

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Claudia de Oliveira Pacheco

Verificação Experimental da Aderência CFC-Concreto por meio de Ensaio Tração-Compressão

Dissertação de Mestrado

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

Orientadores: Giuseppe Barbosa Guimarães
Emil de Souza Sánchez Filho

Rio de Janeiro
agosto de 2006



Claudia de Oliveira Pacheco

**Verificação Experimental da Aderência CFC-Concreto por meio
de Ensaio Tração-Compressão**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre 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 de Juiz de Fora

Marta de Souza Lima Velasco

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Robson Luiz Gaiofatto

Universidade Católica de Petrópolis

Ibrahim Abd El Malik Shehata

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Luiz Antônio Vieira Carneiro

Instituto Militar de Engenharia

José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 04 de agosto de 2006.

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

Claudia de Oliveira Pacheco

Graduou-se em Engenharia Civil, pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Ingressou no curso de mestrado em Engenharia Civil da PUC-Rio em março do ano de 2004, atuando na área de Estruturas e Materiais, trabalhando com ensaios de laboratório.

Ficha Catalográfica

Pacheco, Claudia de Oliveira

Verificação experimental da aderência CFC-Concreto por meio de ensaios tração-compressão / Claudia de Oliveira Pacheco; orientadores: Giuseppe Barbosa Guimarães, Emil de Souza Sánchez Filho. – Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2006.

176 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia civil – Teses. 2. Reforço estrutural. 3. Concreto. 4. Compósitos de fibra de carbono. 5. Aderência. 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

Aos meus queridos pais Marcus e Maria Carmelita,
pelo amor, apoio e paciência.

Agradecimentos

Aos meus queridos pais, pelo incentivo, apoio, carinho e compreensão ao longo deste trabalho que só foi possível por acreditarem no meu sucesso e estarem sempre ao meu lado.

Ao professor Giuseppe Guimarães, pela orientação recebida ao longo da realização deste trabalho.

Ao meu co-orientador, professor Emil de Souza Sánchez Filho, por compartilhar comigo seu conhecimento, pela paciência, compreensão e dedicação permanente.

A todos os amigos conquistados durante esse período na PUC, por terem sido grandes companheiros durante esta jornada.

Aos funcionários Euclídes, José Nilson, Evandro e Haroldo pela amizade e por me oferecerem condições de percorrer esse caminho, concretizando este trabalho.

A RHEOTEC, pelo fornecimento de todo o tecido de fibra de carbono necessário para essa pesquisa.

A CAPES pelo apoio financeiro.

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

Resumo

Pacheco, Claudia de Oliveira; Guimarães, Giuseppe Barbosa; Sánchez Filho, Emil de Souza. **Verificação Experimental da Aderência CFC- Concreto por meio de Ensaios Tração- Compressão em Corpos-de-prova Cúbicos**. Rio de Janeiro, 2006. 176p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O objetivo foi estudar a aderência entre o compósito de fibra de carbono (CFC) e o substrato de concreto, em corpos-de-prova compostos de cubos de concreto, por meio do ensaio de tração-compressão. Foram ensaiados 18 corpos-de-prova compostos de dois cubos de concreto (móvel e fixo) ligados por tiras de CFC coladas às suas laterais opostas onde a região à ser estudada foi devidamente instrumentada. Os parâmetros estudados foram a resistência do concreto, o tipo de carregamento (monotônico crescente e carregamento em ciclos de carga e descarga) e as diferentes superfícies do concreto (superfície lisa e superfície rugosa). Os resultados dos ensaios mostraram que para as diferentes resistências à compressão do concreto no intervalo estudado não se obteve uma formulação que indicasse a influência da resistência à compressão sob a resistência última de aderência, para a qual foi obtido um valor característico igual a 1,44 *MPa*. Foram medidas as deformações específicas do CFC assim como do concreto, com as quais foram calculadas as tensões de aderência e as deformações específicas. Com os resultados experimentais foram obtidos gráficos e curvas de ajuste para energia de fratura vs. resistência de aderência. Com o critério de Coulomb-Mohr generalizado pode-se estimar como valor inicial a resistência de aderência da ordem de 30% da tensão tangencial máxima resistida pelo substrato de concreto.

Palavras-chave

Reforço Estrutural; Concreto; Compósitos de Fibra de Carbono; Aderência.

Abstract

Pacheco, Claudia de Oliveira; Guimarães, Giuseppe Barbosa; Sánchez Filho, Emil de Souza (Advisors). **Experimental Verification on CFC-concrete bond throughout Tension-Compression tests.** Rio de Janeiro, 2006. 176p. MSc. Dissertation – Civil Engineering Department, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The purpose of this work was study the bond between the composite of fiber carbon (CFC) and the concrete substratum. A total of 18 tension-compression tests on specimens with two concrete cubes (fixed and movable) linked by fiber carbon on opposites sides were performed. The area to be studied was properly monitored. The variables of these tests were the concrete strength, the loading type (monotonic loading and loading/unloading cycles), and different concrete surfaces (smooth face and rough face). The test results showed that in the interval analyzed, could not be obtain a formulation that indicates the influence of ultimate bond stress on concrete strength. A characteristic value of 1,44 *MPa* was obtained for the ultimate bond stress. The specific deformations of CFC and concrete were measured, allowing to calculate the bond stress and the corresponding mean strain. The experimental results provided graphs and adjustment curves for energy of fracture *vs.* bond stress. With the Coulomb-Mohr criteria it can be considered as initial value for bond stress 30% of the concrete mean shear strain.

Keywords

Structural Strengthening; Concrete; Carbon Fiber Composites; Bond.

Sumário

1 Introdução	29
1.1. Considerações Gerais	29
1.2. Objetivos	30
1.3. Organização do trabalho	31
2 Revisão Bibliográfica	32
2.1. Introdução	32
2.2. Estudo de Mazen <i>et alii</i> (1998)	32
2.3. Estudo de Miller e Nanni (1999)	34
2.4. Estudo de Harmon <i>et alii</i> (1999)	36
2.5. Estudo de Kallifa <i>et alii</i> (1999)	38
2.6. Estudo de Neubauer e Rostásy (1999)	41
2.7. Estudo de Cruz e Barros (2001)	42
2.8. Pesquisa de Leung e Yang (2002)	45
2.9. Estudo de Meneghel (2005)	47
2.10. Outras Pesquisas	48
3 Programa experimental	55
3.1. Introdução	55
3.2. Concreto	56
3.2.1 Resistência à compressão simples do concreto	58
3.2.2 Resistência à tração indireta do concreto	59
3.2.3 Módulo de elasticidade do concreto	60
3.3. Compósito de fibra de carbono	66
3.3.1. Tecido de fibra de carbono	66
3.3.2. Ensaio de resistência à tração do compósito de fibra de carbono	68
3.3.3. Materiais necessários para a aplicação do tecido de fibra de carbono ao substrato de concreto	71
3.3.3.1 . Resina de imprimação	72
3.3.3.2 . Resina epoxídica	73

3.4. Confeção dos corpos-de-prova	74
3.4.1. Formas	74
3.4.2. Corpos-de-prova de concreto	75
3.4.3 Concretagem	75
3.5. Colagem do tecido de fibra de carbono	76
3.6. Instrumentação dos corpos-de-prova	78
3.7. Equipamentos e corpos-de-prova	79
3.8. Observações	81
4 Apresentação dos Resultados e Análises	84
4.1. Notas iniciais	84
4.2. Forças últimas e modos de ruptura	84
4.3. Deformações específicas ao longo do comprimento de ancoragem	92
4.3.1. Deformações específicas ao longo do comprimento de ancoragem para carregamento monótonico crescente	92
4.3.2. Deformações específicas ao longo do comprimento de ancoragem para o carregamento em ciclos de carga e descarga	97
4.4. Tensões de aderência e deformações específicas no CFC	99
4.4.1. Variação das tensões de aderência ao longo do comprimento de ancoragem	107
4.4.2. Resistência de aderência	113
4.5. Efeito da resistência à compressão do concreto nas resistências últimas de aderência	115
4.6. Efeito da rugosidade nas resistências últimas aderência	116
4.7. Efeito do carregamento em ciclos de carga e descarga no CFC	117
4.8. Energia de fratura	121
4.8.1. Modelo de Holzenkämpfer (1994)	121
4.9. Tensão tangencial máxima resistida pelo substrato de concreto	125
5 Conclusões e sugestões para trabalhos futuros	131
5.1. Conclusões	131
5.2. Sugestões para trabalhos futuros	133
6 Referências Bibliográficas	134

Anexo A Análise Granulométrica e Massas dos Agregados	138
Anexo B Resultado dos Ensaios de Módulo de Elasticidade do Concreto	142
B.1 Série de concretagem I; corpos-de-prova com $f_c = 23,32 MPa$	142
B.2 Série de concretagem II; corpos-de-prova com $f_c = 28,42 MPa$	146
B.3 Série de concretagem III; corpos-de-prova com $f_c = 37,08 MPa$	148
Anexo C Ensaio de Resistência à Tração do CFC	152
Anexo D Resultados dos Ensaios de Aderências	159
D.1 Resultado do ensaio MCLI-1	159
D.2 Resultado do ensaio MCLI-2	160
D.3 Resultado do ensaio MCLII-1	161
D.4 Resultado do ensaio MCLII-2	162
D.5 Resultado do ensaio MCLIII-1	163
D.6 Resultado do ensaio MCLIII-2	164
D.7 Resultado do ensaio MCRI-1	165
D.8 Resultado do ensaio MCRI-2	166
D.9 Resultado do ensaio MCRI-3	167
D.10 Resultado do ensaio MCRII-1	168
D.11 Resultado do ensaio MCRII-2	169
D.12 Resultado do ensaio MCRIII-1	170
D.13 Resultado do ensaio MCRIII-2	171
D.14 Resultado do ensaio CDLI-1	172
D.15 Resultado do ensaio CDLII-1	173
D.16 Resultado do ensaio CDLIII-1	174
D.17 Resultado do ensaio CDRII-1	175
D.18 Resultado do ensaio CDRIII-1	176

Lista de figuras

Figura 2.1 – Distribuição de tensões numa seção transversal de concreto armado reforçado com CFC (Neubauer e Rostásy, 1996).	33
Figura 2.2 – Esquema de ensaio de Miller e Nanni (1999) cotas em <i>mm</i> .	34
Figura 2.3 – Curva $\tau \times s$ para os corpos-de-prova; adaptada de Miller e Nanni (1999).	35
Figura 2.4 – Esquema das vigas ensaiadas por Harmon <i>et alii</i> (1999) cotas <i>cm</i> .	37
Figura 2.5 – Comparação das curva $\tau \times s$ do tecido da Mbrace e da Zoltek Corporation; adaptada de Harmon <i>et alii</i> (1999).	37
Figura 2.6 – Armação das viga ensaiada por Kalifa <i>et alii</i> (1999).	38
Figura 2.7 – Esquema das vigas ensaiadas por Kalifa <i>et alii</i> (1999).	39
Figura 2.8 – Diagrama força x deformação específica vertical para as vigas BT2 e BT3; adaptada de Kalifa <i>et alii</i> (1999).	40
Figura 2.9 – Força vs flecha no meio do vão; adaptada de Kalifa <i>et alii</i> (1999).	40
Figura 2.10 – Comportamento das interfaces dos materiais: (a) divisão em zonas ao longo da interface CFC/Concreto; (b) curva $\tau \times s$; adaptada de Leung e Yang (1999).	46
Figura 2.11 – Modelo para o descolamento do CFC do substrato de concreto; adaptada de Leung e Yang (1999).	47
Figura 2.12 – Desenho esquemático das vigas ensaiadas (medidas em <i>mm</i>); adaptada de Cruz e Barros (2003).	43
Figura 2.13 – Ruptura por força cortante; adaptada de Cruz e Barros (2003).	43
Figura 2.14 – Reforço de CFC para força cortante; adaptada de Cruz e Barros (2003).	44
Figura 2.15 – Curva $\tau \times \varepsilon$ obtida na lâmina de CFC depois do reforço lateral; adaptada de Cruz e Barros (2003).	44
Figura 2.16 – Curva $\tau \times s$ tensão do adesivo; adaptada de Cruz e Barros (2003).	45
Figura 2.17 – Gráfico tensão média de aderência x comprimento de aderência; adaptada de CHAJES <i>et al.</i> (1996).	49

Figura 2.18– Gráfico tensão média de aderência x comprimento de aderência para dois tipos de CFC; adaptada de ADHIKARY e MUTSUYOSHI (2001).	49
Figura 2.19 – Gráfico carga de ruptura x comprimento de aderência; adaptada de CHAJES <i>et al.</i> (1996).	50
Figura 2.20 – Corpo-de-prova para o ensaio de aderência; adaptada de NAKABA <i>et al.</i> (2001).	51
Figura 2.21 – Tensão de aderência vs deslocamento; adaptada de NAKABA <i>et al.</i> (2001).	52
Figura 2.22 – Relação tensão de aderência – deslocamento triangular; adaptada de YUN e WU <i>apud</i> CHEN e TENG (2001).	53
Figura 3.1 – Esquema do ensaio de tração-compressão.	55
Figura 3.2 – Ensaio à tração por compressão diametral.	60
Figura 3.3 – Corpos-de-prova cilíndricos de concreto com extensômetros elétricos de resistência colados à sua meia altura.	61
Figura 3.4 – Sistema de aplicação da força ao corpo-de-prova.	62
Figura 3.5 – Gráfico tensão x deformação específica do corpo-de-prova 1 da série I.	63
Figura 3.6 – Gráfico tensão x deformação específica do corpo-de-prova 2 da série I.	63
Figura 3.7 – Gráfico tensão x deformação específica do corpo-de-prova 1 da série II.	64
Figura 3.8 – Gráfico tensão x deformação específica do corpo-de-prova 1 da série III.	64
Figura 3.9 – Gráfico tensão x deformação específica do corpo-de-prova 2 da série III.	65
Figura 3.10 – Tecido de fibra de carbono, tipo N-300.	67
Figura 3.11 – Verso do tecido de fibra de carbono tipo N-300 com destaque para a costura.	67
Figura 3.12 – Corpos-de-prova CFC revestidos com resina epóxi.	68
Figura 3.13 – Dimensões dos corpos-de-prova para ensaio de tração; adaptada da norma ASTM D 3039/3039M.	69
Figura 3.14 – Gráfico tensão x deformação específica dos corpos-de-prova de CFC.	70

Figura 3.15 – Ensaios dos corpos-de-prova de compósitos de fibra de carbono com placas de alumínio nas extremidades.	71
Figura 3.16 – Resina de imprimação: Componente A e componente B.	73
Figura 3.17 – Resina epóxi: componente A e componente B.	74
Figura 3.18 – Formas de madeira para a confecção dos corpos-de-prova de concreto.	75
Figura 3.19 – Corpos-de-prova de concreto (medidas em cm).	75
Figura 3.20 – Posicionamento dos corpos-de-prova para a colagem do CFC.	76
Figura 3.21 – Corpos-de-prova após a aplicação do primer.	77
Figura 3.22 – Aplicação do tecido no corpo-de-prova.	77
Figura 3.23 – Posicionamento dos extensômetros elétricos no CFC e no concreto (medidas em mm).	78
Figura 3.24 – Posicionamento dos LVDT nos corpos-de-prova.	79
Figura 3.25 – Desenho esquemático e equipamentos do ensaio de tração-compressão.	79
Figura 3.26 – Vista frontal do ensaio de tração-compressão.	80
Figura 3.27 – Vistas laterais do ensaio de tração-compressão.	80
Figura 3.28 – Vista superior do ensaio de tração-compressão.	80
Figura 3.29 – Esquema do ensaio de aderência com tração-compressão.	80
Figura 3.30 – CFC inadequado para os ensaios de aderência, com destaque para as aberturas da malha e sentido das fibras.	82
Figura 3.31 – Detalhe da largura do CFC após o manuseio do corpo-de-prova MCLI-3.	83
Figura 3.32 – Ruptura do tecido no comprimento descolado do corpo-de-prova MCLII-2.	83
Figura 4.1 – Forças de ruptura dos corpos-de-prova.	84
Figura 4.2 – Ruptura por arrancamento do substrato de concreto no início da ancoragem do corpo-de-prova MCLI-1.	86
Figura 4.3 – Ruptura por descolamento do tecido com arrancamento do substrato de concreto no início da ancoragem do corpo-de-prova MCLI-2.	86
Figura 4.4 – Ruptura por descolamento do tecido com arrancamento do concreto no início da ancoragem do corpo-de-prova MCLII-1.	87
Figura 4.5 – Ruptura por arrancamento do substrato de concreto no início da	

ancoragem do corpo-de-prova MCLII-2.	87
Figura 4.6 – Ruptura por descolamento do tecido com arrancamento do concreto no início da ancoragem do corpo-de-prova MCLIII-1.	87
Figura 4.7 – Ruptura por descolamento do tecido com fissuras no bloco de concreto no início da ancoragem do corpo-de-prova MCLIII-2.	88
Figura 4.8 – Ruptura no tecido de CFC ao longo do comprimento descolado do corpo-de-prova MCRI-1 (corpo-de-prova descartado).	88
Figura 4.9 – Ruptura por arrancamento do substrato de concreto no início da ancoragem do corpo-de-prova MCRI-2.	88
Figura 4.10 – Ruptura por arrancamento do substrato de concreto no início da ancoragem do corpo-de-prova MCRI-3.	89
Figura 4.11 – Ruptura por descolamento seguido de separação das fibras do tecido de CFC do corpo-de-prova MCRII-1.	89
Figura 4.12 – Ruptura por arrancamento do substrato de concreto no início da ancoragem do corpo-de-prova MCRII-2.	89
Figura 4.13 – Ruptura por arrancamento do substrato de concreto no início da ancoragem do corpo-de-prova MCRIII-1.	90
Figura 4.14 – Ruptura por descolamento seguido de separação das fibras do tecido de CFC do corpo-de-prova MCRIII-2.	90
Figura 4.15 – Ruptura por arrancamento do substrato de concreto no início da ancoragem do corpo-de-prova CDLI-1.	90
Figura 4.16 – Ruptura por arrancamento do substrato de concreto no início da ancoragem do corpo-de-prova CDLII-1.	91
Figura 4.17 – Ruptura por arrancamento do substrato de concreto no início da ancoragem do corpo-de-prova CDLIII-1.	91
Figura 4.18 – Ruptura por descolamento do tecido com arrancamento do concreto no início da ancoragem do corpo-de-prova CDRII-1.	91
Figura 4.19 – Ruptura por descolamento seguido de separação das fibras do tecido de CFC do corpo-de-prova CDRIII-1.	92
Figura 4.20 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCLI-1.	92
Figura 4.21 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCLI-2.	93

Figura 4.22 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCLII-1.	93
Figura 4.23 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCLII-2.	93
Figura 4.24 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCLIII-1.	94
Figura 4.25 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCLIII-2.	94
Figura 4.26 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCRI-1 (corpo-de-prova descartado).	94
Figura 4.27 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCRI-2.	95
Figura 4.28 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCRI-3.	95
Figura 4.29 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCRII-1.	95
Figura 4.30 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCRII-2.	96
Figura 4.31 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCRIII-1.	96
Figura 4.32 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCRIII-2.	96
Figura 4.33 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova CDLI-1.	97
Figura 4.34 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova CDLII-1.	98
Figura 4.35 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova CDLIII-1.	98
Figura 4.36 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova CDRII-1.	98
Figura 4.37 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova CDRIII-1.	99
Figura 4.38 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-	

de-prova MCLI-1.	100
Figura 4.39 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova MCLI-2.	100
Figura 4.40 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova MCLII-1.	101
Figura 4.41 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova MCLII-2.	101
Figura 4.42 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova MCLIII-1.	101
Figura 4.43 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova MCLIII-2.	102
Figura 4.44 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova MCRI-1 (corpo-de-prova descartado).	102
Figura 4.45 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova MCRI-2.	102
Figura 4.46 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova MCRI-3.	103
Figura 4.47 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova MCRII-1.	103
Figura 4.48 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova MCRII-2.	103
Figura 4.49 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova MCRIII-1.	104
Figura 4.50 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova MCRIII-2.	104
Figura 4.51 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova CDLI-1.	105
Figura 4.52 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova CDLII-1.	105
Figura 4.53 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova CDLIII-1.	105
Figura 4.54 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova CDRII-1.	106

Figura 4.55 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova CDRIII-1.	106
Figura 4.56 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCLI-1.	107
Figura 4.57 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCLI-2.	107
Figura 4.58 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCLII-1.	108
Figura 4.59 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCLII-2.	108
Figura 4.60 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCLIII-1.	108
Figura 4.61 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCLIII-2.	109
Figura 4.62 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCRI-1.	109
Figura 4.63 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCRI-2.	109
Figura 4.64 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCRI-3.	110
Figura 4.65 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCRII-1.	110
Figura 4.66 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCRII-2.	110
Figura 4.67 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCRIII-1.	111
Figura 4.68 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCRIII-2.	111
Figura 4.69 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova CDLI-1.	111
Figura 4.70 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova CDLII-1.	112
Figura 4.71 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de	

ancoragem para o corpo-de-prova CDLIII-1.	112
Figura 4.72 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova CDRII-1.	112
Figura 4.73 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova CDRIII-1.	113
Figura 4.74 – Resistência aderência f_b vs. resistência do concreto f_c .	115
Figura 4.75 – Resistência de aderência f_b vs tipo de superfície do concreto.	116
Figura 4.76 – Gráfico força x deformação específica do CFC 1 para ciclos de carga e descarga do extensômetros 1 do corpo-de-prova CDLI-1.	117
Figura 4.77 – Gráfico força x deformação específica do CFC 1 para ciclos de carga e descarga do extensômetros 2 do corpo-de-prova CDLI-1.	117
Figura 4.78 – Gráfico força x deformação específica do CFC 1 para ciclos de carga e descarga do extensômetros 1 do corpo-de-prova CDLII-1.	118
Figura 4.79 – Gráfico força x deformação específica do CFC 1 para ciclos de carga e descarga do extensômetros 2 do corpo-de-prova CDLII-1.	118
Figura 4.80 – Gráfico força x deformação específica do CFC 1 para ciclos de carga e descarga do extensômetros 1 do corpo-de-prova CDLIII-1.	118
Figura 4.81 – Gráfico força x deformação específica do CFC 1 para ciclos de carga e descarga do extensômetros 2 do corpo-de-prova CDLIII-1.	119
Figura 4.82 – Gráfico força x deformação específica do CFC 1 para ciclos de carga e descarga do extensômetros 1 do corpo-de-prova CDRII-1.	119
Figura 4.83 – Gráfico força x deformação específica do CFC 1 para ciclos de carga e descarga do extensômetros 2 do corpo-de-prova CDRII-1.	119
Figura 4.84 – Gráfico força x deformação específica do CFC 1 para ciclos de carga e descarga do extensômetros 1 do corpo-de-prova CDRIII-1.	120
Figura 4.85 – Gráfico força x deformação específica do CFC 1 para ciclos de carga e descarga do extensômetros 2 do corpo-de-prova CDRIII-1.	120
Figura 4.86 – Resistência à compressão f_c vs. energia de fratura $G_{F,teórica}$.	123
Figura 4.87 – Resistência de aderência f_b vs. energia de fratura $G_{F,teórica}$.	124
Figura 4.88 – Tensões principais atuantes no substrato de concreto.	126
Figura 4.89 – Detalhe das tensões principais atuantes no substrato de concreto.	126
Figura 4.90 – Critério de ruptura de Coulomb-Mohr generalizado para o concreto.	

	126
Figura 4.91 – Gráfico $\frac{f_b}{\tau_{máx}}$ vs. resistência à compressão do concreto f_c .	129
Figura 4.92 – Resistência de aderência para concretos com resistência f_c acima de $15 MPa$.	130
Figura B.1 – Gráfico tensão x deformação específica para o CP1 dos corpos-de-prova com $f_c = 23,32 MPa$.	144
Figura B.2 – Gráfico tensão x deformação específica para o CP2 dos corpos-de-prova com $f_c = 23,32 MPa$.	145
Figura B.3 – Gráfico tensão x deformação específica para o CP3 dos corpos-de-prova com $f_c = 28,42 MPa$.	147
Figura B.4 – Gráfico tensão x deformação específica para o CP1 dos corpos-de-prova com $f_c = 37,08 MPa$.	149
Figura B.5 – Gráfico tensão x deformação específica para o CP2 dos corpos-de-prova com $f_c = 37,08 MPa$.	151
Figura C.1 – Gráfico tensão x deformação específica do o CP1.	153
Figura C.2 – Gráfico tensão x deformação específica do o CP2.	154
Figura C.3 – Gráfico tensão x deformação específica do o CP3.	155
Figura C.4 – Gráfico tensão x deformação específica do o CP4.	156
Figura C.5 – Gráfico tensão x deformação específica do o CP5.	157
Figura C.6 – Gráfico tensão x deformação específica do o CP6.	158
Figura D.1 – Gráfico carga x deformação específica do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova MCLI-1.	159
Figura D.2 – Gráfico carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova MCLI-1.	159
Figura D.3 – Gráfico carga x deformação específica do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova MCLI-2.	160
Figura D.4 – Gráfico carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova MCLI-2.	160
Figura D.5 – Gráfico carga x deformação específica do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova MCLII-1.	161
Figura D.6 – Gráfico carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova	

MCLII-1.	161
Figura D.7 – Gráfico carga x deformação específica do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova MCLII-2.	162
Figura D.8 – Gráfico carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova MCLII-2.	162
Figura D.9 – Gráfico carga x deformação específica do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova MCLIII-1.	163
Figura D.10 – Gráfico carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova MCLIII-1.	163
Figura D.11 – Gráfico carga x deformação específica do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova MCLIII-2.	164
Figura D.12 – Gráfico carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova MCLIII-2.	164
Figura D.13 – Gráfico carga x deformação específica do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova MCRI-1.	165
Figura D.14 – Gráfico carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova MCRI-1.	165
Figura D.15 – Gráfico carga x deformação específica do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova MCRI-2.	166
Figura D.16 – Gráfico carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova MCRI-2.	166
Figura D.17 – Gráfico carga x deformação específica do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova MCRI-3.	167
Figura D.18 – Gráfico carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova MCRI-3.	167
Figura D.19 – Gráfico carga x deformação específica do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova MCRII-1.	168
Figura D.20 – Gráfico carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova MCRII-1.	168
Figura D.22 – Gráfico carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova MCRII-2.	169
Figura D.23 – Gráfico carga x deformação específica do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova MCRIII-1.	170

Figura D.24 – Gráfico carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova MCRIII-1.	170
Figura D.25 – Gráfico carga x deformação específica do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova MCRIII-2.	171
Figura D.26 – Gráfico carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova MCRIII-2.	171
Figura D.27 – Gráfico carga x deformação específica do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova CDLI-1.	172
Figura D.28 – Gráfico carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova CDLI-1.	172
Figura D.29 – Gráfico carga x deformação específica do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova CDLII-1.	173
Figura D.30 – Gráfico carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova CDLII-1.	173
Figura D.31 – Gráfico carga x deformação específica do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova CDLIII-1.	174
Figura D.32 – Gráfico carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova CDLIII-1.	174
Figura D.33 – Gráfico carga x deformação específica do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova CDRII-1.	175
Figura D.34 – Gráfico carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova CDRII-1.	175
Figura D.35 – Gráfico carga x deformação específica do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova CDRIII-1.	176
Figura D.36 – Gráfico a carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova CDRIII-1.	176

Lista de tabelas

Tabela 3.1 – Consumo de material por m ³ de concreto.	57
Tabela 3.2 – Valores do abatimento do tronco de cone.	57
Tabela 3.3 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão do concreto no dia do ensaio de aderência CFC-concreto.	58
Tabela 3.4 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão do concreto para 28 dias.	59
Tabela 3.5 – Resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral.	60
Tabela 3.6 – Resultados do ensaio do módulo de elasticidade do concreto da série I.	63
Tabela 3.7 – Resultados do ensaio do módulo de elasticidade do concreto da série II.	64
Tabela 3.8 – Resultados do ensaio do módulo de elasticidade do concreto da série III.	65
Tabela 3.9 – Valores calculados para módulo de elasticidade do concreto.	65
Tabela 3.10 – Dimensões dos corpos-de-prova adotadas para ensaio de tração em materiais compósitos de fibras de carbono; adaptada da ASTM D3039/3039M.	68
Tabela 3.11 – Resultados dos ensaios de resistência à tração dos corpos-de-prova de CFC.	70
Tabela 3.12 – Resultados dos ensaios de resistência à tração dos corpos-de-prova de CFC (material com características inadequadas).	81
Tabela 3.13 – Forças e modos de ruptura.	82
Tabela 4.1 – Forças e modos de ruptura.	85
Tabela 4.2 – Resistências últimas de aderência dos corpos-de-prova.	114
Tabela 4.3 – Resistência de aderência vs tipo de superfície do concreto.	116
Tabela 4.4 – Relação entre a resistência de aderência f_b , obtido pela equação 4.3 e a energia de fratura teórica $G_{F,teórica}$ obtida com expressão 4.8.	122
Tabela 4.5 – resultados da calibração de c_2 pela equação 4.14.	125

Tabela 4.6 – Análise da tensão $\tau_{máx}$, calculada pela equação 4.18.	128
Tabela A.1 – Resultados da análise granulométrica do agregado miúdo: resíduos passantes e retidos.	138
Tabela A.2 – Resultados da análise granulométrica do agregado graúdo: resíduos passantes e retidos.	139
Tabela B.1 – Resultados obtidos do ensaio de módulo de elasticidade do concreto para o CP1 da série I.	142
Tabela B. 2 – Resultados obtidos do ensaio de módulo de elasticidade do concreto para o CP2 dos da série I.	144
Tabela B. 3 – Resultados obtidos do ensaio do módulo de elasticidade do concreto para o CP1 da série II.	146
Tabela B.4 – Resultados obtidos do ensaio do módulo de elasticidade do concreto para o CP1 da série III.	148
Tabela B.5 – Resultados obtidos do ensaio do módulo de elasticidade do concreto para o CP2 dos corpos-de-prova da série III.	150
Tabela C.1 – Leituras do indicador manual de deformações VISHAY, no ensaio de resistência à tração do CFC do CP1.	152
Tabela C.2 – Leituras do indicador manual de deformações VISHAY, no ensaio de resistência à tração do CFC do CP2.	154
Tabela C.3 – Leituras do indicador manual de deformações VISHAY, no ensaio de resistência à tração do CFC do CP3.	155
Tabela C.4 – Leituras do indicador manual de deformações VISHAY, no ensaio de resistência à tração do CFC do CP4.	156
Tabela C.5 – Leituras do indicador manual de deformações VISHAY, no ensaio de resistência à tração do CFC do CP5.	157
Tabela C.6 – Leituras do indicador manual de deformações VISHAY, no ensaio de resistência à tração do CFC do CP6.	158

Lista de Símbolos

Romanos

A_c	Área da seção transversal do concreto
A_f	Área da seção transversal do CFC
b_c	Largura do elemento de concreto
b_f	Largura do CFC
b_ℓ	Largura do reforço
b_p	Largura do compósito
b_w	Largura da viga
C_F	Coefficiente
CFC	Compósito de fibra de carbono
c_2	Coefficiente
d	Diâmetro
D	Altura viga
$D_{m\acute{a}x}$	Dimensão máxima característica do agregado
E	Módulo de elasticidade
E_c	Módulo de elasticidade do concreto
E_{cs}	Módulo de elasticidade secante do concreto
E_f	Módulo de elasticidade do CFC
E_ℓ	Módulo de elasticidade do reforço
E_p	Módulo de elasticidade do compósito
$E_{sec,n}$	Módulo de deformação secante

F_c	Força aplicada no concreto
F_f	Força aplicada na fibra
$F_{máx}$	Força máxima aplicada no CFC
F_s	Força aplicada na armadura
F_u	Força última
$f_{ct,sp}$	Resistência à tração indireta do concreto
f_b	Resistência de aderência
f_{bu}	Resistência de aderência última
$f_{b,k}$	Resistência de aderência característica
f_c	Resistência à compressão do concreto
$f_{c,28}$	Resistência à compressão do concreto aos 28 dias
f_{ct}	Resistência à tração do concreto
f_{ctm}	Resistência à tração média do concreto
f_{real}	Resistência à compressão do concreto obtido no ensaio do módulo de elasticidade
f_t	Resistência à tração
f_{tf}	Resistência à tração do CFC
G_F	Energia de fratura total
$G_{F,teórica}$	Energia de fratura segundo o modelo de Holzenkämpfer
$G_{F,K}$	Energia de fratura característica
h	Altura
k	Coefficiente
K_b	Coefficiente que considera a influência da largura relativa do compósito sobre a largura do elemento de concreto

L	Comprimento; leitura do frasco (volume ocupado pelo conjunto água – agregado miúdo)
l_b	Comprimento embutido
$l_{b,efet}$	Comprimento de ancoragem efetivo
l_f	Comprimento de ancoragem segundo o modelo de Holzenkämpfer
l_o	Distância inicial entre dois pontos onde são obtidas as medidas das deformações específicas
l_1	Comprimento descolado
MF	Módulo de finura
n_f	Relação entre os módulos de elasticidade do CFC e do concreto
n	Número de elementos infinitesimais; Variação dos níveis de aplicação de carga, 0,1.....0,7 ou 0,8
P	Força de ruptura; força lida na célula de carga
P_a	Peso do agregado miúdo
P_b	Peso do agregado graúdo
P_{rec}	Peso do recipiente
PRF	Polímero reforçado com fibra
P_u	Força última de aderência
s	Deslocamento relativo entre o CFC e o concreto
$s_{máx}$	Deslocamento relativo a $\tau_{b,máx}$
$T_{u,máx}$	Valor máximo para a força de aderência última
t_a	Espessura do adesivo
t_f	Espessura do compósito do CFC
t_ℓ	Espessura do reforço
t_p	Espessura do compósito

V_{rec} Volume do recipiente

Z_s Altura útil da armadura

Z_f Altura útil do CFC

Gregos

β_L Coeficiente adimensional que relaciona o comprimento de aderência com o comprimento de aderência efetivo

β_p Coeficiente adimensional que relaciona a largura do compósito com a do elemento de concreto

ΔL Distância entre dois pontos nos quais foram obtidas as deformações específicas

$\Delta \ell_b$ Distância entre os pontos onde são obtidas as medidas

δ_1 Deslocamento correspondente à tensão máxima de aderência

δ_b Massa específica real do agregado graúdo

δ_f Deslocamento máximo

ε Deformação específica

ε_b Deformação específica média no concreto

ε_c Deformação específica do concreto

ε_{co} Deformação específica inicial no concreto

ε_f Deformação específica do CFC

ε_{fu} Deformação específica última no CFC

$\varepsilon_{f,i}$ Deformação específica no laminado de PRF na seção i

$\varepsilon_{f,i+1}$ Deformação específica no laminado de PRF na seção $i + 1$

ε_{inf} Deformação específica correspondente à tensão inferior inicial

ε_n Deformação específica correspondente à tensão σ_n

ε_0	Deformação específica correspondente à leitura ℓ_o
ε_s	Deformação específica na armadura
ε_{so}	Deformação específica inicial na armadura
γ	Massa específica do agregado miúdo
γ_a	Massa específica aparente do agregado miúdo
γ_b	Massa específica aparente do agregado graúdo
ρ_f	Taxa geométrica da armadura de CFC
σ	Tensão
σ_c	Tensão normal no concreto
σ_f	Tensão normal no CFC
σ_{ij}	Tensor de tensões
σ_{inf}	Tensão inferior correspondente à 0,5MPa
σ_n	Tensão considerada para o cálculo do módulo secante
σ_1, σ_2	Tensões principais atuantes no substrato de concreto
τ	Tensão tangencial
τ_b	Tensão de aderência
τ_{bk}	Tensão de aderência característica
$\tau_{b,máx}$	Tensão de aderência máxima
τ_{bu}	Tensão última de aderência
τ_f	Tensão tangencial no tecido de CFC
τ_{II}	Tensão de aderência para a região II
$\tau_{máx}$	Tensão tangencial máxima