



Tathiana Caram Souza de Paula Figueiredo

**Estudo experimental do reforço à torção
de vigas de concreto armado com
compósitos de fibras de carbono**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial
para obtenção do grau de Mestre pelo Programa
de Pós-graduação em Engenharia Civil do
Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio.

Orientadores: Prof. Marta de Souza Lima Velasco
Prof. Emil de Souza Sánchez Filho

Rio de Janeiro
Janeiro de 2014



Tathiana Caram Souza de Paula Figueiredo

**Estudo experimental do reforço à
torção de vigas de concreto armado
com compósitos de fibras de carbono**

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

Prof. Marta de Souza Lima Velasco

Orientadora

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Emil de Souza Sánchez Filho

Co-orientador

Universidade Federal Fluminense

Prof. Júlio Jerônimo Holtz Silva Filho

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Osvaldo Luiz de Carvalho Souza

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 28 de janeiro de 2014.

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

Tathiana Caram Souza de Paula Figueiredo

Graduou-se em Engenharia Civil na PUC-Rio (Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro) em 2010. Na PUC-Rio, desenvolveu projeto de Iniciação Científica na área de estabilização de taludes naturais e estagiou no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente do Departamento de Engenharia Civil. Em 2005 concluiu o curso técnico de Edificações pelo CEFET-RJ (Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca).

Ficha Catalográfica

Figueiredo, Tathiana Caram Souza de Paula

Estudo experimental do reforço à torção de vigas de concreto com compósito de fibras de carbono / Tathiana Caram Souza de Paula Figueiredo ; orientadores: Marta de Souza Lima Velasco, Emil de Soura Sánchez Filho – 2014.

165 f. il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)—Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2014.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Reforço estrutural. 3. Estruturas. 4. CFC. 5. Compósito de fibras de carbono. 6. Viga. 7. Torção. I. Velasco, Marta de Souza Lima. II. Sánchez Filho, Emil de Souza. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: 624

Agradecimentos

Ao meu marido Jefferson pelo amor, compreensão e atenção de sempre, os quais foram indispensáveis na execução deste trabalho.

À minha mãe Cristina, pelo esmero e dedicação durante toda minha vida, principalmente durante minha formação.

Ao meu pai pelo apoio e carinho de sempre, mas principalmente pelos ensinamentos que me proporcionou.

Aos meus familiares e amigos, pela amizade e compreensão. Sobretudo à minha irmã Sylvia, pelo incentivo constante e eficaz.

À professora Marta pelo apoio durante momentos difíceis e incentivo durante toda execução deste trabalho.

Ao professor Emil pelos conhecimentos, paciência e dedicação indispensáveis para o desenvolvimento da pesquisa.

Ao professor Julio e aos funcionários da PUC-Rio: Euclides, Zé, Rogério, Evandro, Haroldo, Lenilson, Rita, Rafael, dentre outros, os quais contribuíram ativamente para concretização dessa pesquisa, seja com força física, ensinamentos ou palavras amigas.

A todos os amigos da pós, em especial ao Alexandre, Ricardo, Nicolas e Fabio, pela amizade, auxílio e inesquecíveis risadas.

Ao Engenheiro João Marcos Coutinho e à MC-Bauchemie pelo fornecimento de parte do sistema de reforço necessário para execução dos ensaios realizados.

À PUC-Rio, ao CNPq e à FAPERJ pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Resumo

Figueiredo, Tathiana Caram Souza de Paula; Velasco, Marta de Souza Lima; Sánchez Filho, Emil de Souza. **Estudo Experimental do Reforço à Torção de Vigas de Concreto Armado com Compósitos de Fibras de Carbono**. Rio de Janeiro, 2014. 165p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Este trabalho de natureza experimental tem como objetivo estudar o comportamento de vigas de concreto submetidas à torção e reforçadas externamente com compósitos de fibras de carbono (CFC). Treze vigas de concreto com 2,0 m de comprimento e seção transversal de 30 cm x 60 cm foram testadas no Laboratório de Estruturas e Materiais do Departamento de Engenharia Civil (LEM/DEC) da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio). As vigas foram divididas em quatro séries, sendo uma de referência, composta por quatro vigas sem reforço externo, e outras três séries constituídas por três vigas que foram reforçadas externamente com taxas crescentes de estribos de CFC. Com o propósito de estudar a contribuição do concreto e do reforço de CFC na resistência à torção de vigas, a armadura interna só foi colocada na região de aplicação de cargas e nos apoios para evitar a ruptura local e possibilitar o estudo da região central sem a parcela resistente devida à armadura interna de aço. Os resultados dos ensaios mostraram que as vigas reforçadas apresentaram aumento de carga de fissuração entre 16% e 56% e um acréscimo de resistência à ruptura entre 19% e 47% quando comparadas às vigas de referência. A rigidez das vigas na ruptura aumentou proporcionalmente ao crescimento da taxa de reforço como observado em outros ensaios encontrados na literatura.

Palavras-chave

Torção; concreto; reforço estrutural; compósito de fibras de carbono.

Abstract

Figueiredo, Tathiana Caram Souza de Paula; Velasco, Marta de Souza Lima (Advisor); Sánchez Filho, Emil de Souza (Co-Advisor). **Experimental study of torsional strengthening of concrete beams with carbon fibers composites**. Rio de Janeiro, 2014. 165p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This research is an experimental study of torsion strengthening of concrete beams with carbon fibers composites. Thirteen concrete beams with 2.0 long and 30 x 60 cm cross section were tested in the Structures and Materials Laboratory of the Civil Engineering Department (LEM/DEC) of Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro (PUC-Rio). The beams were divided in four series, the first one was called the reference series and consisted of four beams without external strengthening and each of the other three series was composed of three beams strengthened with increasing rates of external carbon fibers composites stirrups. In order to allow the study of the central region without the contribution of the steel reinforcement, the internal steel reinforcement was placed only at points of loads application and supports to prevent the local rupture. The tests results showed that the strengthened beams had an increase of the cracking load between 16% and 56%, and an increase of the rupture load between 19% and 47% when compared to the reference beams. The ultimate resistance of the beams increased proportionally to the rate of external carbon fibers composites strengthening, as was observed by other researchers.

Keywords

Torsion; concrete; structural strengthening; carbon fiber composites.

Sumário

1 INTRODUÇÃO	24
1.1. Generalidades	24
1.2. Objetivos	25
1.3 Organização do trabalho	25
2 TORÇÃO EM VIGAS	27
2.1. Notas Iniciais	27
2.2. Torção em Elementos de Seção Circular	27
2.3. Torção em Elementos de Concreto de Seção Retangular	32
2.3.1. Análise Elástica	33
2.3.2. Análise Plástica	38
2.3.3. Flexão-Esconsa	39
2.4. Torção em Vigas de Concreto Armado de Seção Retangular	42
2.4.1. Comportamento de Vigas sem Armaduras	42
2.4.2. Comportamento de Vigas com Armaduras	43
3 VIGAS DE CONCRETO REFORÇADAS COM CFC	45
3.1. Introdução	45
3.2. Compósitos de Fibra de Carbono	46
3.3. Modos de Ruptura	50
3.3.1. Ruptura por Tração do Concreto	50
3.3.2. Ruptura por Esmagamento do Concreto	51
3.3.3. Ruptura dos Cantos	51
3.3.4. Ruptura Devido ao Escoamento das Armaduras	52
3.3.5. Ruptura Devido a Problemas de Ancoragem	52
3.3.6. Ruptura do Reforço	53
3.4. Revisão Bibliográfica	53
3.4.1. AMELI <i>et al.</i> (2007)	54
3.4.2. CHIU <i>et al.</i> (2007)	57
3.4.3. HII E AL-MAHAIDI (2007)	61
3.4.4. HOLTZ (2007)	63
3.4.5. BERNARDO E LOPEZ (2008)	67
3.4.6. CHALIORIS (2008)	68
3.4.7. DEIFALLA E GHOBARAH (2010)	71
3.5. Modelo de Hsu Modificado	72

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL	74
4.1. NOTAS INICIAIS	74
4.2. MATERIAIS	74
4.2.1. CONCRETO	74
4.2.2. CFC	81
4.3. DESCRIÇÃO DO ENSAIO	87
4.3.1. ESQUEMA DE APLICAÇÃO DA CARGA	87
4.3.2. GEOMETRIA E ARMADURA DAS VIGAS	89
4.3.3. REFORÇO COM CFC	90
4.3.4. INSTRUMENTAÇÃO	96
 5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	 102
5.1. Introdução	102
5.2. Deformações Específicas	102
5.2.1. Deformações Específicas nas Vigas de Referência	102
5.2.2. Deformações Específicas nas Vigas Reforçadas	105
5.3. Comportamento das Curvas $T \times \theta$	118
5.4. Análise da Rigidez das Vigas	146
 6 CONCLUSÕES	 150
6.1. Sugestões para trabalhos futuros	151
 Referências Bibliográficas	 153
 Anexo – Fotografias	 158

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Deformação de um eixo circular sólido submetido à torção pura.....	28
Figura 2.2 – Torção de um eixo circular engastado em uma extremidade.	28
Figura 2.3 – Elemento longitudinal de uma barra de seção circular submetida à torção.....	29
Figura 2.4 – Distribuição de tensão cisalhante em uma seção circular...30	
Figura 2.5 – Empenamento das seções retangulares.....33	
Figura 2.6 – Distribuição de tensões cisalhantes devido à torção numa seção retangular.	35
Figura 2.7 – Distribuição de tensões de St. Venant ao longo das faces de uma seção retangular (escala horizontal expandida). Adaptado de Hsu (1984).	36
Figura 2.8 -- Curva típica momento de torção <i>versus</i> ângulo de torção por unidade de comprimento. Adaptado de Hsu (1984).....	37
Figura 2.9 – Círculo de Mohr para torção pura.....	37
Figura 2.10 – Diagrama tensão <i>versus</i> deformação específica do concreto submetido a tração e compressão uniaxiais.	39
Figura 2.11 – Componentes de flexão e de torção em uma viga de concreto: (a) componentes do momento de torção; (b) tensões em um elemento na face da viga. Adaptado de Hsu (1984).	40
Figura 2.12 – Tensões devido à torção em uma viga de concreto de seção retangular: a) tensões de cisalhamento; b) tensões principais de T_t e T_b ; c) trajetória helicoidal das fissuras. Fonte: MacGregor <i>apud</i> Bastos (2005).....	42
Figura 2.13 – Típica curva $T \times \theta$ para vigas de concreto sem reforço. Fonte: Hsu (1984).	43
Figura 2.14 – Curvas $T \times \theta$ para vigas de concreto armadas com diferentes taxas de armadura de aço. Adaptado de Hsu (1984).....	44

Figura 3.1 – Reforço de lajes à flexão e de vigas à flexão e à força cortante (Holtz, 2007).....	45
Figura 3.2 – Confinamento de pilares com CFC (Holtz, 2007).....	46
Figura 3.3 – Reforço de vigas à flexão e à força cortante com CFC (Spangnolo, 2008).....	46
Figura 3.4 – Sistemas de reforço com fibras de carbono: (a) fios de fibra de carbono; (b) chapas pultrudadas de fibra de carbono; (c) tecidos de fibra de carbono. (Holtz, 2007).....	47
Figura 3.5 – Fibras de carbono envolvidas com resina epóxi (Basche <i>et al. apud</i> Holtz, 2007).....	49
Figura 3.6 – Empenamento da viga gerado pela componente de flexão (Leonhardt e Mönnig, 1977).....	51
Figura 3.7 – Força resultante da mudança de direção das diagonais comprimidas (Leonhardt e Mönnig, 1977).....	52
Figura 3.8 – Ruptura do reforço em viga solicitada à torção (Holtz, 2007).	53
Figura 3.9 – Configurações de reforço adotadas por Ameli <i>et al.</i> (2007).	54
Figura 3.10 – Esquema de ensaio das vigas de Ameli <i>et al.</i> (2007).....	55
Figura 3.11 – Momento de torção versus ângulo de torção obtidos experimentalmente por Ameli <i>et al.</i> (2007): (a) vigas reforçadas com CFRP; (b) vigas reforçadas com GFRP.	56
Figura 3.12 – Padrão das fissuras em uma das vigas de referência Ameli <i>et al.</i> (2007).	56
Figura 3.13 – Relação entre o momento de torção e ângulo de torção para as curvas obtidas numericamente e experimentalmente. Adaptado de Ameli <i>et al.</i> (2007).	57
Figura 3.14 – Seções transversais. Adaptado de Chiu <i>et al.</i> (2007).	58
Figura 3.15 – Esquema de armadura e instrumentação interna. Adaptado de Chiu <i>et al.</i> (2007).....	58
Figura 3.16 – Esquema de ensaio. Adaptado de Chiu <i>et al.</i> (2007).....	59
Figura 3.17 – Localização dos pontos de cobre para avaliação das deformações do concreto. Adaptado de Chiu <i>et al.</i> (2007).	60

Figura 3.18 – Padrão das fissuras para viga HBS-74-17: concreto de alta resistência, seção B e baixa taxa de armadura. (a) tração; (b) compressão. Adaptado de Chiu <i>et al.</i> (2007).	60
Figura 3.19 – Padrão das fissuras para viga HBS-60-61: concreto de alta resistência, seção B e alta taxa de armadura. Adaptado de Chiu <i>et al.</i> (2007).	61
Figura 3.20 – Geometria e detalhes da armadura. (a) vigas seção sólida; (b) vigas seção vazada. Adaptado de Hii e Al-Mahaidi (2007).	62
Figura 3.21 – Esquema de ensaio. Hii e Al-Mahaidi (2007).	62
Figura 3.22 – Geometria e armadura interna. Adaptado de Holtz (2007).	64
Figura 3.23 – Configuração do reforço das vigas da série VT. Adaptado de Holtz (2007).	64
Figura 3.24 – Configuração do reforço das vigas da série VTL . Adaptado de Holtz (2007).	65
Figura 3.25 – Esquema de ensaio. Adaptado de Holtz (2007).	65
Figura 3.26 – Momento de torção <i>versus</i> ângulo de torção por unidade de comprimento da série VT. Adaptado de Holtz (2007).	66
Figura 3.27 – Momento de torção <i>versus</i> ângulo de torção por unidade de comprimento da série VTL . Adaptado de Holtz (2007).	67
Figura 3.28 – Características das vigas da série a . Dimensões em <i>mm</i> . Adaptado de Chalioris (2008).	69
Figura 3.29 - Características das vigas da série b . Dimensões em <i>mm</i> . Adaptado de Chalioris (2007).	70
Figura 3.30 – Esquema de ensaio. Adaptado de Chalioris (2008).	70
Figura 3.31 – Esquema de ensaio. Adaptado de Deifalla e Ghobarah (2010).	71
Figura 3.32 – Configuração do reforço. Adaptado de Deifalla e Ghobarah (2010).	71
Figura 3.33 – Comportamento da viga C1. Adaptado de Deifalla e Ghobarah (2010).	72
Figura 4.1 – Resistência à compressão simples do concreto.	76
Figura 4.2 – Ensaio de compressão diametral dos corpos de prova de concreto.	77
Figura 4.3 – Resistência à compressão diametral do concreto.	78

Figura 4.4 – Ensaio para determinação do módulo de elasticidade secante e a curva tensão-deformação específica dos corpos de prova de concreto.	79
Figura 4.5 – Gráficos tensão <i>versus</i> deformação específica dos corpos de prova de concreto.	81
Figura 4.6 – Geometria dos corpos-de-prova de CFC recomendada pela ASTM D3019/3039M.....	84
Figura 4.7 – Ensaio CFC.....	85
Figura 4.8 – Diagramas tensão <i>versus</i> deformação específica dos corpos de prova de CFC.....	86
Figura 4.9 – Fluxograma de descrição do programa experimental.	87
Figura 4.10 – Pórtico de ensaio.....	88
Figura 4.11 – Armadura das Vigas.....	89
Figura 4.12 – Regularização dos cantos vivos.	90
Figura 4.13 – Sequência de execução do reforço com CFC da MC-Bauchemie.	91
Figura 4.14 – Execução da segunda camada de reforço de uma das vigas da série RA.	91
Figura 4.15 – Configuração do reforço das vigas da série RA.	92
Figura 4.16 – Configuração do reforço das vigas da série RB.	93
Figura 4.17 – Configuração do reforço da viga VRC-1.....	94
Figura 4.18 – Face inferior da viga VRC-1.	94
Figura 4.19 – Configuração do reforço da viga VRC-2.....	94
Figura 4.20 – Configuração do reforço da viga VRC-3.....	95
Figura 4.21 – Viga VRC-3 junto à face A, após interrupção do ensaio. ...	95
Figura 4.22 – Locação dos transdutores lineares.....	96
Figura 4.23 – Vista da face superior das vigas de referência.....	97
Figura 4.24 – Seção S_c das vigas de referência.	97
Figura 4.25 – Vista da face superior das vigas da série RA.....	97
Figura 4.26 – Seção S_c das vigas da série RA.	98
Figura 4.27 – Seção S_{F1} das vigas da série RA.	98
Figura 4.28 – Seção S_{F2} das vigas da série RA.	98
Figura 4.29 – Vista da face superior das vigas da série RB.	99
Figura 4.30 – Seção S_c das vigas da série RB.	99

Figura 4.31 – Seção S_{F1} das vigas da série RB.	99
Figura 4.32 – Seção S_{F2} das vigas da série RB.	99
Figura 4.33 – Vista da face superior da viga VRC-1.	100
Figura 4.34 – Vista da face superior da viga VRC-2.	100
Figura 4.35 – Vista da face superior da viga VRC-3.	100
Figura 4.36 – Seção S_C das vigas da série RC.	101
Figura 4.37 – Seção S_{F1} das vigas da série RC.	101
Figura 4.38 – Seção S_{F2} das vigas da série RC.	101
Figura 5.1 – Posições dos EER nas faces principais da viga VR1.	103
Figura 5.2 – Posições dos EER nas faces principais da viga VR2.	103
Figura 5.3 – Posições dos EER nas faces principais da viga VR3.	104
Figura 5.4 – Posições dos EER nas faces principais da viga VR4.	104
Figura 5.5 – Posições dos EER na seção S_C da viga VRA-1.	106
Figura 5.6 – Posições dos EER na seção S_C da viga VRA-2.	106
Figura 5.7 – Posições dos EER na seção S_C da viga VRA-3.	107
Figura 5.8 – Posições dos EER na seção S_C da viga VRB-1.	107
Figura 5.9 – Posições dos EER na seção S_C da viga VRB-2.	108
Figura 5.10 – Posições dos EER na seção S_C da viga VRB-3.	108
Figura 5.11 – Posições dos EER na seção S_C da viga VRC-1.	109
Figura 5.12 – Posições dos EER na seção S_C da viga VRC-2.	109
Figura 5.13 – Posições dos EER na seção S_C da viga VRC-3.	110
Figura 5.14 – Posições dos EER na seção SR1 da viga VRA-1.	111
Figura 5.15 – Posições dos EER na seção SR2 da viga VRA-1.	111
Figura 5.16 – Posições dos EER na seção SR1 da viga VRA-2.	112
Figura 5.17 – Posições dos EER na seção SR2 da viga VRA-2.	112
Figura 5.18 – Posições dos EER na seção SR1 da viga VRA-3.	112
Figura 5.19 – Posições dos EER na seção SR2 da viga VRA-3.	113
Figura 5.20 – Posições dos EER na seção SR1 da viga VRB-1.	113
Figura 5.21 – Posições dos EER na seção SR2 da viga VRB-1.	113
Figura 5.22 – Posições dos EER na seção SR1 da viga VRB-2.	114
Figura 5.23 – Posições dos EER na seção SR2 da viga VRB-2.	114
Figura 5.24 – Posições dos EER na seção SR1 da viga VRB-3.	114
Figura 5.25 – Posições dos EER na seção SR2 da viga VRB-3.	115
Figura 5.26 – Posições dos EER na seção SR1 da viga VRC-1.	115

Figura 5.27 – Posições dos EER na seção SR2 da viga VRC-1.....	115
Figura 5.28 – Posições dos EER na seção SR1 da viga VRC-2.....	116
Figura 5.29 – Posições dos EER na seção SR2 da viga VRC-2.....	116
Figura 5.30 – Posições dos EER na seção SR1 da viga VRC-3.....	116
Figura 5.31 – Posições dos EER na seção SR2 da viga VRC-3.....	117
Figura 5.32 – Desenho esquemático da medição do transdutor linear durante a rotação (Holtz, 2007).....	118
Figura 5.33 – Curva $T \times \theta$ da Viga VR1 obtida com os transdutores lineares TL1 e TL4.	120
Figura 5.34 – Curva $T \times \theta$ da Viga VR1 obtida com os transdutores lineares TL2 e TL3.	120
Figura 5.35 – Curva $T \times \theta$ da Viga VR1 obtida com os transdutores lineares TL2 e TL4.	121
Figura 5.36 – Curva $T \times \theta$ da Viga VR2 obtida com os transdutores lineares TL1 e TL3.	121
Figura 5.37 – Curva $T \times \theta$ da Viga VR2 obtida com os transdutores lineares TL1 e TL4.	121
Figura 5.38 – Curva $T \times \theta$ da Viga VR2 obtida com os transdutores lineares TL2 e TL3.	122
Figura 5.39 – Curva $T \times \theta$ da Viga VR2 obtida com os transdutores lineares TL2 e TL4.	122
Figura 5.40 – Curva $T \times \theta$ da Viga VR3 obtida com os transdutores lineares TL1 e TL3.	122
Figura 5.41 – Curva $T \times \theta$ da Viga VR3 obtida com os transdutores lineares TL1 e TL4.	123
Figura 5.42 – Curva $T \times \theta$ da Viga VR3 obtida com os transdutores lineares TL2 e TL3.	123
Figura 5.43 – Curva $T \times \theta$ da Viga VR3 obtida com os transdutores lineares TL2 e TL4.	123
Figura 5.44 – Curva $T \times \theta$ da Viga VR4 obtida com os transdutores lineares TL1 e TL3.	124
Figura 5.45 – Curva $T \times \theta$ da Viga VR4 obtida com os transdutores lineares TL1 e TL4.	124

Figura 5.46 – Curva $T \times \theta$ da Viga VR4 obtida com os transdutores lineares TL2 e TL3.	124
Figura 5.47 – Curva $T \times \theta$ da Viga VR4 obtida com os transdutores lineares TL2 e TL4.	125
Figura 5.48 – Curva $T \times \theta$ da Viga VRA-1 obtida com os transdutores lineares TL1 e TL3.	127
Figura 5.49 – Curva $T \times \theta$ da Viga VRA-1 obtida com os transdutores lineares TL1 e TL4.	127
Figura 5.50 – Curva $T \times \theta$ da Viga VRA-1 obtida com os transdutores lineares TL2 e TL3.	128
Figura 5.51 – Curva $T \times \theta$ da Viga VRA-1 obtida com os transdutores lineares TL2 e TL4.	128
Figura 5.52 – Curva $T \times \theta$ da Viga VRA-2 obtida com os transdutores lineares TL1 e TL3.	128
Figura 5.53 – Curva $T \times \theta$ da Viga VRA-2 obtida com os transdutores lineares TL1 e TL4.	129
Figura 5.54 – Curva $T \times \theta$ da Viga VRA-2 obtida com os transdutores lineares TL2 e TL3.	129
Figura 5.55 – Curva $T \times \theta$ da Viga VRA-2 obtida com os transdutores lineares TL2 e TL4.	129
Figura 5.56 – Curva $T \times \theta$ da Viga VRA-3 obtida com os transdutores lineares TL1 e TL3.	130
Figura 5.57 – Curva $T \times \theta$ da Viga VRA-3 obtida com os transdutores lineares TL1 e TL4.	130
Figura 5.58 – Curva $T \times \theta$ da Viga VRA-3 obtida com os transdutores lineares TL2 e TL3.	130
Figura 5.59 – Curva $T \times \theta$ da Viga VRA-3 obtida com os transdutores lineares TL2 e TL4.	131
Figura 5.60 – Curva $T \times \theta$ da Viga VRB-1 obtida com os transdutores lineares TL1 e TL3.	132
Figura 5.61 – Curva $T \times \theta$ da Viga VRB-1 obtida com os transdutores lineares TL1 e TL4.	132
Figura 5.62 – Curva $T \times \theta$ da Viga VRB-1 obtida com os transdutores lineares TL2 e TL3.	132

Figura 5.63 – Curva $T \times \theta$ da Viga VRB-1 obtida com os transdutores lineares TL2 e TL4.	133
Figura 5.64 – Curva $T \times \theta$ da Viga VRB-2 obtida com os transdutores lineares TL1 e TL3.	133
Figura 5.65 – Curva $T \times \theta$ da Viga VRB-2 obtida com os transdutores lineares TL1 e TL4.	133
Figura 5.66 – Curva $T \times \theta$ da Viga VRB-2 obtida com os transdutores lineares TL2 e TL3.	134
Figura 5.67 – Curva $T \times \theta$ da Viga VRB-2 obtida com os transdutores lineares TL2 e TL4.	134
Figura 5.68 – Curva $T \times \theta$ da Viga VRB-3 obtida com os transdutores lineares TL1 e TL3.	134
Figura 5.69 – Curva $T \times \theta$ da Viga VRB-3 obtida com os transdutores lineares TL1 e TL4.	135
Figura 5.70 – Curva $T \times \theta$ da Viga VRB-3 obtida com os transdutores lineares TL2 e TL3.	135
Figura 5.71 – Curva $T \times \theta$ da Viga VRB-3 obtida com os transdutores lineares TL2 e TL4.	135
Figura 5.72 – Curva $T \times \theta$ da Viga VRC-1 obtida com os transdutores lineares TL1 e TL3.	136
Figura 5.73 – Curva $T \times \theta$ da Viga VRC-1 obtida com os transdutores lineares TL1 e TL4.	137
Figura 5.74 – Curva $T \times \theta$ da Viga VRC-1 obtida com os transdutores lineares TL2 e TL3.	137
Figura 5.75 – Curva $T \times \theta$ da Viga VRC-1 obtida com os transdutores lineares TL2 e TL4.	137
Figura 5.76 – Curva $T \times \theta$ da Viga VRC-2 obtida com os transdutores lineares TL1 e TL3.	138
Figura 5.77 – Curva $T \times \theta$ da Viga VRC-2 obtida com os transdutores lineares TL1 e TL4.	138
Figura 5.78 – Curva $T \times \theta$ da Viga VRC-2 obtida com os transdutores lineares TL2 e TL3.	138
Figura 5.79 – Curva $T \times \theta$ da Viga VRC-2 obtida com os transdutores lineares TL2 e TL4.	139

Figura 5.80 – Curva $T \times \theta$ da Viga VRC-3 obtida com os transdutores lineares TL1 e TL3.	139
Figura 5.81 – Curva $T \times \theta$ da Viga VRC-3 obtida com os transdutores lineares TL1 e TL4.	139
Figura 5.82 – Curva $T \times \theta$ da Viga VRC-3 obtida com os transdutores lineares TL2 e TL3.	140
Figura 5.83 – Curva $T \times \theta$ da Viga VRC-3 obtida com os transdutores lineares TL2 e TL4.	140
Figura 5.84 – Momentos de torção na fissuração - valores teóricos e experimentais.....	144
Figura 5.85 – Momento de torção na fissuração <i>versus</i> taxa de reforço.	144
Figura 5.86 – Momento de torção na ruptura <i>versus</i> taxa de reforço.....	145
Figura 5.87 – Rigidez na fissuração <i>versus</i> taxa de reforço.....	148
Figura 5.88 – Rigidez na ruptura <i>versus</i> taxa de reforço.....	148

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Coeficientes adimensionais de Saint-Venant para seções retangulares.	34
Tabela 3.1 – Características e dados de instalação dos sistemas de reforço com PRFC.	48
Tabela 4.1 - Consumo de materiais do concreto.....	75
Tabela 4.2 – Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade do concreto.	80
Tabela 4.3 – Geometria dos corpos-de-prova de CFC recomendada pela ASTM D3019/3039M.....	84
Tabela 4.4 – Resultados dos ensaios do CFC.	86
Tabela 5.1 – Deformações específicas nas faces das vigas de referência.	105
Tabela 5.2 – Deformações específicas nas faces das vigas reforçadas.....	117
Tabela 5.3 – Resumo dos valores de momento de torção para as vigas de referência na fissuração.....	125
Tabela 5.4 – Resumo dos valores ângulo de torção por unidade de comprimento para as vigas de referência na fissuração.	126
Tabela 5.5 – Resumo dos valores de momento de torção para as vigas de referência na ruptura.....	129
Tabela 5.6 – Resumo dos valores de ângulo de torção por unidade de comprimento para as vigas de referência na ruptura.	129
Tabela 5.7 – Resumo dos valores de momento de torção para as vigas reforçadas na fissuração.....	144
Tabela 5.8 – Resumo dos valores ângulo de torção por unidade de comprimento para as vigas reforçadas na fissuração.	145
Tabela 5.9 – Resumo dos valores de momento de torção para as vigas reforçadas na ruptura.....	145

Tabela 5.10 – Resumo dos valores de ângulo de torção por unidade de comprimento para as vigas reforçadas na ruptura.	146
Tabela 5.11 – Tabela de verificação da expressão 3.1.	146
Tabela 5.12 – Rigidez das vigas de referência.....	149
Tabela 5.13 – Rigidez das vigas reforçadas.	150

Lista de Abreviaturas

CFC	Compósitos de Fibras de Carbono
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
LEM-DEC	Laboratório de Estruturas e Materiais do Departamento de Engenharia Civil
PUC-Rio	Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
EER	Extensômetros Elétricos de Resistência

Lista de Siglas

L – altura do corpo de prova

A_c – área da seção transversal da viga de concreto

ϕ – ângulo formado entre a fissura principal e o eixo longitudinal da viga

β – coeficiente adimensional obtido pela razão entre as dimensões de uma seção transversal retangular

l – comprimento do cabo

C_{cr} – constante de Bredt após a fissuração

μ – constante do material

ε_{\max} – deformação específica máxima do corpo de prova

d – diâmetro do corpo de prova

r – distância radial

$d\phi$ – elemento diferencial angular.

h – espessura da parede do tubo de Bredt

F – força máxima aplicada, equivalente à carga de ruptura

α_p – função dos lados de uma seção transversal retangular

y – maior lado da seção retangular

x – menor lado da seção retangular

$\varepsilon_{0,3}$ – média dos valores de deformação específica fornecidas pelas leituras dos dois extensômetros, associada à tensão $\sigma_{0,3}$

ε_{inf} – média dos valores de deformação específica fornecidas pelas leituras dos dois extensômetros, associada à tensão σ_{inf}

$E_{ci,m}$ – média corrigida dos valores obtidos para o módulo de deformação tangente inicial

G – módulo de deformação transversal do material da barra

G_{cr} – módulo de deformação transversal após a fissuração

$E_{ci,i}$ – módulo de deformação tangente inicial para o corpo de prova

E_f – módulo de elasticidade do compósito de fibra de carbono

E_i – módulo de elasticidade do CP “i” de CFC

E_{cs} – módulo de elasticidade secante do concreto

T – momento de torção

T_{cr} – momento de torção de fissuração da viga sem reforço

T_{cr}^* – momento de torção de fissuração da viga reforçada com estribos

T_n – momento de torção último da viga sem reforço

u – perímetro da viga de concreto

n – razão entre o módulo de elasticidade do aço e do concreto

$f_{td,i}$ – resistência à tração do corpo de prova de concreto quando comprimido diametralmente

$f_{c,m}$ – resistência média a compressão do concreto obtida experimentalmente

f_t – resistência média à tração do concreto, obtida experimentalmente

$\tau(r)$ – tensão cisalhante na coordenada radial r

f_r – tensão de fissuração do concreto

T_{cr}^* – momento de torção de fissuração da viga reforçada com estribos

ρ – taxa de armadura total (somatório da taxa longitudinal e transversal);

ρ_f – taxa transversal de reforço de CFC

$\sigma_{0,3}$ – tensão correspondente à 30% da carga de ruptura

σ_{inf} – tensão mais próxima de 0,5 MPa que conseguiu-se aplicar no corpo de prova de concreto

σ_{rup} – tensão de ruptura do corpo de prova de concreto

"Há um tempo em que é preciso abandonar as roupas usadas,
que já têm a forma do nosso corpo,
e esquecer os nossos caminhos
que nos levam sempre aos mesmos lugares.
É o tempo da travessia e,
se não ousarmos fazê-la,
teremos ficado, pra sempre,
à margem de nós mesmos."

Fernando Pessoa