 2.3 – Posicionamento dos EER.

2.4 Esquema dos Ensaios

Para o ensaio de cisalhamento foi adotado o sistema de aplicação de forças mostrado nas Figuras 2.4 e 2.5. Foram utilizadas as prensas de 500 kN e de 5.000 kN. A mudança de máquina deu-se devido à

Tabela 2.6 – Resistência à tração dos corpos-de-prova CFC.

CP	Força de ruptura (N)	Tensão de ruptura (MPa)	Deformação específica (‰)	Módulo de elasticidade (GPa)
1	7.248,08	2.928,52	11,89	246,3
2	6.329,04	2.557,19	9,77	261,74
3	8.116,56	3.279,42	12,56	261,10
Média	7.231,23	2.921,71	11,41	256,38
Desvio Padrão	893,88	361,16	1,46	8,74
Coef. de variação	12,36%	12,36%	12,77%	3,41%

problema de carregamento da prensa de 500 kN, que alcançou somente o valor máximo de 150 kN. Desse modo, para cada tipo de prensa foram ensaiados os corpos-de-prova agrupados na Tabela 2.7.

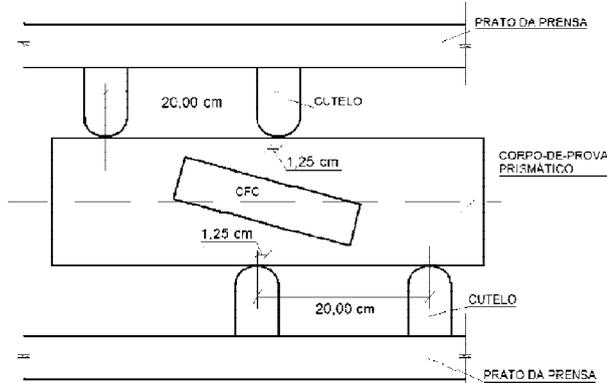


Figura 2.4 – Sistema de aplicação de forças.



Figura 2.5 – Esquema de ensaio de cisalhamento na prensa AMSLER universal de capacidade de 500 kN realizado em 24/03/2010.

Tabela 2.7 – Corpos-de-prova por tipo de prensa.

Tipo de prensa	Corpo-de-prova ensaiado
500 kN	I 0/1, I 0/2, I 15/1, I 15/2, I 30/1, I 30/2 e II 0/1
5.000 kN	II 0/2, II 15/1, II 15/2, II 30/1, II 30/2, III 0/1, III 0/2, III 15/1, III 15/2, III 30/1 e III 30/2

3 Apresentação e Análise dos Resultados Experimentais

3.1 Resultados dos Ensaios

Os dados obtidos nos ensaios se encontram na Tabela 3.1. A Figura 3.1 e 3.2 apresentam o aspecto pós-ruptura dos corpos-de-prova, ressaltando-se que todos os corpos-de-prova romperam por cisalhamento na seção central, apresentando descolamento do com-

pósito. O corpo-de-prova I 0/1 foi o primeiro a ser ensaiado e sua ruptura ocorreu em uma seção um pouco afastada do centro do corpo-de-prova. Em função disso a leitura dos EER registrou valores inferiores aos obtidos pelos demais corpos-de-prova. Para os corpos-de-prova da Série I o descolamento do compósito ocorreu na interface concreto-adesivo, enquanto que para as demais séries o descolamento ocorreu na interface adesivo-compósito, provavelmente porque a ruptura ocorreu de forma mais brusca.



Figura 3.1 – Aspecto pós-ruptura do corpo-de-prova I 0/1; ensaio realizado em 24/02/2010.



Figura 3.2 – Aspecto pós-ruptura do corpo-de-prova II 0/2; ensaio realizado em 8/04/2010.

A Tabela 3.2 apresenta a variação de força de ruptura de corpos-de-prova para duas camadas de reforço em relação aos de uma camada para cada ângulo de inclinação. Observa-se que a variação tende a ser negativa principalmente para maiores valores de f_c . A Tabela 3.3 apresenta a variação da força de ruptura para cada ângulo de inclinação em relação ao ângulo de 0° em grupamentos de uma e duas camadas de reforço. A variação manteve-se positiva para o ângulo de 15° , exceto para o corpo-de-prova da Série I e II com duas camadas, enquanto foi negativa para a inclinação de 30° , com exceção do corpo-de-prova de uma camada da

Série II. Aparentemente para maiores resistências à compressão do concreto a ruptura ocorre de forma brusca o que implica em um descolamento prematuro do CFC, não havendo, desse modo, a deformação do mesmo.

Tabela 3.2 – Força de ruptura: para uma e duas camadas de reforço.

Corpo-de-Prova	Força de ruptura		Variação da força de ruptura (%)	
	para uma camada (kN)	para duas camadas (kN)		
Série I	0	114,50	118,90	3,8
	15	119,60	113,10	-5,4
	30	88,60	96,70	9,1
Série II	0	138,60	161,00	16,2
	15	165,20	123,00	-25,5
	30	144,10	129,40	-10,2
Série III	0	166,80	145,30	-12,9
	15	195,50	163,10	-16,6
	30	145,40	115,10	-20,8

3.2 Tensão de Aderência CFC-Concreto

A partir dos valores das deformações específicas registradas nos ensaios de cisalhamento calculou-se a tensão normal no CFC, desse modo tem-se para a tensão de aderência:

$$\tau_b = \frac{\varepsilon_{f,máx} t_f E_f}{l_0} \quad (3.1)$$

$\varepsilon_{f,máx}$ – deformação específica do CFC máxima, tomada igual ao maior valor lido (Tabela 3.1);

Tabela 3.1 – Dados obtidos nos ensaios de cisalhamento.

Corpo-de-Prova	Força de ruptura (kN)	Deformação específica máxima do CFC (%)				
		EER 1	EER 2	EER 3	EER 4	
Série I	0/1	114,50	0,711	0,192	–	–
	0/2	118,90	1,835	2,989	3,049	1,965
	15/1	119,60	2,855	2,353	2,685	3,028
	15/2	113,10	1,55	0,456	0,396	0,014
	30/1	88,60	0,304	0,171	0,047	0,195
	30/2	96,70	0,109	0,902	0,009	0,065
Série II	0/1	138,60	0,101	0,127	0,067	0,02
	0/2	161,00	2,53	2,204	2,083	0,408
	15/1	165,20	4,06	3,97	3,451	3,856
	15/2	123,00	2,338	2,428	0,079	1,905
	30/1	144,10	4,603	4,116	2,012	0,059
	30/2	129,40	2,109	2,278	1,996	0,186
Série III	0/1	166,80	3,313	3,687	0,031	2,85
	0/2	145,30	2,4	2,045	1,089	1,462
	15/1	195,50	2,639	0,492	2,25	0,396
	15/2	163,10	2,451	2,388	2,422	1,344
	30/1	145,40	2,732	3,982	2,71	3,219
	30/2	115,10	1,854	1,908	–	1,633

t_f – espessura do CFC igual a 0,165 mm;
 E_f – módulo de elasticidade do CFC obtido no ensaio à tração do CFC admitido como o valor médio 256,38 GPa;
 l_0 – distância entre os pontos onde são medidas as deformações específicas, considerado igual a 5,25 cm.

Tabela 3.3 – Força de ruptura para cada ângulo de inclinação em relação ao ângulo de 0°.

Corpo-de-Prova	Força de ruptura (kN)	Variação da força de ruptura (%)	
Série I	0/1	114,50	–
	15/1	119,60	4,5
	30/1	88,60	-22,6
	0/2	118,90	–
	15/2	113,10	-4,9
	30/2	96,70	-18,7
Série II	0/1	138,60	–
	15/1	165,20	19,2
	30/1	144,10	4,0
	0/2	161,00	–
	15/2	123,00	-23,6
	30/2	129,40	-19,6
Série III	0/1	166,80	–
	15/1	195,50	17,2
	30/1	145,40	-12,8
	0/2	145,30	–
	15/2	163,10	12,3
	30/2	115,10	-20,8

Os resultados da tensão de aderência são mostrados na Tabela 3.4. Os valores dos coeficientes de

variação calculados com base nos valores de τ_b são elevados para as três séries. Os gráficos mostrados na Figura 3.3 indicam a variação de τ_b em função de f_c para cada série de corpos-de-prova.

As curvas de ajustes apresentadas na Figura 3.3 não apresentam valores satisfatórios para R^2 , o que era de se esperar, pois os coeficientes de variação dos resultados são elevados, mas indicam que a tensão de aderência τ_b tende a aumentar com a resistência à compressão do concreto f_c . Nos ensaios de MENEGHEL (2005) e PACHECO (2006) essa dependência sequer foi detectada. Ressalta-se que a relação linear apresentada é apenas um indicativo da função de $\tau_b(f_c)$.

Tabela 3.4 – Tensão de aderência.

Corpo-de-Prova	$\epsilon_{f,máx}$ (%)	τ_b (MPa)	Valores estatísticos de τ_b (MPa)
Série I	0/1	0,711	Média = 1,28 D. P. = 0,96 Coef. variação = 75,06 %
	0/2	3,049	
	15/1	3,028	
	15/2	1,550	
	30/1	0,304	
	30/2	0,902	
Série II	0/1	0,127	Média = 2,15 D. P. = 1,27 Coef. variação = 58,87 %
	0/2	2,530	
	15/1	4,060	
	15/2	2,428	
	30/1	4,603	
	30/2	2,278	
Série III	0/1	3,687	Média = 2,29 D. P. = 0,65 Coef. variação = 28,47 %
	0/2	2,400	
	15/1	2,639	
	15/2	2,451	
	30/1	3,982	
	30/2	1,908	

Os resultados obtidos não permitem tirar conclusões sobre a diferença de comportamento entre os corpos-de-prova com uma e duas camadas de CFC. Porém, nota-se que em seis casos dos nove analisados, o valor de τ_b foi maior para os corpos-de-prova com uma camada de CFC. Os resultados estatísticos para a variação de τ_b em função dos diversos ângulos de inclinação do CFC estão reunidos na Tabela 3.5. Esses resultados apresentam valores elevados para os coeficientes de variação.

O reforço de CFC funciona como uma costura para a fissura, e após o desenvolvimento dessa a ruptura do corpo-de-prova é estabelecida pelo concreto, pois o aumento da área da seção transversal de CFC parece não contribuir para o aumento de τ .

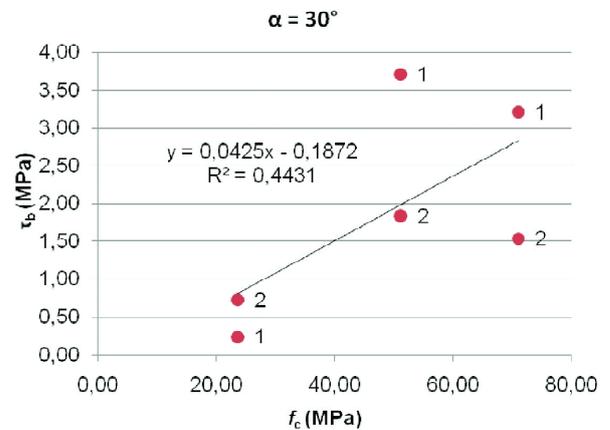
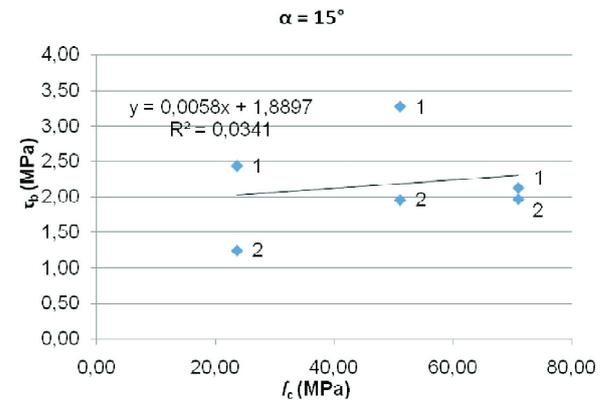
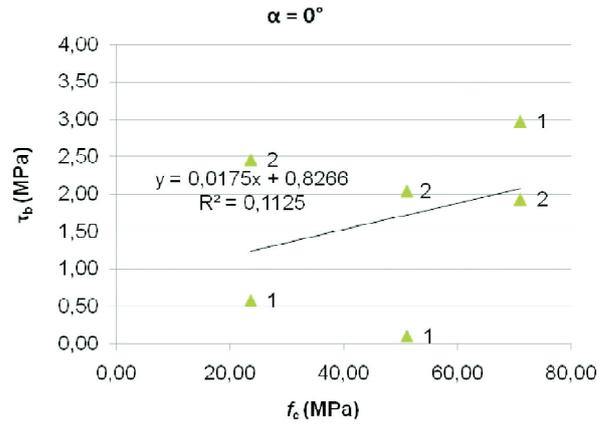


Figura 3.3 – Tensão de aderência do CFC x resistência à compressão do concreto.

Outra sistemática para se obter a resistência última de aderência é por meio dos valores calculados a partir da expressão 3.2, que leva em conta a força lida quando da ruptura e calculando-se sua componente na direção das fibras do CFC. Essa sistemática, no entanto, não permite calcular a tensão de aderência para os corpos-de-prova com ângulo de inclinação igual a 0°, uma vez que a força aplicada é normal à direção das fibras do reforço de CFC. Então com:

$$f_{bu} = \frac{F_u}{l_{b,efet} b_f} \quad (3.2)$$

onde $l_{b,efet} = 10,5$ cm, $b_f = 5,0$ cm, $F_u = P/2 \cdot \text{sen } \alpha$, sendo α o ângulo de inclinação do CFC em relação a direção do comprimento do corpo-de-prova, tem-se os resultados mostrados na Tabela 3.6.

Tabela 3.5 – Tensão de aderência para cada inclinação do CFC.

Corpo-de-Prova	τ_b (MPa)	Valores estatísticos de τ_b (MPa)
0°	I/1	0,57
	I/2	2,46
	II/1	0,10
	II/2	2,04
	III/1	2,97
	III/2	1,93
		Média = 1,68 D. P. = 1,11 Coef. variação = 66,31 %
15°	I/1	2,44
	I/2	1,25
	II/1	3,27
	II/2	1,96
	III/1	2,13
	III/2	1,97
		Média = 1,88 D. P. = 1,04 Coef. variação = 55,23 %
30°	I/1	0,24
	I/2	0,73
	II/1	3,71
	II/2	1,84
	III/1	3,21
	III/2	1,54
		Média = 2,17 D. P. = 1,10 Coef. variação = 50,86 %

Os corpos-de-prova com $\alpha = 0^\circ$ não foram considerados, pois a força aplicada é normal à direção das fibras do reforço de CFC. Os coeficientes de variação da Tabela 3.6, por série, são elevados, mas são menores que os mostrados na Tabela 3.4. Isso parece indicar que os valores de f_{bu} apresentam-se mais consistentes que os valores de τ_b .

Os resultados obtidos a partir da expressão 3.2 também não permitem tirar conclusões sobre a diferença do comportamento entre os corpos-de-prova com uma e duas camadas de CFC.

Os coeficientes de variação dos dados agrupados por ângulo de inclinação do CFC são razoáveis (Tabela 3.7). Isso indica que o parâmetro leva a uma menor dispersão de resultados do que a resistência à compressão do concreto f_c . A tensão de aderência f_{bu} foi maior para os corpos-de-prova com uma camada de CFC, em cinco dos seis casos analisados.

Tabela 3.6 – Tensão última de aderência.

Corpo-de-Prova	Força de ruptura (kN)	f_{bu} (MPa)	Valores estatísticos de f_{bu} (MPa)
Série I	15/1	15,48	Média = 3,64 D. P. = 0,91 Coef. variação = 24,93%
	15/2	14,64	
	30/1	22,15	
	30/2	24,18	
Série II	15/1	21,38	Média = 5,03 D. P. = 1,78 Coef. variação = 35,45%
	15/2	15,92	
	30/1	36,03	
	30/2	32,35	
Série III	15/1	25,30	Média = 5,31 D. P. = 1,23 Coef. variação = 23,16%
	15/2	21,11	
	30/1	36,35	
	30/2	28,78	

Tabela 3.7 – Tensão última de aderência para cada inclinação do CFC.

Corpo-de-Prova	f_{bu} (MPa)	Valores estatísticos de f_{bu} (MPa)
15°	I/1	2,95
	I/2	2,79
	II/1	4,07
	II/2	3,03
	III/1	4,82
	III/2	4,02
		Média = 3,61 D. P. = 0,11 Coef. variação = 22,46 %
30°	I/1	4,22
	I/2	4,60
	II/1	6,86
	II/2	6,16
	III/1	6,92
	III/2	5,48
		Média = 5,71 D. P. = 1,14 Coef. variação = 19,97 %

Considerando-se todos os corpos-de-prova, têm-se os seguintes valores estatísticos para f_{bu} :

- média = 4,66 MPa;
- desvio padrão = 1,44 MPa;
- coeficiente de variação = 31,00 %.

Os gráficos da Figura 3.4 indicam que f_{bu} aumenta, numa primeira aproximação, linearmente com f_c . As curvas de ajuste apresentam resultados razoáveis para R^2 . O cálculo da tensão de aderência em função da força aplicada se mostrou mais consistente que o cálculo obtido em função da leitura dos EER.

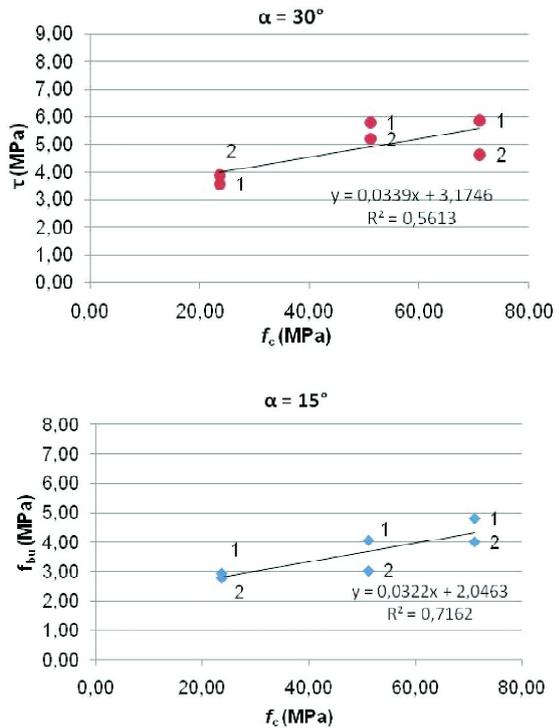


Figura 3.4 – Tensão última de aderência do CFC versus resistência à compressão do concreto.

Tabela 3.8 – Comparação entre t_b e f_{bu} .

Corpo-de-Prova	τ_b (MPa)	f_{bu} (MPa)	Variação de f_{bu} em relação a τ_b (%)	
Série I	0/1	0,57	–	
	0/2	2,46	–	
	15/1	2,44	2,95	20,9%
	15/2	1,25	2,79	123,2%
	30/1	0,24	4,22	1.658,3%
	30/2	0,73	4,60	530,1%
	Série II	0/1	0,10	–
0/2		2,04	–	
15/1		3,27	4,07	24,5%
15/2		1,96	3,03	54,6%
30/1		3,71	6,86	84,9%
30/2		1,84	6,16	234,8%
Série III		0/1	2,97	–
	0/2	1,93	–	
	15/1	2,13	4,82	126,3%
	15/2	1,97	4,02	104,1%
	30/1	3,21	6,92	115,6%
	30/2	1,54	5,48	255,8%

A Tabela 3.8 apresenta uma comparação entre os valores de τ_b e f_{bu} para cada corpo-de-prova. Observa-se que a variação de f_{bu} em relação à τ_b apresenta valores bastante elevados e variados, mostrando, aparentemente, que a obtenção do valor da tensão de aderência pela leitura dos EER não tem nenhuma relação matemática com a obtenção do valor da tensão de aderência em função da força aplicada.

Para o cálculo da tensão de cisalhamento foi aplicada a expressão 2.4, isto é:

$$\tau = \frac{P(L/2 - b/2)}{w \cdot h(b/2 + L/2)} \quad (3.3)$$

Como não foi realizado entalhes nos corpos-de-prova, tem-se $w = b$.

Os resultados obtidos com essa expressão são mostrados na Tabela 3.9. Os coeficientes de variação dos dados agrupados por série de corpos-de-prova são razoáveis. Ressalta-se que em seis casos dos nove analisados, o valor de τ foi maior para os corpos-de-prova com uma camada de CFC.

Tabela 3.9 – Tensão de cisalhamento.

Corpo-de-prova	τ (MPa)	Valores estatísticos de τ (MPa)
Série I	0/1	Média = 4,37 D. P. = 0,52 Coef. variação = 11,82 %
	0/2	
	15/1	
	15/2	
	30/1	
	30/2	
	Série II	
0/2		
15/1		
15/2		
30/1		
30/2		
Série III		0/1
	0/2	
	15/1	
	15/2	
	30/1	
	30/2	

Os gráficos mostrados na Figura 3.5 indicam que a tensão de cisalhamento resistida pelo corpo-de-prova τ diminui com o aumento do ângulo α . Numa primeira análise, a relação entre τ e f_c pode ser assumida como linear, mas somente a reta da série I apresenta um bom ajuste, as outras duas têm valor de R^2 muito baixo.

Os coeficientes de variação dos dados agrupa-

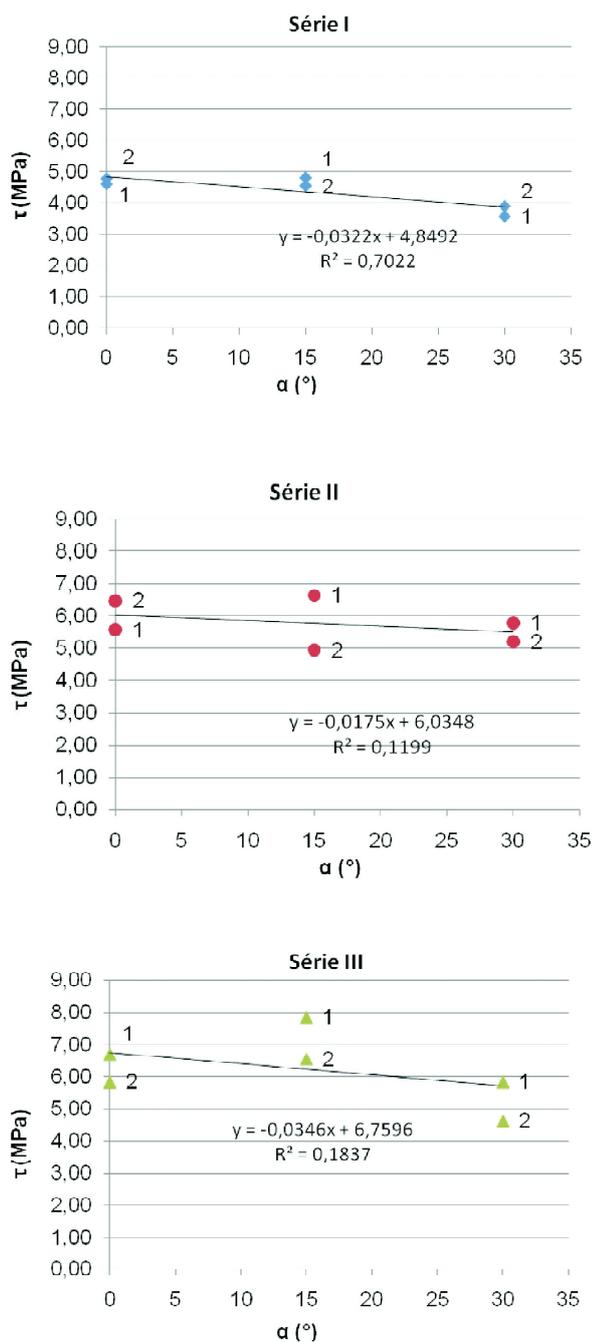


Figura 3.5 – Tensão de cisalhamento versus ângulo de inclinação do CFC em relação ao comprimento do corpo-de-prova.

dos em função do ângulo α (Tabela 3.9) são razoáveis, porém, são superiores aos mostrados na Tabela 4.9 (dados agrupados por série de corpos-de-prova).

Os gráficos mostrados na Figura 3.6 indicam uma dependência linear entre τ e α . As retas de ajuste apresentam um resultado razoável ($\alpha = 30^\circ$; $R^2 = 0,5613$) e dois resultados bons ($\alpha = 0^\circ$; $R^2 = 0,723$ e $\alpha = 15^\circ$; $R^2 = 0,7162$).

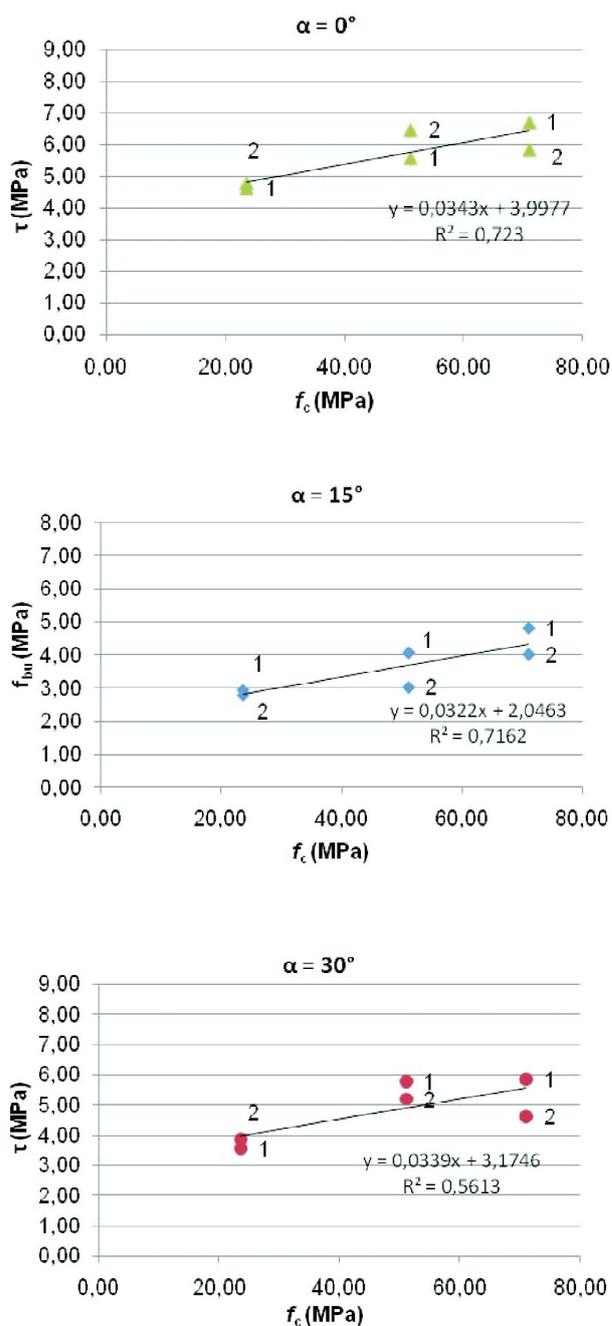


Figura 3.6 – Tensão de cisalhamento versus resistência à compressão do concreto.

Tabela 4.10 – Tensão de cisalhamento para cada inclinação do CFC.

Corpo-de-prova	τ (MPa)	Valores estatísticos de τ (MPa)
0°	I/1	4,60
	I/2	4,78
	II/1	5,57
	II/2	6,47
	III/1	6,71
	III/2	5,84
		Média = 5,66 D. P. = 0,86 Coef. variação = 15,16 %
15°	I/1	4,81
	I/2	4,55
	II/1	6,64
	II/2	4,95
	III/1	7,86
	III/2	6,56
		Média = 5,89 D. P. = 1,32 Coef. variação = 22,46 %
30°	I/1	3,56
	I/2	3,89
	II/1	5,79
	II/2	5,20
	III/1	5,85
	III/2	4,63
		Média = 4,82 D. P. = 0,96 Coef. variação = 19,97 %

Para todos os corpos-de-prova tem-se:

- média = 5,46 MPa;
- desvio padrão = 1,11 MPa;
- coeficiente de variação = 20,32 %.

4 Conclusões

A partir das análises apresentadas conclui-se que:

- a força de ruptura cisalhante tem variação para duas camadas de reforço em relação aos de uma de valor negativo principalmente para maiores valores de f_c ;
- a variação da força de ruptura para cada ângulo de inclinação em relação ao ângulo de 0° apresentou valores positivos para o ângulo de 15°, exceto para o corpo-de-prova da Série II com duas camadas, enquanto apresentou valores negativos para a inclinação de 30°, com exceção do corpo-de-prova de uma camada da Série II;
- a tensão de aderência aumenta com a resistência a compressão do concreto f_c , e essa dependência pode ser assumida como linear;
- o cálculo da tensão de aderência em função da força aplicada se mostrou mais consistente que o cálculo obtido em função da leitura dos EER;

- o aumento da inclinação do reforço de CFC em relação ao corpo-de-prova representa uma menor resistência ao cisalhamento;
- a segunda camada não apresentou um aumento significativo, e em alguns casos apresentou uma menor resistência ao cisalhamento;
- o reforço de CFC funciona como uma costura para a fissura, e após o desenvolvimento dessa a ruptura do corpo-de-prova é estabelecida pelo concreto, pois o aumento da área da seção transversal de CFC parece não contribuir para o aumento de τ ;
- o coeficiente de atrito manteve aumento linear em relação ao f_c principalmente para uma inclinação de 15°, enquanto apresentou comportamento diferente para uma inclinação de 30°, provavelmente porque a fissura, para esse ângulo, diminui o comprimento efetivo de aderência numa das laterais.

Abstract

The main objective of this study was experimentally evaluating the effects of carbon fiber composites (CFC) on the capacity shear reinforcement of concrete prismatic specimens. The test program was comprised of 18 block specimens (15 cm x 15 cm x 50 cm) applying the modified IOSIPESCU (1967) test. The variables were the average concrete compressive strength (20 MPa, 50 MPa and 70 MPa), the number of reinforcement layers (one or two) on both sides and the angle of the CFC in relation to the direction of greater length specimens (0°, 15° and 30°). It was verified that for higher values of compressive strength, the higher the values of shear load and bond stress between the CFC and concrete substratum. In most cases, the specimens reinforced with two layers of CFC showed lower shear strength than the reinforced specimens with one layer, and this trend more prominent for the higher compressive strength capacity. Generally it was found that reinforced specimens with CFC bonded at 15° obtained highest values of ultimate load, regardless of the number of layers.

Keywords: Carbon Fiber Composites; Iosipescu Test; Structural Concrete.

Referências Bibliográficas

- ADAM, D. F.; WALRATH, D. E. The Iosipescu Shear Test as Applied to Composite Materials. *Experimental Mechanics*, v. 23, nº 1. 1983.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS

- TÉCNICAS (ABNT) – NBR NM 67. Concreto – Determinação da Consistência pelo Abatimento do Tronco de Cone. Brasil. 1998.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) – NBR 5738. Concreto – Procedimento para Moldagem e Cura de Corpos-de-prova. Brasil, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) – NBR 5739. Concreto – Ensaio de Compressão de Corpos-de-prova Cilíndricos – Método de Ensaio. Brasil. 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) – NBR 6118. Projeto de Estruturas de Concreto. Brasil. 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) – NBR 7222. Argamassa e Concreto – Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral de Corpos-de-prova Cilíndricos. Brasil. 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) – NBR 8522. Concreto – Determinação do Módulo Estático de Elasticidade à Compressão. Brasil. 2008.
- ASTM D 5379/D 5379M 05 – Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method1. 2005.
- ASTM D 3039 / D 3039 M – 00, Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. Annual Book of ASTM Standards American Society of Testing Materials, West Conshohocken. 2000.
- DIOGO, T. C. D'ALMEIDA. Estudo Experimental do Reforço à Força Cortante de Corpos-de-prova de Concreto com Compósitos de Fibras de Carbono. Dissertação de Mestrado UFF. 2010.
- IOSIPESCU, N. New Accurate Procedure for Single Shear Testing of Metals. *Journal of Materials*, 2 (3): 537–566. 1967.
- MENEGHEL, J. M. Análise Experimental da Aderência entre o Concreto e Compósitos com Tecido de Fibras de Carbono. Dissertação de Mestrado, PUC-Rio. Rio de Janeiro. 2005.
- PACHECO, C. O. Verificação Experimental de Aderência CFC – concreto por meio de Ensaio Tração-Compressão. Dissertação de Mestrado, PUC-Rio. Rio de Janeiro. 2006.
- ROSS, B. E. Analytical Modeling and Standardized Testing of Concrete Beams with Web Bonded FRP Shear Reinforcement. M. Sc. Dissertation, Department of Civil and Architectural Engineering and The Graduate School of The University of Wyoming. EUA. 2002.