

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Juliana Martinelli Meneghel

Análise Experimental da Aderência entre o Concreto e Compósitos com Tecido de Fibras de Carbono

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
Junho de 2005



Juliana Martinelli Meneghel

Análise experimental da aderência entre o concreto e compósitos com tecido de fibras de carbono

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.

Prof. Giuseppe Barbosa Guimarães, D.Sc.

Orientador

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof. Emil de Souza Sánchez Filho, D.Sc.

Co-orientador

Universidade Federal de Juiz de Fora

Profa. Marta de Souza Lima Velasco, D.Sc.

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Robson Luiz Gaiofatto, D.Sc.

Universidade Católica de Petrópolis

Profa. Maria Elisabeth da Nóbrega Tavares, D.Sc.

Universidade Estadual do Rio de Janeiro

Prof. José Eugênio Leal.

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 10 de Junho de 2004.

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

Juliana Martinelli Meneghel

Graduou-se em Engenharia Civil na UFJF (Universidade Federal de Juiz de Fora). Na UFJF, desenvolveu projetos de Iniciação Científica na área de Aderência entre Elementos Estruturais de Concreto e Compósitos de Fibras de Carbono. Na PUC-Rio desenvolveu seu trabalho de pesquisa com ênfase em Concreto Armado.

Ficha Catalográfica

Meneghel, Juliana Martinelli

Análise experimental da aderência entre o concreto e compósitos com tecido de fibras de carbono / Juliana Martinelli Meneghel; orientadores: Giuseppe Barbosa Guimarães, Emil de Souza Sánchez Filho. – Rio de Janeiro: PUC-Rio, Departamento de Engenharia Civil, 2005.

203 f.; 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, Argeu e Dalva e ao meu noivo Thiago,
pelo amor, apoio e paciência.

Agradecimentos

Ao professor Giuseppe Guimarães, pela orientação e cooperação recebidos ao longo da realização deste trabalho.

Ao co-orientador, professor Emil de Souza Sanchez Filho, pela paciência, compreensão e apoio.

Aos meus pais e às minhas irmãs Manuela e Natália pelo apoio, carinho e compreensão ao longo destes dois anos de trabalho.

Ao meu noivo Thiago pelo amor, apoio, paciência, compreensão e companheirismo.

Aos meus tios Alair e Dirce e meu primo Roberto por terem me recebido com tanto carinho em sua casa.

Aos funcionários Euclídes, José Nilson, Evandro e Aroldo pela cooperação e ajuda na realização deste trabalho.

Aos meus amigos, em especial à Patrícia, Juliana, Marcélia, Leandro e Julio que tanto contribuíram com este trabalho e pelo sufoco e alegria que passamos juntos.

À RHEOTEC, em especial ao Prof. Robson Luiz Gaiofatto, pelo fornecimento de todo o tecido de fibra de carbono e resinas necessário e essencial para essa pesquisa.

À CAPES pelo apoio financeiro.

E a todos que contribuíram de alguma forma para que esse trabalho se realizasse.

Resumo

Meneghel, Juliana Martinelli; Guimarães, Giuseppe Barbosa; Sanchez Filho, Emil de Souza. **Análise Experimental da Aderência entre o Concreto e Compósitos com Tecido de Fibras de Carbono**. Rio de Janeiro, 2005. 203p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

É descrito neste trabalho um programa experimental sobre a aderência entre os compósitos com tecido de fibras de carbono e o concreto. Este programa experimental consistiu em ensaios de tração-compressão de corpos-de-prova compostos de dois blocos de concreto (móvel e fixo) colados por tiras de tecido de fibra de carbono coladas nos lados opostos desses blocos. Foram ensaiados nove corpos-de-prova, com três resistências à compressão aos 28 dias de 20,5 *MPa*, 28,7 *MPa* e 38,1 *MPa* e duas larguras do tecido iguais a 50 *mm* e 100 *mm*. Todos os corpos-de-prova foram concretados, instrumentados e ensaiados no Laboratório de Estruturas e Materiais da PUC-Rio. O objetivo deste trabalho foi estudar a influência da resistência do concreto e da largura do tecido de fibra de carbono sobre as tensões últimas de aderência do sistema. Os resultados mostraram que a tensão última de aderência pode ser considerada independente da resistência do concreto e da largura do tecido. Foi obtido, neste estudo, um valor característico de 1,45 *MPa* para a tensão última de aderência.

Palavras-chave

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

Abstract

Meneghel, Juliana Martinelli; Guimarães, Giuseppe Barbosa; Sánchez Filho, Emil de Souza (Advisors). **Experimental Analysis on Bond Between Concrete and Carbon Fiber Composites Fabric**. Rio de Janeiro, 2005. 203p. MSc. Dissertation – Civil Engineering Department, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

An experimental study on the bond between carbon fiber fabric composites and concrete is described in this work. This experimental program consisted of tension-compression tests of specimens with two concrete blocks (movable and fixed) jointed by carbon fiber fabric strips bonded on two opposite sides of these blocks. Nine specimens, with three concrete compressive strength of $20,5\text{ MPa}$, $28,7\text{ MPa}$ and $38,1\text{ MPa}$ at 28 days and two fabric width of 50 mm and 100 mm , were tested. All specimens had the same geometrical characteristics. All the specimens were cast, instrumented and tested in the Structural and Materials Laboratory at PUC-Rio. The objective of this work was to study the influence of concrete strength and the width of the fabric on the ultimate bond stress of the system. The results showed that the ultimate bond stress may be considered independent of concrete strength and of the width of the fabric. A characteristic value of 1.45 MPa was found for the ultimate bond stress.

Keywords

Structural Strengthening; Concrete; Carbon Fiber Composites; Bond.

Sumário

1 Introdução	34
1.1. Histórico	34
1.2. Objetivos	35
1.3. Conteúdo	36
 2 Revisão Bibliográfica	 38
2.1. Introdução	38
2.2. Reforço Estrutural com Compósitos de Fibras de Carbono	38
2.2.1. Materiais Compósitos	40
2.2.2. Compósitos de Fibras de Carbono	40
2.2.3. Resinas Epóxi	43
2.3. Aderência entre o Substrato de Concreto e o CFC	45
2.3.1. Conceitos Fundamentais	45
2.3.2. Parâmetros que Influenciam a Aderência	47
2.3.2.1. Comprimento de Ancoragem do CFC	47
2.3.2.2. Resistência à Compressão do Concreto	49
2.3.2.3. Tipos de Adesivo e Tratamento da Superfície de Concreto	49
2.3.3. Equação Diferencial da Aderência entre o Concreto e o CFC	53
2.3.3.1. Lei $\tau \times s$ Bi-Linear	57
2.3.3.1.1. Ensaio de Aderência com Tração e Compressão	59
2.3.3.1.2. Ensaio de Aderência com Tração e Tração	63
2.3.4. Estudos sobre a Aderência	64
2.3.4.1. CHAJES et al. (1996)	64
2.3.4.2. NEUBAUER e ROSTÁSY (1999)	66
2.3.4.3. KURIHARA et al. (2000)	70
2.3.4.4. NAKABA et al. (2001)	73
2.3.4.5. CHEN e TENG (2001)	80
2.3.4.6. ADHIKARY e MUTSUYOSHI (2001)	86

2.3.4.7. Outros Estudos	88
3 Programa Experimental	94
3.1. Introdução	94
3.2. Materiais	95
3.2.1. Concreto	95
3.2.1.1. Resistência à Compressão Simples do Concreto	96
3.2.1.2. Módulo de Elasticidade do Concreto	99
3.2.2. Tecido de Fibra de Carbono	103
3.2.2.1 Ensaio de Resistência à Tração do Compósito de Fibra de Carbono	104
3.2.2.2. Materiais Necessários para a Aplicação do Tecido de Fibra de Carbono	107
3.2.2.2.1. Resina de Imprimação	108
3.2.2.2.2. Resina Epoxídica	109
3.3. Confeção dos Corpos-de-Prova	110
3.3.1. Formas	110
3.3.2. Corpos-de-Prova de Concreto	111
3.3.3. Concretagem	111
3.3.4. Colagem do Tecido de Fibra de Carbono	112
3.3.5. Instrumentação dos Corpos-de-Prova	113
3.4. Descrição dos Ensaios	116
3.4.1. Montagem	116
4 Apresentação e Análise dos Resultados	119
4.1 Introdução	119
4.2 Cargas e Modos de Ruptura	119
4.3 Deformações ao Longo do Comprimento de Ancoragem	126
4.4 Tensões de Aderência x Deformações do CFC	130
4.5 Tensões de Aderência ao Longo do Comprimento de Ancoragem	140
4.6 Tensões Últimas de Aderência	146
4.7 Fator de Efetividade das Tensões no CFC	150
4.8 Tensões de Aderência x Deslocamento Relativo entre o CFC e o	

Concreto	152
5 Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros	155
5.1 Conclusões	155
5.2 Sugestão para Trabalhos Futuros	156
Referências Bibliográficas	158
Anexo A Análise Granulométrica dos Agregados Graúdo e Miúdo	162
Anexo B Determinação das Massas Específicas dos Agregados Graúdo e Miúdo	166
Anexo C Determinação do Módulo de Elasticidade do Concreto	168
C.1. Dados Obtidos no Ensaio do Módulo de Elasticidade	168
C.1.1. Corpos de Prova com $f_{c,dosagem} = 25MPa$	168
C.1.2. Corpos de Prova com $f_{c,dosagem} = 35MPa$	172
C.1.3. Corpos de Prova com $f_{c,dosagem} = 45MPa$	178
Anexo D Ensaio de Resistência à Tração do CFC	185
Anexo E Gráficos dos Ensaio	191
E.1. L50-R25-1 (Piloto)	191
E.2. L50-R25-2	192
E.3. L50-R35-1	193
E.4. L50-R35-2	195
E.5. L50-R45-1	196
E.6. L50-R45-2	198
E.7. L100-R25	199
E.8. L100-R35	201
E.9. L100-R45	202

Lista de figuras

Figura 1.1 – Esquema simplificado do ensaio de tração-compressão.	35
Figura 2.1 – Obras recuperadas utilizando reforço com CFC; Fonte: www.mbrace.com (2004).	39
Figura 2.2 – Representação de um material compósito em reforço estrutural.	40
Figura 2.3 – Diagrama tensão-deformação específica, para diversos tipos de fibra; adaptada de ARAÚJO (2002 a).	41
Figura 2.4 – Chapas pultrudadas; adaptada de LIMA (2001).	42
Figura 2.5 – Tecido de fibra de carbono; www.mbrace.com (2004).	42
Figura 2.6 – Fios de fibra de carbono; adaptada de LIMA (2001).	43
Figura 2.7 – Distribuições da tensão de aderência e tensão normal ao longo do comprimento do laminado de PRF; adaptada do ACI 440 F (2000).	45
Figura 2.8 – Gráfico tensão média de aderência x comprimento de aderência; adaptada de CHAJES et al. (1996).	48
Figura 2.9 – Gráfico tensão média de aderência x comprimento de aderência para dois tipos de CFC; adaptada de ADHIKARY e MUTSUYOSHI (2001).	48
Figura 2.10 – Gráfico carga de ruptura x comprimento de aderência; adaptada de CHAJES et al. (1996).	48
Figura 2.11 – Gráfico tensão média de aderência x resistência à compressão do concreto; adaptada de CHAJES et al. (1996).	49
Figura 2.12 – Gráfico tensão média de aderência x resistência à compressão do concreto; adaptada de ADHIKARY e MUTSUYOSHI (2001).	49
Figura 2.13 – Parâmetros geométricos e mecânicos para a análise da	

aderência entre o CFC e o substrato de concreto.	53
Figura 2.14 – Parâmetros para a análise da distorção do adesivo.	54
Figura 2.15 – Ensaio de aderência CFC-concreto: a) ensaio T-C; b) ensaio T-T.	57
Figura 2.16 – Parâmetros para a análise do comportamento de uma lei bi-linear: diagrama $\tau \times s$.	57
Figura 2.17 – Sistema mecânico para a Região I.	58
Figura 2.18 – Sistema mecânico para a Região II.	59
Figura 2.19 – Parâmetros para a análise da aderência na Região II para o ensaio de T-C.	62
Figura 2.20 – Energia de fratura $G_{I,efet}$ do modo I; adaptada de NEUBAUER e ROSTÁSY (1999).	68
Figura 2.21 – Corpo-de-prova e equipamento para o ensaio de torque; adaptada de KURIHARA et al. (2000).	70
Figura 2.22 – Corpo-de-prova para o ensaio de aderência; adaptada de NAKABA et al. (2001).	73
Figura 2.23 – Posicionamento dos ERE; adaptada de NAKABA et al. (2001).	75
Figura 2.24 – Tensão de aderência x deslocamento; adaptada de NAKABA et al. (2001).	79
Figura 2.25 – Relação entre a tensão de aderência máxima e a resistência à compressão do concreto; adaptada de NAKABA et al. (2001).	80
Figura 2.26 – Relação tensão de aderência – deslocamento: (a) triangular; (b) decréscimo linear; adaptada de YUN e WU apud CHEN e TENG (2001).	81
Figura 2.27 – Corpos-de-prova para o ensaio de aderência; (a) Com uma chapa colada; (b) com duas chapas coladas; adaptada de CHEN e TENG (2001).	84

Figura 2.28 – Corpo-de-prova (medidas em mm); dos ensaios de ADHIKARY e MUTSUYOSHI (2001).	86
Figura 3.1 – Diagrama resistência x idade do concreto dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 25 MPa$.	98
Figura 3.2 – Diagrama resistência x idade do concreto dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 35 MPa$.	98
Figura 3.3 – Diagrama resistência x idade do concreto dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 45 MPa$.	98
Figura 3.4 – Gráfico tensão x deformação dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 25 MPa$.	100
Figura 3.5 – Gráfico tensão x deformação dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 35 MPa$.	101
Figura 3.6 – Gráfico tensão x deformação dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 45 MPa$.	101
Figura 3.7 – Sistema de aplicação das cargas e corpo-de-prova após o ensaio.	102
Figura 3.8 – Tecido de fibra de carbono com destaque para o sentido das fibras.	103
Figura 3.9 – Verso do tecido de fibra de carbono com destaque para a costura (em contato com o concreto).	103
Figura 3.10 – Dimensões dos corpos-de-prova para ensaio de tração; adaptada da norma ASTM D 3039/3039M.	105
Figura 3.11 – Gráfico tensão x deformação dos corpos-de-prova de CFC.	106
Figura 3.12 – Corpos-de-prova de tecidos de fibra de carbono revestidos com resina epóxi.	107
Figura 3.13 – Ensaio dos corpos-de-prova de compósitos de fibra de carbono com placas de alumínio nas extremidades: (a) vista frontal do	

corpo-de-prova antes do ensaio; (b) ruptura do corpo-de-prova.	107
Figura 3.14 – Resina de imprimação: (a) preparação; (b) mistura pronta para a aplicação.	109
Figura 3.15 – Resina epóxi: (a) componentes A e B; (b) preparação da resina para a aplicação.	110
Figura 3.16 – Formas de aço para a confecção dos corpos-de-prova de concreto.	111
Figura 3.17 – Corpos-de-prova de concreto (medidas em cm).	111
Figura 3.18 – Posicionamento dos corpos-de-prova para a colagem do CFC.	112
Figura 3.19 – Posicionamento dos extensômetros elétricos, mecânicos no corpo-de-prova L50-R25-1/piloto (medidas em mm).	114
Figura 3.20 – Posicionamento dos extensômetros elétricos no tecido e no concreto nos corpos-de-prova do grupo A exceto o L50-R25-1/piloto (medidas em mm).	115
Figura 3.21 – Posicionamento dos extensômetros elétricos no tecido e no concreto nos corpos-de-prova do grupo B (medidas em mm).	115
Figura 3.22 – Posicionamento dos LVDT nos corpos-de-prova.	116
Figura 3.23 – Equipamento do ensaio de tração-compressão.	117
Figura 3.24 – Esquema do ensaio.	118
Figura 4.1 – Cargas de ruptura dos corpos-de-prova.	121
Figura 4.2 – Ruptura por arrancamento do substrato de concreto do corpo-de-prova L50-R25-1/piloto.	122
Figura 4.3 – Ruptura por arrancamento do substrato de concreto do corpo-de-prova L50-R25-2.	123
Figura 4.4 – Ruptura por descolamento do tecido com arrancamento do concreto no início da ancoragem do corpo-de-prova L50-R35-1.	121
Figura 4.5 – Detalhe do descolamento do tecido do corpo-de-prova L50-	

R35-1.	123
Figura 4.6 – Ruptura por arrancamento parcial do substrato de concreto do corpo-de-prova L50-R35-2; detalhe do arrancamento.	123
Figura 4.7 – Ruptura por descolamento do tecido com arrancamento do concreto no início da ancoragem do corpo-de-prova L50-R45-1.	124
Figura 4.8 – Ruptura por arrancamento do substrato de concreto do corpo-de-prova L50-R45-2; detalhe do arrancamento.	124
Figura 4.9 – Ruptura por arrancamento do substrato de concreto do corpo-de-prova L100-R25.	124
Figura 4.10 – Ruptura do tecido no início da ancoragem do corpo-de-prova L100-R35.	125
Figura 4.11 – Ruptura por descolamento do tecido com arrancamento do concreto no início da ancoragem do corpo-de-prova L100-R45; detalhe do descolamento com rompimento do tecido.	125
Figura 4.12 – Deformação x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova L50-R25-1/ensaio piloto.	126
Figura 4.13 – Deformação x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova L50-R25-2.	126
Figura 4.14 – Deformação x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova L50-R35-1.	127
Figura 4.15 – Deformação x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova L50-R35-2.	127
Figura 4.16 – Deformação x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova L50-R45-1.	128
Figura 4.17 – Deformação x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova L50-R45-2.	128
Figura 4.18 – Deformação x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova L100-R25.	129
Figura 4.19 – Deformação x distância ao longo do comprimento de	

ancoragem para o corpo-de-prova L100-R35.	129
Figura 4.20 – Deformação x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova L100-R45.	130
Figura 4.21 – Tensão de aderência x deformação do CFC para o corpo-de-prova L50-R25-1/ piloto.	131
Figura 4.22 – Tensão de aderência x deformação do CFC para o corpo-de-prova L50-R25-2.	131
Figura 4.23 – Tensão de aderência x deformação do CFC para o corpo-de-prova L50-R35-1.	132
Figura 4.24 – Tensão de aderência x deformação do CFC para o corpo-de-prova L50-R35-2.	132
Figura 4.25 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova L50-R45-1.	133
Figura 4.26 – Tensão de aderência x deformação do CFC para o corpo-de-prova L50-R45-2.	133
Figura 4.27 – Tensão de aderência x deformação do CFC para o corpo-de-prova L100-R25.	134
Figura 4.28 – Tensão de aderência x deformação do CFC para o corpo-de-prova L100-R35.	134
Figura 4.29 – Tensão de aderência x deformação do CFC para o corpo-de-prova L100-R45.	135
Figura 4.30 – Tensão de aderência x deformação do CFC para os corpos-de-prova do grupo A referente ao trecho 0-1.	136
Figura 4.31 – Tensão de aderência x deformação do CFC para os corpos-de-prova do grupo B referente ao trecho 0-1.	136
Figura 4.32 – Tensão de aderência x deformação do CFC para os corpos-de-prova do grupo A referente ao trecho 1-2.	137
Figura 4.33 – Tensão de aderência x deformação do CFC para os corpos-de-prova do grupo B referente ao trecho 1-2.	137

Figura 4.34 – Tensão de aderência x deformação do CFC para os corpos-de-prova do grupo A referente ao trecho 2-3.	138
Figura 4.35 – Tensão de aderência x deformação do CFC para os corpos-de-prova do grupo B referente ao trecho 2-3.	138
Figura 4.36 – Tensão de aderência x deformação do CFC para os corpos-de-prova do grupo A referente ao trecho 3-4.	139
Figura 4.37 – Tensão de aderência x deformação do CFC para os corpos-de-prova do grupo B referente ao trecho 3-4.	139
Figura 4.38 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova L50-R25-2.	140
Figura 4.39 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova L50-R35-1.	141
Figura 4.40 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova L50-R35-2.	141
Figura 4.41 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova L50-R45-1.	142
Figura 4.42 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova L50-R45-2.	142
Figura 4.43 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova L100-R25.	143
Figura 4.44 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova L50-R35.	143
Figura 4.45 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova L100-R45.	144
Figura 4.46 – Gráfico comparativo entre as cargas aplicadas e as calculadas.	145
Figura 4.47 – Tensão última de aderência (equação 4.1) x largura do tecido.	147
Figura 4.48 – Tensão última de aderência (equação 4.2) x largura do	

tecido.	147
Figura 4.49 – Tensão última de aderência (equação 4.1) x resistência do concreto.	149
Figura 4.50 – Tensão última de aderência (equação 4.2.) x resistência do concreto.	149
Figura 4.51 – Fator de efetividade das tensões no CFC para todos os corpos-de-prova.	152
Figura 4.52 – Posicionamento dos extensômetros para o cálculo dos deslocamentos relativos entre o CFC e o concreto.	153
Figura 4.53 – Curva tensão de aderência x deslocamento para os corpos-de-prova do grupo A.	154
Figura 4.54 – Curva tensão de aderência x deslocamento para os corpos-de-prova do grupo B.	154
Figura C.1 – Gráfico tensão x deformação específica para o CP1 dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 25 MPa$.	169
Figura C.2 – Gráfico tensão x deformação específica para o CP2 dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 25 MPa$.	171
Figura C.3 – Gráfico tensão x deformação específica para o CP3 dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 25 MPa$.	172
Figura C.4 – Gráfico tensão x deformação específica para o CP1 dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 35 MPa$.	174
Figura C.5 – Gráfico tensão x deformação específica para o CP2 dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 35 MPa$.	176
Figura C.6 – Gráfico tensão x deformação específica para o CP3 dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 35 MPa$.	178
Figura C.7 – Gráfico tensão x deformação específica para o CP1 dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 45 MPa$.	181
Figura C.8 – Gráfico tensão x deformação específica para o CP2 dos	

corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 45 MPa$.	183
Figura C.9 – Gráfico tensão x deformação específica para o CP3 dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 45 MPa$.	184
Figura D.1 – Gráfico tensão x deformação específica para o CP1.	185
Figura D.2 – Gráfico tensão x deformação específica para o CP2.	186
Figura D.3 – Gráfico tensão x deformação específica para o CP3.	187
Figura D.4 – Gráfico tensão x deformação específica para o CP4.	188
Figura D.5 – Gráfico tensão x deformação específica para o CP5.	189
Figura D.6 – Gráfico tensão x deformação específica para o CP6.	190
Figura E.1 – Diagrama carga x deformação do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova L50-R25-1.	191
Figura E.2 – Diagrama carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova L50-R25-1.	191
Figura E.3 – Diagrama carga x deformação do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova L50-R25-2.	192
Figura E.4 – Diagrama carga x deformação do concreto do corpo-de-prova L50-R25-2.	192
Figura E.5 – Diagrama carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova L50-R25-2.	193
Figura E.6 – Diagrama carga x deformação do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova L50-R35-1.	193
Figura E.7 – Diagrama carga x deformação do concreto do corpo-de-prova L50-R35-1.	194
Figura E.8 – Diagrama carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova L50-R35-1.	194
Figura E.9 – Diagrama carga x deformação do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova L50-R35-2.	195
Figura E.10 – Diagrama carga x deformação do concreto do corpo-de-	

prova L50-R35-2.	195
Figura E.11 – Diagrama carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova L50-R35-2.	196
Figura E.12 – Diagrama carga x deformação do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova L50-R45-1.	196
Figura E.13– Diagrama carga x deformação do concreto do corpo-de-prova L50-R45-1.	197
Figura E.14 – Diagrama carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova L50-R45-1.	197
Figura E.15 – Diagrama carga x deformação do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova L50-R45-2.	198
Figura E.16 – Diagrama carga x deformação do concreto do corpo-de-prova L50-R45-2.	198
Figura E.17 – Diagrama carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova L50-R45-2.	199
Figura E.18 – Diagrama carga x deformação do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova L100-R25.	199
Figura E.19 – Diagrama carga x deformação do concreto do corpo-de-prova L100-R25.	200
Figura E.20 – Diagrama carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova L100-R25.	200
Figura E.21 – Diagrama carga x deformação do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova L100-R35.	201
Figura E.22 – Diagrama carga x deformação do concreto do corpo-de-prova L100-R35.	201
Figura E.23 – Diagrama carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova L100-R35.	202
Figura E.24 – Diagrama carga x deformação do tecido de fibra de carbono do corpo-de-prova L100-R45.	202

Figura E.25 – Diagrama carga x deformação do concreto do corpo-de-prova L100-R45. 203

Figura E.26 – Diagrama carga x deslocamento do bloco móvel do corpo-de-prova L100-R45. 203

Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Resultados para a tensão de aderência utilizando-se diversos tipos de adesivo e tratamento da superfície; adaptada de KURIHARA et al. (2000).	51
Tabela 2.2 – Resultados para diferentes tipos de adesivo; adaptada de CHAJES et al. (1996).	52
Tabela 2.3 – Resultados para diferentes tipos de tratamento da superfície; adaptada de CHAJES et al. (1996).	52
Tabela 2.4 – Rugosidade da superfície dos substratos de concreto; adaptada de KURIHARA et al. (2000).	72
Tabela 2.5 – Propriedades das fibras; adaptado de NAKABA et al. (2001).	74
Tabela 2.6 – Propriedades do concreto e da argamassa utilizados na confecção dos corpos-de-Prova; adaptada de NAKABA et al. (2001).	74
Tabela 2.7 - Resultados dos ensaios; adaptada de NAKABA et al. (2001).	76
Tabela 2.8 – Resultados experimentais para a carga máxima na face onde ocorreu a ruptura; adaptada de NAKABA et. al (2001).	77
Tabela 2.9 – Dados de ensaios provenientes da literatura; adaptada de CHEN e TENG (2001).	85
Tabela 2.10 – Dados de ensaios provenientes da literatura; adaptada de CHEN e TENG, (2001).	85
Tabela 2.11 – Resultados experimentais de ADHIKARY e MUTSUYOSHI (2001).	87
Tabela 2.12 – Resultados experimentais de ADHIKARY e MUTSUYOSHI (2001).	87
Tabela 2.13 – Razão entre as resistências de aderência experimentais e as calculadas; daptada de CHAJES et al. (1996).	93
Tabela 3.1 – Consumo de material por m^3 de concreto.	96
Tabela 3.2 – Valores do abatimento do tronco de cone em mm.	96

Tabela 3.3 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão do concreto dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 25 MPa$.	97
Tabela 3.4 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão do concreto dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 35 MPa$.	97
Tabela 3.5 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão do concreto dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 45 MPa$.	97
Tabela 3.6 – Resultado do ensaio do módulo de elasticidade do concreto dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 25 MPa$.	100
Tabela 3.7 – Resultado do ensaio do módulo de elasticidade do concreto dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 35 MPa$.	100
Tabela 3.8 – Resultado do ensaio do módulo de elasticidade do concreto dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 45 MPa$.	101
Tabela 3.9 – Comparações do módulo de elasticidade secante encontrado no ensaio com o prescrito pela NBR 6118.	102
Tabela 3.10 – Geometria dos corpos-de-prova recomendada para ensaio de tração em materiais compósitos de fibras de carbono; adaptada da ASTM D3039/3039M.	105
Tabela 3.11 – Resultados dos ensaios de resistência à tração dos corpos-de-prova de CFC.	106
Tabela 4.1 – Cargas e modos de ruptura.	120
Tabela 4.2 – Análise estatística das cargas de ruptura.	121
Tabela 4.3 – Comparação entre as cargas aplicadas e as cargas dadas pela curva tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem.	145
Tabela 4.4 – Análise estatística das tensões últimas de aderência dos corpos-de-prova considerados para a verificação da influência da largura do tecido.	146
Tabela 4.5 – Análise estatística das tensões últimas de aderência dos corpos-de-prova considerados para a verificação da influência da resistência do concreto.	148
Tabela 4.6 – Valor característico da tensão última de aderência.	150
Tabela 4.7 – Fator de efetividade das tensões no CFC para os corpos-de-	

prova do grupo A.	151
Tabela 4.8 – Fator de efetividade das tensões no CFC para os corpos-de-prova do grupo B.	152
Tabela 4.9 – Fator de efetividade das tensões no CFC para todos os corpos-de-prova.	153
Tabela A.1 – Valores dos resíduos passantes e retidos para o agregado graúdo.	163
Tabela A.2 – Valores resíduos passantes e retidos para o agregado miúdo.	164
Tabela C.1 – Dados e resultados obtidos do ensaio do módulo de elasticidade do concreto para o CP1 dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 25 MPa$.	168
Tabela C.2 – Dados e resultados obtidos do ensaio do módulo de elasticidade do concreto para o CP2 dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 25 MPa$.	169
Tabela C.3 – Dados e resultados obtidos do ensaio do módulo de elasticidade do concreto para o CP3 dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 25 MPa$.	171
Tabela C.4 – Dados e resultados obtidos do ensaio do módulo de elasticidade do concreto para o CP1 dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 35 MPa$.	172
Tabela C.5 – Dados e resultados obtidos do ensaio do módulo de elasticidade do concreto para o CP2 dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 35 MPa$.	174
Tabela C.6 – Dados e resultados obtidos do ensaio do módulo de elasticidade do concreto para o CP3 dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 35 MPa$.	176
Tabela C.7 – Dados e resultados obtidos do ensaio do módulo de elasticidade do concreto para o CP1 dos corpos-de-prova com $f_{c,dosagem} = 45 MPa$.	178
Tabela C.8 – Dados e resultados obtidos do ensaio do módulo de elasticidade do concreto para o CP2 dos corpos-de-prova com	

$f_{c,dosagem} = 45 MPa$. 181

Tabela C.9 – Dados e resultados obtidos do ensaio do módulo de elasticidade do concreto para o CP3 dos corpos-de-prova com

$f_{c,dosagem} = 45 MPa$. 183

Tabela D.1 – Dados obtidos no ensaio de resistência à tração do CFC para o CP1. 185

Tabela D.2 – Dados obtidos no ensaio de resistência à tração do CFC para o CP2 186

Tabela D.3 – Dados obtidos no ensaio de resistência à tração do CFC para o CP3. 187

Tabela D.4 – Dados obtidos no ensaio de resistência à tração do CFC para o CP4. 188

Tabela D.5 – Dados obtidos no ensaio de resistência à tração do CFC para o CP5. 189

Tabela D.6 – Dados obtidos no ensaio de resistência à tração do CFC para o CP6. 190

Lista de Símbolos

Romanos

A	Área
A_c	Área da seção transversal do concreto
A_f	Área da seção transversal do tecido de fibra de carbono
A_m	Área da seção transversal do concreto
b	Largura
b_a	Largura do adesivo
b_c	Largura do elemento de concreto
b_f	Largura do CFC
b_ℓ	Largura do CFC
b_p	Largura do CFC
C_F	Coeficiente
CFC	Compósito de fibra de carbono
d	Diâmetro
$D_{máx}$	Dimensão máxima característica do agregado
dx	Elemento diferencial
E	Módulo de elasticidade
E_{cs}	Módulo de elasticidade secante do concreto
E_f	Módulo de elasticidade do CFC
E_ℓ	Módulo de Elasticidade do CFC
E_m	Módulo de elasticidade do concreto

E_p	Módulo de elasticidade do CFC
F	Força aplicada no CFC
F_1 e F_2	Forças
F_u	Carga última
f_c	Resistência à compressão do concreto
f_{ck}	Resistência característica à compressão do concreto
f_{ct}	Resistência à tração da superfície de concreto
f_{ctm}	Resistência à tração média da superfície de concreto
f_p	Resistência última do PRF ou da lâmina de aço no escoamento
f_{real}	Resistência à compressão do concreto encontrada no ensaio do módulo de elasticidade
f_t	Resistência à tração
f_{tf}	Resistência à tração do CFC
G_a	Módulo de elasticidade transversal do adesivo
G_F	Energia de fratura total
$G_{F,B}$	Energia total de fratura relativa às fissuras inclinadas devidas à força cortante
$G_{I,B}$	Energia relativa ao modo II de fratura relativa à fissura proveniente da força cortante cortante
$G_{I,efet}$	Energia efetiva relativa ao modo I de fratura
$G_{I,f}$	Energia relativa ao modo I de fratura devida à fricção das faces da fissura
G_{II}	Energia relativa ao modo II de fratura
$G_{II,efet}$	Energia efetiva relativa ao modo II de fratura
I_p	Momento de inércia do CFC
k	Coeficiente

K_b	Coeficiente que considera a influência da largura relativa do compósito sobre a largura do elemento de concreto
k_p	Fator geométrico relacionado com a largura da chapa colada e a largura do elemento de concreto
L	Comprimento; Leitura do frasco (volume ocupado pelo conjunto água – agregado miúdo)
L_b	Comprimento de aderência
L_e	Comprimento de aderência efetivo
L_{efet}	Comprimento de aderência efetivo
L_{jd}	Comprimento de aderência linear
ℓ	Comprimento
ℓ	Comprimento de ancoragem
ℓ_0	Distância inicial entre dois pontos onde são obtidas as medidas de deformações específicas
ℓ_t	Comprimento de ancoragem vinculado à aderência
$\ell_{t,máx}$	Comprimento de ancoragem máximo vinculado à aderência
MF	Módulo de finura
M_t	Momento de torção
N	Força normal
N_c	Força de compressão no concreto
N_f	Força de tração no tecido de CFC
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_b	Peso do agregado graúdo
P_{carga}	Carga de tração no PRF

$P_{máx}$	Carga máxima aplicada no CFC
$P_{m,i-1}$	Força aplicada na seção “ $i-1$ ” do PRF
P_{rec}	Peso do recipiente
PRF	Polímero reforçado com fibra
P_u	Carga de ruptura
R	Força de aderência por unidade de comprimento
R_a	Valor absoluto médio da variação da altura da superfície do substrato de concreto
R_{σ}	Tensões Normais
$R_{\sigma,u}$	Valor máximo para as tensões normais
R_z	Diferença da altura média entre cinco picos mais altos e cinco vales mais profundos do comprimento da amostra medida para a determinação da rugosidade da superfície do substrato de concreto
s	Deslocamento relativo entre o CFC e o concreto
s_{f1}	Deslocamento linear da região I
s_{f2}	Deslocamento linear da região II
s_f	Deslocamento da fibra
s_f'	Derivada do deslocamento da fibra
$s'_{f,I}$	Derivada do deslocamento da fibra para a região I
s_f''	Derivada segunda do deslocamento da fibra
$s_{f,II}$	Deslocamento da fibra para a região II
$s''_{f,II}$	Derivada segunda do deslocamento da fibra para região II
s_i	Deslocamento relativo entre o concreto e o PRF na seção i
s_{i-1}	Deslocamento relativo entre o concreto e o PRF na seção $i-1$

s_{ℓ}	Deslocamento relativo na direção da força normal atuante no compósito
$s_{máx}$	Deslocamento relativo a $\tau_{b,máx}$
T_u	Força de aderência última
$T_{u,máx}$	Valor máximo para a força de aderência última
t_a	Espessura do adesivo
t_f	Espessura do compósito de fibra de carbono
t_{ℓ}	Espessura do CFC
t_p	Espessura do CFC
u_c	Deslocamento do substrato de concreto
u_c''	Derivada segunda do deslocamento do substrato de concreto
u_f	Deslocamento do CFC
u_f'	Derivada do deslocamento da fibra
V_{rec}	Volume do recipiente
x_c	Coordenada de um ponto no substrato de concreto
x_f	Coordenada de um ponto na fibra
x_p	Coordenada relativa ao trecho no qual o adesivo deforma-se em regime plástico
w	Largura do compósito
z_1	Coordenada do nível médio da superfície do substrato de concreto

Gregos

α	Ângulo; Coeficiente que relaciona a energia de fratura total, G_F , com a energia total de fratura das fissuras inclinadas devidas ao cortante $G_{F,B}$
α_t	Coeficiente adimensional que relaciona a rigidez do compósito com a rigidez do elemento de concreto
α_y	Ângulo que relaciona o efeito da largura do compósito com a do elemento de concreto
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
$\frac{\Delta \varepsilon}{\Delta x}$	Gradiente de deformação específica entre dois extensômetros consecutivos no CFC
$\Delta \ell_b$	Distância entre os pontos onde são obtidas as medidas
δ_1	Deslocamento correspondente à tensão máxima de aderência
δ_c	Deslocamento do concreto
δ_f	Deslocamento do CFC
δ_f	Deslocamento máximo
$\delta_{f,i}$	Deslocamento do CFC na seção i
$\delta_{m,i}$	Deslocamento do conjunto concreto, epóxi e barra de aço na seção i
ε	Deformação específica
ε_c	Deformação específica do concreto
ε_f	Deformação específica do 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 $i-1$
$\varepsilon_{m,i}$	Deformação específica do conjunto concreto, epóxi e barra de aço na seção i
$\varepsilon_{m,i-1}$	Deformação específica do conjunto concreto, epóxi e barra de aço na seção $i-1$
ε_n	Deformação específica correspondente à tensão σ_n
ε_0	Deformação específica correspondente à leitura ℓ_0
ε_p	Deformação específica última do PRF ou da lâmina de aço no escoamento
γ	Massa específica do agregado miúdo
γ_a	Distorção no adesivo
γ_b	Massa específica aparente do agregado graúdo
γ'	Derivada da distorção do adesivo
γ''	Derivada segunda da distorção do adesivo
λ	Coeficiente
ρ	Peso unitário
ρ_f	Taxa geométrica da armadura de CFC
σ	Tensão
σ_B	Resistência à compressão do concreto
σ_c	Tensão normal no concreto
σ_{db}	Tensão de ruptura no compósito
σ_f	Tensão normal no tecido de CFC
σ_{inf}	Tensão inferior correspondente à $0,5MPa$
σ_n	Tensão considerada para o cálculo do módulo secante
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_{f1}	Tensão de aderência para a região I
τ_{II}	Tensão de aderência para a região II
τ_ℓ	Tensão tangencial de aderência no compósito
$\tau_{máx}$	Tensão tangencial máxima
$\tau_{média}$	Tensão de aderência média
τ_u	Tensão de aderência média na ruptura
ψ	Ângulo que expressa a razão de intensidade da tensão crítica para os modos I e II de energia de fratura
ν	Deslocamento vertical da fissura devido à força cortante
ν_B	Componente vertical do deslocamento proveniente da fricção das faces rugosas da fissura devido à ação da força cortante
ν_{efet}	Deslocamento vertical efetivo
ν_{fu}	Componente vertical última do deslocamento proveniente da fricção das faces rugosas da fissura no CFC