



**Suelen Rodrigues**

**Influência da Taxa de Carregamento sobre a Resistência de  
Aderência entre CFC e Concreto**

**Dissertação de Mestrado**

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

Orientador: Giuseppe Barbosa Guimarães

**Rio de Janeiro  
Agosto de 2009.**



**Suelen Rodrigues**

**Influência da Taxa de Carregamento sobre a Resistência de  
Aderência entre CFC e Concreto**

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

**Giuseppe Barbosa Guimarães**

Orientador

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

**Emil de Souza Sánchez Filho**

Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – UFF

**Paulo Batista Gonçalves**

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

**Marta de Souza Lima Velasco**

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

**José Eugênio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

**Rio de Janeiro, 28 de Agosto de 2009.**

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

**Suelen Rodrigues**

Graduada em Engenharia Civil pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná em março de 2007.

Ficha Catalográfica

Rodrigues, Suelen

Influência da Taxa de Carregamento sobre a Resistência de Aderência entre CFC e Concreto / Suelen Rodrigues; orientador: Giuseppe Barbosa Guimarães – 2009.

122 f.; il. (color.) 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Reforço estrutural. 3. Fibras de carbono. 4. Carga de impacto. 5. Aderência. I. Guimarães, Giuseppe Barbosa. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD: 624

A minha querida Mãe,  
pelo amor, incentivo,  
apoio e confiança.

## Agradecimentos

Desejo expressar o meu reconhecimento a todas as pessoas e entidades que contribuíram, direta e indiretamente, para a realização e conclusão deste trabalho.

A minha Família, que nunca mediu esforços para tornar possível a concretização dos meus sonhos, dando apoio, carinho e incentivo durante toda minha vida.

Ao meu amor Felipe, obrigada pelo apoio e compreensão nos finais de semana dedicados a este trabalho.

Ao meu orientador, professor Giuseppe Barbosa Guimarães, pela oportunidade, incentivo, pelos ensinamentos prestados e pela orientação recebida ao longo da realização deste trabalho.

Aos meus amigos de Cascavel-PR, que mesmo distantes sempre torceram pelas minhas conquistas e me incentivaram nos momentos de desânimo.

Aos amigos Maria Bernadete, Algemiro Augusto, Arthur, Luciana e Vinicius, pela convivência, apoio e amizade sincera.

Aos amigos conquistados durante esse período na PUC, Juliana, Larissa, Magnus, João, Patrícia, Camilo, Flavia, Danilo, Vagner e Thais por terem sido grandes companheiros durante esta jornada.

Ao amigo Antonio, pela ajuda e apoio constante que foram essenciais no desenvolvimento deste trabalho.

Aos funcionários do Laboratório de Estruturas Euclídes, José Nilson, Evandro e Haroldo pela colaboração em todas as etapas do programa experimental.

Ao Emerson e a Anne, por me acolherem como filha, obrigada pelos passeios e encontros de família.

Ao Engenheiro Paulo de Tarso e À SIKA pelo fornecimento do tecido de fibra de carbono e da resina utilizados neste trabalho.

Ao CNPq pelo auxílio financeiro à pesquisa.

Ao IBQN, em especial a Annelise, pela compreensão na finalização desta dissertação.

E, finalmente, a Deus por ter me abençoado muito durante toda a vida e por ser sempre o guia das minhas decisões.

## Resumo

Rodrigues, Suelen; Guimarães, Giuseppe Barbosa. **Influência da Taxa de Carregamento sobre a Resistência de Aderência entre CFC e Concreto.** Rio de Janeiro, 2009. 122p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Neste trabalho é realizada uma investigação experimental sobre os efeitos de cargas de impacto sobre a resistência de aderência entre o compósito de fibras de carbono e o concreto. O objetivo foi verificar a influência da taxa de carregamento sobre a resistência de aderência. O programa experimental consistiu em ensaios de quarenta e cinco corpos-de-prova, constituídos de blocos de concreto e tiras de fibras de carbono coladas nas laterais opostas dos blocos. As variáveis de estudo foram a resistência à compressão do concreto (25 MPa, 45 MPa e 65 MPa) e a taxa de carregamento que variou de um mínimo de 1,92 MPa/s (estático) para um máximo de 438685 MPa/s (dinâmico). Os resultados dos ensaios mostraram que a resistência de aderência foi afetada pela taxa de carregamento.

## Palavras Chave

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

## Abstract

Rodrigues, Suelen; Guimarães, Giuseppe Barbosa (Advisor). **Influence of Loading Rate on the Bond Strength between CFC and Concrete**. Rio de Janeiro, 2009. 122p. MSc Dissertation -Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

An experimental investigation on the effects of impact loading on the bond strength between carbon fiber composite and concrete is described in this work. The objective was to verify the influence of loading rate on the bond strength. The experimental program consisted on testing of forty five specimens made of concrete blocks and carbon fiber strips glued on opposite sides of the block. The variables studied were the concrete compressive strength (25 MPa, 45 MPa and 65 MPa) and loading rate which varied from a minimum of 1,92 MPa/s (static) to a maximum of 438685 MPa/s (dynamic). Test results showed that the bond strength was affected by loading rate.

## Keywords

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

## Sumário

1 . Introdução	21
1.1. Considerações Iniciais	21
1.2. Objetivos	21
1.3. Organização do Trabalho	22
2 . Revisão Bibliográfica	23
2.1. Considerações Iniciais	23
2.2. Materiais Compósitos	23
2.2.1. Fibras	23
2.2.2. Matriz	25
2.3. Compósitos de Fibras de Carbono	27
2.4. Aderência entre o CFC e o Substrato de Concreto	27
2.4.1. CHEN e TENG (2001)	28
2.4.2. NAKABA <i>et al.</i> (2001)	30
2.4.3. MENEGHEL (2005)	32
2.4.4. PACHECO (2006)	33
2.4.5. BARROS <i>et al.</i> (2007)	35
2.5. Estudos sobre cargas de impacto relacionados aos materiais compósitos	37
2.5.1. ERKI e MEIER (1999)	37
2.5.2. WHITE <i>et al.</i> (2001)	39
2.5.3. TANG e SAADATMANESH (2003)	41
2.5.4. PELLISSARI (2007)	43
3 . Programa Experimental	46
3.1. Considerações Iniciais	46
3.2. Características dos Corpos-de-prova	46
3.3. Nomenclatura	47
3.4. Materiais	49
3.4.1. Concreto	49



3.4.2. Tecido de Fibras de Carbono	51
3.4.3. Adesivo Epóxi	52
3.5. Ensaio de resistência à tração do compósito de fibra de carbono	53
3.6. Aplicação do Compósito de Fibras de Carbono	56
3.7. Instrumentação	60
3.8. Aquisição de Dados	61
3.9. Descrição dos Ensaio	61
3.9.1. Carregamento Dinâmico	61
3.9.2. Carregamento Estático	63
4. Apresentação e Análise dos Resultados	65
4.1. Considerações Iniciais	65
4.2. Interpretação dos resultados	65
4.3. Modos de Ruptura	77
4.4. Força de Ruptura e Resistência de Aderência	78
4.5. Influência da Taxa de Carregamento sobre a Resistência de Aderência	81
5 . Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros	85
5.1. Conclusões	85
5.2. Sugestões para Trabalhos Futuros	85
6 . Referências Bibliográficas	87
Anexo A – Caracterização dos Agregados	91
Anexo B – Determinação das Massas Específicas dos Agregados Graúdo e Miúdo	94
Anexo C – Gráficos dos Resultados dos Ensaio	96
Anexo D – Fotos dos corpos-de-prova	115

## Lista de Figuras

Figura 2.1 – Diagrama tensão-deformação específica de fibras e metais, adaptada de BEBER (2003).	25
Figura 2.2 – a) Cisalhamento simples; b) Cisalhamento duplo; c) Vista superior; adaptada de CHEN e TENG (2001).	28
Figura 2.3 – Corpos-de-prova para o ensaio de aderência; adaptada de NAKABA et al. (2001).	30
Figura 2.4 – Tensão de aderência vs. deslocamento; adaptada de NAKABA et al. (2001).	31
Figura 2.5 – Esquema simplificado do ensaio de tração-compressão; adaptada de MENEGHEL (2005).	32
Figura 2.6 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem; adaptada de MENEGHEL (2005).	33
Figura 2.7 – Resistência de aderência ( $f_b$ ) vs. tipo de superfície do concreto; adaptada de PACHECO (2006).	34
Figura 2.8 – Geometria dos modelos e configurações dos ensaios; adaptada de BARROS et al. (2007).	35
Figura 2.9 – a) Influência do comprimento de aderência ( $L_a$ ) na relação força de arrancamento vs deslizamento; b) Influência do comprimento de aderência ( $L_a$ ) na relação tensão média de corte vs deslizamento; adaptada de BARROS et al. (2007).	36
Figura 2.10 – Configuração das vigas; adaptada de ERKI e MEIER (1999).	38
Figura 2.11 – Características das vigas; adaptada de WHITE et al. (2001).	39
Figura 2.12 – Gráfico tri linear de carregamento vs. flexão; adaptada de HEFFERNAN (1997) apud. WHITE et al. (2001).	41
Figura 2.13 – Esquema de ensaio; adaptada de TANG e SAADATMANESH (2005).	42
Figura 2.14 – Gráfico força de reação máxima vs. altura de queda do martelo; adaptada de TANG e SAADATMANESH (2003).	42
Figura 2.15 – Características geométricas dos corpos-de-prova estudados por PELLISSARI (2007).	43
Figura 2.16 – Aparato de ensaio usado por PELLISSARI (2007).	44

Figura 2.17 – Relação entre a taxa de tensão de aderência ( $T_r$ ) e a resistência de aderência ( $f_b$ ) para os corpos-de-prova que romperam por destacamento do concreto, adaptada de PELLISSARI (2007).	45
Figura 3.1 – Detalhe do corpo de prova (medidas em mm).	46
Figura 3.2 – Detalhes da forma metálica.	47
Figura 3.3 – Detalhe da concretagem dos blocos e dos corpos-de-prova.	50
Figura 3.4 – Tecido de fibra de carbono Sika Wrap – 330 C.	52
Figura 3.5 – Adesivo de epóxi Sikadur – 330.	53
Figura 3.6 – Dimensões dos corpos-de-prova para ensaio de tração (ASTM D 3039/3039M).	54
Figura 3.7 – Ensaio de corpo-de-prova CFC.	54
Figura 3.8 – Diagrama tensão-deformação específica dos corpos-de-prova de CFC.	56
Figura 3.9 – Detalhe da corte do tecido de fibras de carbono.	56
Figura 3.10 – Detalhe das tiras de fibras de carbono com adesivo epóxi.	57
Figura 3.11 – Detalhe da preparação da região a receber o CFC.	58
Figura 3.12 – Detalhamento da região destinada ao recebimento do CFC.	58
Figura 3.13 – Blocos com compósito de fibras de carbono.	59
Figura 3.14 – Detalhe do bloco com CFC.	59
Figura 3.15 – Posicionamento da célula de carga.	60
Figura 3.16 – Detalhe do extensômetro colado no CFC.	60
Figura 3.17 – Detalhe do equipamento de ensaio - vista lateral.	62
Figura 3.18 – Detalhe do aparato para aplicação de carga - vista frontal.	63
Figura 3.19 – Posicionamento do atuador hidráulico para a realização dos ensaios estáticos.	64
Figura 4.1 – Representação esquemática do sistema analisado.	66
Figura 4.2 – Curva força aplicada vs. tempo para o corpo-de-prova B45-0-01.	68
Figura 4.3 – Curva deformação específica nas tiras de fibras de carbono vs. tempo para o corpo-de-prova B45-0-01.	68
Figura 4.4 – Curva força aplicada vs. tempo para o corpo-de-prova B65-0-01.	69
Figura 4.5 – Curva deformação específica nas tiras de fibras de carbono vs. tempo para o corpo-de-prova B65-0-01.	69
Figura 4.6 – Curva força vs. tempo para o corpo-de-prova B25-25-E.	70

Figura 4.7 – Curva deformação específica nas tiras de carbono vs. tempo para o corpo-de-prova B25-25-E.	70
Figura 4.8 – Curva força vs. tempo para o corpo-de-prova B25-75-E.	71
Figura 4.9 – Curva deformação específica nas tiras de carbono vs. tempo para o corpo-de-prova B25-75-E.	71
Figura 4.10 – Curva força vs. tempo do corpo-de-prova B25-125-E.	72
Figura 4.11 – Curva deformação específica nas tiras de carbono vs. tempo para o corpo-de-prova B25-125-E.	72
Figura 4.12 – Forças de inércia ( $F_i$ ), elástica ( $F_e$ ) e impulso ( $P$ ) no corpo-de-prova B25-25-E.	75
Figura 4.13 – Forças de inércia ( $F_i$ ), elástica ( $F_e$ ) e impulso ( $P$ ) no corpo-de-prova B25-75-E.	75
Figura 4.14 – Forças de inércia ( $F_i$ ), elástica ( $F_e$ ) e impulso ( $P$ ) no corpo-de-prova B25-125-E.	76
Figura 4.15 – Modos de ruptura: (a) destacamento do concreto (ruptura da aderência); (b) ruptura por tração nas fibras.	78
Figura 4.16 – Identificação do valor máximo da força elástica ( $F_{e,Max}$ ) e do tempo ( $\Delta t_e$ ) no corpo-de-prova B25-75-E.	79
Figura 4.17 – Resistência de aderência ( $f_b$ ) vs. taxa de carregamento ( $T_c$ ) para corpos-de-prova com resistência a compressão de 25 MPa.	82
Figura 4.18 – Resistência de aderência ( $f_b$ ) vs. taxa de carregamento ( $T_c$ ) para corpos-de-prova com resistência a compressão de 45 MPa.	82
Figura 4.19 – Resistência de aderência ( $f_b$ ) vs. taxa de carregamento ( $T_c$ ) para corpos-de-prova com resistência a compressão de 65 MPa.	83
Figura 4.20 – Resistência de aderência vs. taxa de carregamento.	83
Figura C.1 – Curva força vs. tempo para o corpo-de-prova B25-0-01.	96
Figura C.2 – Curva deformação específica vs. tempo para o corpo-de-prova B25-0-01.	96
Figura C.3 – Curva força vs. tempo para o corpo-de-prova B25-0-02.	97
Figura C.4 – Curva deformação específica vs. tempo para o corpo-de-prova B25-0-02.	97
Figura C.5 – Curva força vs. tempo para o corpo-de-prova B45-0-01.	97
Figura C.6 – Curva deformação específica vs. tempo para o corpo-de-prova B45-0-01.	98

Figura C.7 – Curva força <i>vs.</i> tempo para o corpo-de-prova B45-0-02.	98
Figura C.8 – Curva deformação específica <i>vs.</i> tempo para o corpo-de-prova B45-0-02.	98
Figura C.9 – Curva força <i>vs.</i> tempo para o corpo-de-prova B65-0-01.	99
Figura C.10 – Curva deformação específica <i>vs.</i> tempo para o corpo-de-prova B65-0-01.	99
Figura C.11 – Curva força <i>vs.</i> tempo para o corpo-de-prova B65-0-02.	99
Figura C.12 – Curva deformação específica <i>vs.</i> tempo para o corpo-de-prova B65-0-02.	100
Figura C.13 – Curva deformação específica <i>vs.</i> tempo para o corpo-de-prova B25-25-E.	100
Figura C.14 – Forças de inércia ( $F_i$ ), elástica ( $F_e$ ) e impulso ( $P$ ) no corpo-de-prova B25-25-E	101
Figura C.15 – Forças de inércia ( $F_i$ ), elástica ( $F_e$ ) e impulso ( $P$ ) no corpo-de-prova B25-25-01.	101
Figura C.16 – Forças de inércia ( $F_i$ ), elástica ( $F_e$ ) e impulso ( $P$ ) no corpo-de-prova B25-25-02.	101
Figura C.17 – Forças de inércia ( $F_i$ ), elástica ( $F_e$ ) e impulso ( $P$ ) no corpo-de-prova B25-50-01.	102
Figura C.18 – Forças de inércia ( $F_i$ ), elástica ( $F_e$ ) e impulso ( $P$ ) no corpo-de-prova B25-50-02.	102
Figura C.19 – Curva deformação específica <i>vs.</i> tempo para o corpo-de-prova B25-75-E.	102
Figura C.20 – Forças de inércia ( $F_i$ ), elástica ( $F_e$ ) e impulso ( $P$ ) no corpo-de-prova B25-75-E.	103
Figura C.21 – Forças de inércia ( $F_i$ ), elástica ( $F_e$ ) e impulso ( $P$ ) no corpo-de-prova B25-75-01.	103
Figura C.22 – Forças de inércia ( $F_i$ ), elástica ( $F_e$ ) e impulso ( $P$ ) no corpo-de-prova B25-75-02.	103
Figura C.23 – Forças de inércia ( $F_i$ ), elástica ( $F_e$ ) e impulso ( $P$ ) no corpo-de-prova B25-100-01.	104
Figura C.24 – Forças de inércia ( $F_i$ ), elástica ( $F_e$ ) e impulso ( $P$ ) no corpo-de-prova B25-100-02.	104

Figura C.25 – Curva deformação específica vs. tempo para o corpo-de-prova B25-125-E.	104
Figura C.26 – Forças de inércia ( $Fi$ ), elástica ( $Fe$ ) e impulso ( $P$ ) no corpo-de-prova B25-125-E.	105
Figura C.27 – Forças de inércia ( $Fi$ ), elástica ( $Fe$ ) e impulso ( $P$ ) no corpo-de-prova B25-125-01.	105
Figura C.28 – Forças de inércia ( $Fi$ ), elástica ( $Fe$ ) e impulso ( $P$ ) no corpo-de-prova B25-125-02.	105
Figura C.29 – Forças de inércia ( $Fi$ ), elástica ( $Fe$ ) e impulso ( $P$ ) no corpo-de-prova B25-150-01.	106
Figura C.30 – Forças de inércia ( $Fi$ ), elástica ( $Fe$ ) e impulso ( $P$ ) no corpo-de-prova B25-150-02.	106
Figura C.31 – Forças de inércia ( $Fi$ ), elástica ( $Fe$ ) e impulso ( $P$ ) no corpo-de-prova B45-25-01.	106
Figura C.32 – Forças de inércia ( $Fi$ ), elástica ( $Fe$ ) e impulso ( $P$ ) no corpo-de-prova B45-25-02.	107
Figura C.33 – Forças de inércia ( $Fi$ ), elástica ( $Fe$ ) e impulso ( $P$ ) no corpo-de-prova B45-50-01.	107
Figura C.34 – Forças de inércia ( $Fi$ ), elástica ( $Fe$ ) e impulso ( $P$ ) no corpo-de-prova B45-50-02.	107
Figura C.35 – Forças de inércia ( $Fi$ ), elástica ( $Fe$ ) e impulso ( $P$ ) no corpo-de-prova B45-75-01.	108
Figura C.36 – Forças de inércia ( $Fi$ ), elástica ( $Fe$ ) e impulso ( $P$ ) no corpo-de-prova B45-75-02.	108
Figura C.37 – Forças de inércia ( $Fi$ ), elástica ( $Fe$ ) e impulso ( $P$ ) no corpo-de-prova B45-100-01.	108
Figura C.38 – Forças de inércia ( $Fi$ ), elástica ( $Fe$ ) e impulso ( $P$ ) no corpo-de-prova B45-100-02.	109
Figura C.39 – Forças de inércia ( $Fi$ ), elástica ( $Fe$ ) e impulso ( $P$ ) no corpo-de-prova B45-125-01.	109
Figura C.40 – Forças de inércia ( $Fi$ ), elástica ( $Fe$ ) e impulso ( $P$ ) no corpo-de-prova B45-125-02.	109
Figura C.41 – Forças de inércia ( $Fi$ ), elástica ( $Fe$ ) e impulso ( $P$ ) no corpo-de-prova B45-150-01.	110

Figura C.42 – Forças de inércia ( $Fi$ ), elástica ( $Fe$ ) e impulso ( $P$ ) no corpo-de-prova B45-150-02.	110
Figura C.43 – Forças de inércia ( $Fi$ ), elástica ( $Fe$ ) e impulso ( $P$ ) no corpo-de-prova B65-25-01.	110
Figura C.44 – Forças de inércia ( $Fi$ ), elástica ( $Fe$ ) e impulso ( $P$ ) no corpo-de-prova B65-25-02.	111
Figura C.45 – Forças de inércia ( $Fi$ ), elástica ( $Fe$ ) e impulso ( $P$ ) no corpo-de-prova B65-50-01.	111
Figura C.46 – Forças de inércia ( $Fi$ ), elástica ( $Fe$ ) e impulso ( $P$ ) no corpo-de-prova B65-50-02.	111
Figura C.47 – Forças de inércia ( $Fi$ ), elástica ( $Fe$ ) e impulso ( $P$ ) no corpo-de-prova B65-75-01.	112
Figura C.48 – Forças de inércia ( $Fi$ ), elástica ( $Fe$ ) e impulso ( $P$ ) no corpo-de-prova B65-75-02.	112
Figura C.49 – Forças de inércia ( $Fi$ ), elástica ( $Fe$ ) e impulso ( $P$ ) no corpo-de-prova B65-100-01.	112
Figura C.50 – Forças de inércia ( $Fi$ ), elástica ( $Fe$ ) e impulso ( $P$ ) no corpo-de-prova B65-100-02.	113
Figura C.51 – Forças de inércia ( $Fi$ ), elástica ( $Fe$ ) e impulso ( $P$ ) no corpo-de-prova B65-125-01.	113
Figura C.52 – Forças de inércia ( $Fi$ ), elástica ( $Fe$ ) e impulso ( $P$ ) no corpo-de-prova B65-125-02.	113
Figura C.53 – Forças de inércia ( $Fi$ ), elástica ( $Fe$ ) e impulso ( $P$ ) no corpo-de-prova B65-150-01.	114
Figura C.54 – Forças de inércia ( $Fi$ ), elástica ( $Fe$ ) e impulso ( $P$ ) no corpo-de-prova B65-150-02.	114
Figura D.01 – (a) corpo-de-prova B25-25-01 e (b) corpo-de-prova B25-25-02.	115
Figura D.02 – (a) corpo-de-prova B25-50-01 e (b) corpo-de-prova B25-50-02.	115
Figura D.03 – (a) corpo-de-prova B25-75-01 e (b) corpo-de-prova B25-75-02.	115
Figura D.04 – (a) corpo-de-prova B25-100-01 e (b) corpo-de-prova B25-100-02.	116
Figura D.05 – (a) corpo-de-prova B25-125-01 e (b) corpo-de-prova B25-125-02.	116

Figura D.06 – (a) corpo-de-prova B25-150-01 e (b) corpo-de-prova B25-150-02.	116
Figura D.07 – (a) corpo-de-prova B45-25-01 e (b) corpo-de-prova B45-25-02.	117
Figura D.08 – (a) corpo-de-prova B45-50-01 e (b) corpo-de-prova B45-50-02.	117
Figura D.09 – (a) corpo-de-prova B45-75-01 e (b) corpo-de-prova B45-75-02.	117
Figura D.10 – (a) corpo-de-prova B45-100-01 e (b) corpo-de-prova B45-100-02.	118
Figura D.11 – (a) corpo-de-prova B45-125-01 e (b) corpo-de-prova B45-125-02.	118
Figura D.12 – (a) corpo-de-prova B45-150-01 e (b) corpo-de-prova B45-150-02.	118
Figura D.13 – (a) corpo-de-prova B65-25-01 e (b) corpo-de-prova B65-25-02.	119
Figura D.14 – (a) corpo-de-prova B65-50-01 e (b) corpo-de-prova B65-50-02.	119
Figura D.15 – (a) corpo-de-prova B65-75-01 e (b) corpo-de-prova B65-75-02.	119
Figura D.16 – (a) corpo-de-prova B65-100-01 e (b) corpo-de-prova B65-100-02.	120
Figura D.17 – (a) corpo-de-prova B65-125-01 e (b) corpo-de-prova B65-125-02.	120
Figura D.18 – (a) corpo-de-prova B65-150-01 e (b) corpo-de-prova B65-150-02.	120
Figura D.19 – (a) corpo-de-prova B25-25-E, (b) corpo-de-prova B25-750-E e (c) corpo-de-prova B25-125-E.	121
Figura D.20 – (a) corpo-de-prova B25-0-01 (b) corpo-de-prova B25-0-02.	121
Figura D.21 – (a) corpo-de-prova B45-0-01 (b) corpo-de-prova B45-0-02.	122
Figura D.22 – (a) corpo-de-prova B65-0-01 (b) corpo-de-prova B65-0-02.	122



## Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Propriedades típicas de algumas fibras (KENDALL, 1999).	24
Tabela 2.2 – Propriedades das resinas utilizadas em materiais compósitos (CAROLIN, 2003).	26
Tabela 2.3 – Valores das principais grandezas; adaptada de BARROS <i>et al.</i> (2007).	36
Tabela 2.4 – Carregamento das vigas ensaiadas; adaptada de WHITE <i>et al.</i> (2001).	40
Tabela 3.1 – Nomenclatura dos corpos-de-prova.	48
Tabela 3.2 – Nomenclatura dos corpos-de-prova com extensômetros.	48
Tabela 3.3 – Consumo de material por m <sup>3</sup> de concreto.	49
Tabela 3.4 – Resultado dos ensaios de resistência à compressão do concreto	51
Tabela 3.5 – Dimensões dos corpos-de-prova para o ensaio de tração em materiais compósitos de fibras de carbono (ASTM D 3039/3039M).	53
Tabela 3.6 – Resultados obtidos nos ensaios à tração dos corpos-de-prova de compósitos de fibras de carbono.	55
Tabela 4.1 – Cálculo das forças de inércia e elástica no corpo-de-prova B25-25-E.	74
Tabela 4.2 – Resultados experimentais dos corpos-de-prova da série $f_{c,n} = 25$ MPa.	80
Tabela 4.3 – Resultados experimentais dos corpos-de-prova da série $f_{c,n} = 45$ MPa.	80
Tabela 4.4 – Resultados experimentais dos corpos-de-prova da série $f_{c,n} = 65$ MPa.	81
Tabela A.1 – Resultado da análise granulométrica do agregado miúdo.	91
Tabela A.2 – Resultado da análise granulométrica do agregado graúdo.	92

## Lista de Símbolos

### Romanos

$A$	Área da seção transversal do corpo-de-prova
$A_c$	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 compósito de fibra de carbono
$b_p$	Largura do reforço de CFC
$CFC$	Compósito de fibras de carbono
$D_{\max}$	Dimensão máxima característica do agregado
$E_c$	Módulo de elasticidade do concreto
$E_f$	Módulo de elasticidade do CFC
$F_e$	Força elástica
$F_{e,\max}$	Força elástica máxima
$F_i$	Força de inércia
$F_{\max}$	Força máxima aplicada no CFC
$F_u$	Força última
$f_c$	Resistência à compressão do concreto
$f_b$	Resistência de aderência
$f_{c,n}$	Resistência nominal do concreto
$f_{c,dosag}$	Resistência de dosagem do concreto
$f_{tf}$	Resistência à tração
$G_{F,\text{teórica}}$	Energia de fratura segundo o modelo de Holzenkämpfer

$k$	Constante de rigidez elástica
$L_e, l_{b,efet}$	Comprimento de ancoragem efetivo
$L_a$	Comprimento de aderência (ancoragem)
$m$	Massa do sistema
$MF$	Módulo de finura
$P$	Força aplicada
$P_b$	Peso do agregado (brita)
$P_{rec}$	Peso do recipiente
$P(t), P(\tau)$	Carga impulsiva
$P_u$	Força máxima resistida pelo reforço
$PRF$	Polímero reforçado com fibras
$PRFC$	Polímero reforçado com fibras de carbono
$S_{l,max}$	Deslizamento correspondente à força máxima aplicada
$t$	Tempo
$t_f$	Espessura do compósito de fibras de carbono
$T_c$	Taxa de carregamento
$T_\tau$	Taxa de tensão de aderência
$T$	Período
$u_f$	Deslocamento oriundo do alongamento do CFC
$u_e$	Deslocamento devido a deformação da estrutura
$u$	Deslocamento da massa
$\ddot{u}$	Aceleração da massa
$V_{rec}$	Volume do recipiente

## Gregos

$\beta_p$	Coeficiente adimensional que relaciona a largura do compósito com a largura do elemento de concreto
$\Delta t_e$	Tempo de carregamento
$\Delta l_b$	Distância entre os extensômetros
$\varepsilon_{f,max}$	Deformação específica máxima registrada no extensômetro
$\varepsilon_{f,u}$	Deformação específica última
$\varepsilon_{f,i}, \varepsilon_f$	Deformação específica no tecido de PRF
$\phi$	Diâmetro
$\gamma$	Massa específica do agregado
$\gamma_b$	Massa específica aparente do agregado graúdo
$\sigma$	Tensão
$\sigma_{db}$	Tensão de aderência no reforço
$\sigma_f$	Tensão normal no CFC
$\tau_{bk}$	Tensão de aderência característica
$\tau_{máx}$	Tensão máxima de corte