

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



**Antonio Rogerio Pellissari**

**Verificação Experimental da Aderência CFC-Concreto com  
Carregamento de Impacto**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de Concentração: Estruturas.

Orientador: Giuseppe Barbosa Guimarães  
Co-orientador: Emil de Souza Sánchez Filho

Rio de Janeiro  
Setembro de 2007



**Antonio Rogerio Pellissari**

**Verificação Experimental da Aderência CFC-Concreto com  
Carregamento de Impacto**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio em Engenharia Civil. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Giuseppe Barbosa Guimarães**

Orientador

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

**Emil de Souza Sánchez Filho**

Co-orientador

Universidade Federal Fluminense

**Paulo Batista Gonçalves**

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

**Júlio Jerônimo Holtz Silva Filho**

Avantec Engenharia Ltda

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

**Antonio Rogerio Pellissari**

Graduado em Engenharia Civil pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná em fevereiro de 2005.

Ficha Catalográfica

Pellissari, Antonio Rogerio

Verificação experimental da aderência CFC-concreto por meio de ensaios à flexão com carregamento de impacto / Antonio Rogerio Pellissari ; orientador: Giuseppe Barbosa Guimarães ; co-orientador: Emil de Souza Sánchez Filho. – 2007.

65 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)– Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Reforço estrutural. 3. Impacto. 4. Concreto. 5. Compósitos de fibras de carbono. 6. Aderência. 7. Comprimento de ancoragem. I. Guimarães, Giuseppe Barbosa. II. Sánchez Filho, Emil de Souza. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: 624

## **Agradecimentos**

Aos meus pais Rogerio Pellissari e Ivaema F. Grandó Pellissari e aos meus irmãos João e Mariana, pelo apoio, carinho e compreensão para vencer esta nova etapa da minha vida.

Aos professores Giuseppe Barbosa Guimarães e Emil de Souza Sánchez Filho, pela orientação recebida e pelos ensinamentos passados ao longo da realização deste trabalho.

A Márcia, Marina, Vinícius e Marianna, pelo apoio e paciência para realização deste trabalho.

Aos amigos do BG, por terem sido companheiros durante os momentos de ausência de luz.

Aos amigos que seguiram outros caminhos e a todos os amigos conquistados durante esse período na PUC.

Aos funcionários Euclídes, José Nilson, Evandro e Haroldo pela amizade e pela ajuda para concretizando este trabalho.

Ao Engenheiro Júlio e Professor Emil, pelo fornecimento de todo o tecido de fibra de carbono necessário para essa pesquisa.

A Tarso Engenharia pelo suporte técnico na preparação dos ensaios.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

A todas as pessoas que contribuíram de maneira direta ou indireta para a realização deste trabalho.

## Resumo

Pellissari, Antonio Rogerio; Guimarães, Giuseppe Barbosa; Sánchez Filho, Emil de Souza. **Verificação Experimental da Aderência CFC- Concreto por meio de Ensaio à Flexão com Carregamento de Impacto**. Rio de Janeiro, 2007. 65p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Neste trabalho realizou-se uma investigação experimental sobre os efeitos de forças de impacto sobre a resistência de aderência entre compósitos de fibras de carbono e o concreto. O programa experimental consistiu de ensaios de flexão de corpos-de-prova constituídos de dois blocos de concreto unidos por uma rótula na região superior (comprimida) e por tiras de compósito de fibras de carbono coladas nas faces inferiores dos blocos. Foram ensaiados 23 corpos-de-prova, com resistências à compressão do concreto variando de  $25\text{ MPa}$  a  $35\text{ MPa}$ . A principal variável foi a taxa de carregamento ( expressa em termos de tensão de aderência), variou entre  $6,06\text{ MPa/s}$  (estático) a  $3.690.485\text{ MPa/s}$  (dinâmico). Os resultados mostraram que a resistência de aderência aumenta com o aumento da taxa de carregamento.

## Palavras-chave

Reforço Estrutural; Impacto; Concreto; Compósitos de Fibras de Carbono; Aderência; Comprimento de Ancoragem.

## Abstract

Pellissari, Antonio Rogerio; Guimarães, Giuseppe Barbosa; Sánchez Filho, Emil de Souza. **Experimental Investigation of the Bond Strength between CFC-concrete under impact loading.** Rio de Janeiro, 2007. 65p. MSc Dissertation - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

An experimental investigation on the effects of impact loads on the bond strength between carbon fiber composite and concrete is described in this work. The objective was to investigate the influence of loading rate on the bond strength. Concrete-fiber specimens were tested under loading rates varying from a minimum of  $6,06 \text{ MPa/s}$  (static) to a maximum of  $3.690.485 \text{ MPa/s}$ . In addition, twenty tree concrete prisms were tested under different loading rates in order to investigate the effects of the loading rate on the tensile strength of concrete and carbon fiber separately. The results show that the bond strength increase with the increase of the loading rates.

## Keywords

Structural Strengthening; Concrete; Carbon Fiber Composites; Impact Load; Bond.

## Sumário

1	Introdução	14
1.1	Objetivos	14
1.2	Organização do Trabalho	15
2	Revisão Bibliográfica	16
2.1	Fibras	16
2.2	Comprimento de Ancoragem e Tensão de Aderência	17
2.3	Modos de Ruptura	23
2.4	Vigas Reforçadas com CFC sob Forças de Impacto	25
3	Programa Experimental	26
3.1	Considerações Iniciais	26
3.2	Nomenclatura dos Corpos-de-Prova	26
3.3	Características dos Corpos-de-Prova	26
3.4	Materiais Utilizados nos Corpos-de-Prova	30
3.4.1	Concreto	30
3.4.2	Tecidos de Fibras de Carbono	31
3.4.3	Adesivo Epóxi	32
3.4.4	Características dos ensaios nas Fibras de Carbono	32
3.5	Aplicação do CFC	35
3.6	Instrumentação	38
3.7	Aquisição de Dados	40
3.8	Aplicação de Força	40
3.8.1	Carregamento Estático	40
3.8.2	Carregamento Dinâmico	41
3.9	Força Normal Aplicada no CFC	43
3.10	Tensão de Aderência do CFC	44
3.11	Tensão Normal no CFC	44

4	Apresentação e Análises dos Resultados	45
4.1	Modos de Ruptura	45
4.2	Curvas Força <i>versus</i> Tempo e Taxa de Carregamento	47
4.3	Efeito da Taxa de Carregamento Sobre a Resistência de Aderência	49
4.4	Efeito da Taxa de Carregamento Sobre a Resistência à Tração do CFC 51	
4.5	Propagação da Onda de Choque	52
5	Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros	55
5.1	Conclusões	55
5.2	Sugestões para Trabalhos Futuros	55
6	Referências Bibliográficas	57
	Anexo – Curvas Força <i>versus</i> Tempo	60

## Lista de figuras

Figura 2.1 – Diagrama tensão-deformação específica, para diversos tipos fibras; adaptada de Souto (2003).	17
Figura 2.2 – Corpo-de-prova para o ensaio de aderência; adaptado de Miller (1999).	20
Figura 2.3 – Curva $\tau \times s$ para os corpos-de-prova; adaptada de Miller e Nanni (1999).	20
Figura 2.4 – Esquema do ensaio de tração-compressão; adaptada de Pacheco (2006).	21
Figura 2.5 – Resistência aderência $f_b$ vs. resistência do concreto $f_c$ ; adaptada de Pacheco (2006).	22
Figura 2.6 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem; adaptada de Meneghel (2005).	22
Figura 2.7 – Gráfico tri linear de carregamento x deslocamento; adaptada de White <i>et al.</i> (2001).	24
Figura 3.1 – Características geométricas dos corpos-de-prova.	27
Figura 3.3 – Detalhe da fôrma para molde dos blocos, medidas em cm.	29
Figura 3.4 – Dimensões dos corpos-de-prova para ensaio de tração; adaptada da norma ASTM D 3039/3039M.	33
Figura 3.5 – Gráfico tensão x deformação específica dos corpos-de-prova de CFC; adaptado de Silva Filho (2007).	33
Figura 3.6 – Detalhe da área preparada para o recebimento do reforço.	35
Figura 3.7 – Detalhe da fixação dos blocos com os perfis metálicos.	36
Figura 3.8 – Detalhe da fixação rótula.	36
Figura 3.9 – Detalhe da marcação da área destinada a aplicação do CFC nos corpos-de-prova com impregnação total.	37
Figura 3.10 – Detalhe do reforço do bloco de concreto não instrumentado, nas vigas com impregnação parcial das fibras.	38
Figura 3.11 – Detalhes do posicionamento da célula de carga.	38
Figura 3.12 – Detalhes dos posicionamentos das células de carga.	39
Figura 3.13 – Detalhes dos EER posicionados no CFC.	39
Figura 3.14 – Detalhe do EER entre os blocos de concreto e no centro do reforço (viga com impregnação total).	40
Figura 3.15 – Viga bi-apoiada com extremidade em balanço, adaptada de Martins Junior (2006).	41
Figura 3.16 – Detalhes do aparato de ensaio.	42
Figura 3.17 – Esquema das distâncias dos pontos de aplicação de carga e apoio.	43
Figura 4.1 – Ruptura por destacamento do concreto no corpo-de-prova VD III 12.	46
Figura 4.2 – Ruptura por descolamento do adesivo no corpo-de-prova VE II 04.	46

Figura 4.3 – Ruptura das fibras de carbono no corpo-de-prova VE III 13.	47
Figura 4.4 – Curva força aplicada <i>versus</i> tempo do corpo-de-prova VE II 04 (força medida na célula de carga localizada no topo do corpo-de-prova).	48
Figura 4.5 – Curva força aplicada <i>versus</i> tempo do corpo-de-prova VD III 12 (força medida na célula de carga localizada no topo do corpo-de-prova).	48
Figura 4.6 – Curva força aplicada <i>versus</i> tempo (corpo-de-prova VDM II 21).	49
Figura 4.7 – Relação entre a taxa de tensão de aderência $T\tau$ e a resistência de aderência $f_b$ para os corpos-de-prova que romperam por destacamento do concreto.	50
Figura 4.8 – Relação entre a taxa de tensão normal $T\sigma$ e a resistência à tração $f_b$ para os corpos-de-prova com ruptura por tração nas fibras de carbono.	52
Figura 4.9 – Gráfico dos valores da célula de carga dividida pela força máxima e os valores da deformação dividida pela deformação específica máxima, ambos em relação ao tempo de ensaio ( VD III 12).	53
Figura A.01 – Corpo-de-prova VE I 01.	60
Figura A.02 – Corpo-de-prova VE I 02.	60
Figura A.03 – Corpo-de-prova VD I 03.	60
Figura A.04 – Corpo-de-prova VE II 04.	61
Figura A.05 – Corpo-de-prova VE II 05.	61
Figura A.06 – Corpo-de-prova VE II 06.	61
Figura A.07 – Corpo-de-prova VE II 07.	61
Figura A.08 – Corpo-de-prova VD II 08.	62
Figura A.09 – Corpo-de-prova VD II 09.	62
Figura A.10 – Corpo-de-prova VD III 10.	62
Figura A.11 – Corpo-de-prova VE III 11.	62
Figura A.12 – Corpo-de-prova VD III 12.	63
Figura A.13 – Corpo-de-prova VE III 13.	63
Figura A.14 – Corpo-de-prova VDM III 14.	63
Figura A.15 – Corpo-de-prova VEM III 15.	63
Figura A.16 – Corpo-de-prova VDM III 16.	64
Figura A.17 – Corpo-de-prova VDM III 17.	64
Figura A.18 – Corpo-de-prova VDM III 18.	64
Figura A.19 – Corpo-de-prova VDM III 19.	64
Figura A.20 – Corpo-de-prova VDM II 20.	65
Figura A.21 – Corpo-de-prova VDM II 21.	65
Figura A.22 – Corpo-de-prova VDM II 22.	65
Figura A.23 – Corpo-de-prova VDM III 23.	65

## Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Tipos e características das fibras; adaptada de Nakaba <i>et al.</i> (2005).	23
Tabela 2.2 – Tipos e características de base; adaptada de Nakaba <i>et al.</i> (2005).	23
Tabela 2.3 – Variáveis adotadas; adaptada de White <i>et al.</i> (2001).	25
Tabela 3.1 – Características dos corpos-de-prova.	30
Tabela 3.2 – Consumo de material por m <sup>3</sup> de concreto.	31
Tabela 3.3 – Dimensões dos corpos-de-prova adotadas para ensaio de tração em materiais compósitos de fibras de carbono; adaptada da ASTM D3039/3039M.	33
Tabela 3.4 – Resultados dos ensaios de resistência à tração dos corpos-de-prova de CFC.	34
Tabela 3.5 – Valor adotado para deformação específica última, resistência à tração máxima e módulo de elasticidade do CFC.	34
Tabela 4.1 – Resultados dos ensaios.	45
Tabela 4.2 – Taxa de carregamento e resistências de aderência dos corpos-de-prova que romperam por destacamento do concreto.	49
Tabela 4.3 – Valores das resistências à tração e das taxas de carregamento para os corpos-de-prova com ruptura nas fibras de carbono.	51
Tabela 4.4 – Diferença do tempo entre a resposta da célula de carga localizada no topo do corpo-de-prova e o EER.	53
Tabela 4.5 – Diferença no tempo de carregamento entre a célula de carga localizada no topo do corpo-de-prova e a célula de carga localizada no seu apoio, para os corpos-de-prova com modo de ruptura no concreto.	54

## Lista de Símbolos

### Romanos

A, B, C	Dimensões do Bloco de concreto
a	Distância do centro da rótula ao ponto de aplicação da força
b	Distância da aplicação da força a extremidade do bloco
$b_c$	Largura do elemento de concreto
$b_p$	Largura do CFC
c	Distância do apoio do corpo-de-prova a extremidade do bloco
CFC	Compósito de fibras de carbono
d	Distância entre os apoios do corpo-de-prova
$d_a$	Distância da ancoragem a extremidade do bloco
$E_c$	Módulo de elasticidade do concreto
$E_p, E_L$	Módulo de elasticidade do CFC
$F_f$	Força normal aplicada às fibras
$F_{max}, P_u$	Força máxima aplicada no CFC
$f_b$	Resistência de aderência
$f_c$	Resistência à compressão do concreto
H	Altura de queda do martelo
$K_b$	Coeficiente que considera a influência da largura relativa do compósito sobre a largura do elemento de concreto
l	Comprimento das fibras sem impregnação
$l_a$	Comprimento de ancoragem
$l_e$	Comprimento de ancoragem efetivo
$l_l$	Comprimento não aderido do CFC no concreto
P	Força aplicada no topo do corpo-de-prova

R	Reação no apoio do corpo-de-prova
$t_p$	Espessura do CFC
$T_c$	Taxa de carregamento normal às fibras
$T_\sigma$	Taxa de tensão normal às fibras
$T_\tau$	Taxa de tensão de aderência entre o CFC e o concreto
z	Braço de alavanca entre o CFC e o eixo da rótula

## Gregos

$\beta_L$	Coefficiente adimensional que relaciona o comprimento de aderência com o comprimento de aderência efetivo
$\beta_p$	Coefficiente adimensional que relaciona a largura do compósito com a do elemento de concreto
$\Delta t$	Tempo entre a início do carregamento e o tempo da força máxima
$\Delta t_1$	Diferença de tempo entre a resposta da célula de carga no topo do corpo-de-prova e a resposta do EER
$\Delta t_2$	Diferença de tempo entre a resposta da célula de carga no topo do corpo-de-prova e a resposta da célula de carga no seu apoio
$\varepsilon_f$	Deformação específica do CFC
$\varepsilon_u$	Deformação específica última do CFC
$\sigma, \sigma_{db}, \sigma_{fibras}$	Tensão normal às fibras
$\tau_{ad}$	Tensão de aderência entre o CFC e o concreto
$\tau_{bk}$	Tensão de aderência característica