



Luis Alberto Spagnolo Junior

**Estudo Experimental do Reforço à Força Cortante de Vigas
de Concreto Armado com Compósitos 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.

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

Rio de Janeiro, Janeiro de 2008



Luis Alberto Spagnolo Junior

**Estudo Experimental do Reforço à Força Cortante de Vigas
de Concreto Armado com Compósitos de Fibras de
Carbono**

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.

Profa. Marta de Souza Lima Velasco, D.Sc.
Orientadora
Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Emil de Souza Sánchez Filho, D.Sc.
Co-orientador
Universidade Federal Fluminense – UFF

Prof. Giuseppe Barbosa Guimarães, Ph.D
Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Ricardo Amorim Einsfeld, D.Sc.
Instituto Politécnico – UERJ

Prof. Luiz Antonio Vieira Carneiro, D.Sc.
Instituto Militar de Engenharia – IME

Prof. José Eugênio Leal
Coordenador(a) Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 10 de Janeiro de 2008

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

Luis Alberto Spagnolo Junior

Graduou-se em Engenharia Civil na UFJF (Universidade Federal de Juiz de Fora).

Ficha Catalográfica

Spagnolo Junior, Luis Alberto

Estudo experimental do reforço à força cortante de vigas de concreto armado com compósitos de fibras de carbono / Luis Alberto Spagnolo Junior ; orientadores: Marta de Souza Lima Velasco, Emil de Souza Sánchez Filho. – 2008.

290 f. : il (col.) ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Força cortante. 3. Reforço estrutural. 4. Concreto armado. 5. Compósitos de fibras de carbono. 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

Para minha querida esposa Marilene,
e minhas adoráveis filhas Iane e Aíla,
as quais são as razões do meu viver.

Agradecimentos

Aos meus pais, Luis e Rita, pelo amor, carinho e por toda a dedicação que tiveram por mim até o presente momento.

Aos meus irmãos, Rodrigo e Daniella, pelo apoio e amizade eterna.

À minha orientadora professora Marta Velasco, pelos ensinamentos prestados e uma orientação segura.

Ao meu co-orientador Emil Sánchez, pela clareza dos conhecimentos a mim transmitidos, pela paciência e pela sinceridade de suas opiniões.

Aos funcionários da PUC Rita, Euclides, José Nilson, Evandro e Haroldo por muito me ajudarem na execução do meu trabalho experimental.

A todos os amigos do IESC, em especial ao Ubirajara e a Angélica, pelo grande apoio que tenho recebido durante esses quatro anos de convívio dentro da PETROBRAS.

Aos amigos da ENGENHARIA/IEABAST/EAB, Vicente Gullo, Jorge Abreu e Emanuel Danilo, os quais colaboraram para que eu iniciasse e desenvolvesse o meu mestrado da melhor maneira possível.

À CONCREJATO pela doação do aço e madeira necessários e a CONCRELAGOS pelo fornecimento do concreto utilizado na confecção das vigas ensaiadas.

A Deus pela força e graça de poder realizar este trabalho.

Resumo

Spagnolo Junior, Luis Alberto; Velasco, Marta de Souza Lima; Sánchez Filho, Emil de Souza. **Estudo Experimental do Reforço à Força Cortante de Vigas de Concreto Armado com Compósitos de Fibras de Carbono**. Rio de Janeiro, 2008. 290p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Neste trabalho é realizado o estudo experimental de oito vigas de concreto armado de seção **T** ($b_w = 15\text{ cm}$ e $h = 40\text{ cm}$), com 300 cm de comprimento, bi-apoiadas e com a mesma armadura longitudinal, reforçadas à força cortante com compósitos de fibras de carbono (CFC). As mesmas foram divididas em duas séries de quatro vigas, com uma viga de referência para cada série, onde a taxa de armadura transversal interna foi maior para a Série I do que para a Série II. Para as três vigas reforçadas de cada série variou-se o número de camadas do reforço em CFC por meio de estribos em **U**, os quais foram ancorados longitudinalmente por meio de faixas desse compósito. A colagem do CFC foi executada após o surgimento das primeiras fissuras diagonais no trecho de maior cortante. Os resultados dos ensaios mostraram que as vigas reforçadas apresentaram um aumento mínimo de resistência à força cortante de 36% em relação às respectivas vigas de referência, e que a ruptura de todas as vigas ocorreu por tração diagonal, com o descolamento do CFC na região de sua ancoragem. O modelo cinemático e do ACI-440 (2001) apresentaram resultados mais próximos aos dos ensaios realizados para a resistência total da força cortante. O resultado experimental da parcela da força cortante resistida pelo CFC apresentou resultados superiores aos calculados por diversos modelos teóricos, e os resultados mais consistentes foram os modelos da FIB-Bulletin 14 (2001) e Khalifa e Nanni (2002). A análise de diversos parâmetros mostrou que o fator de efetividade ν_f do reforço diminuiu quando a rigidez $E_f \rho_f$ do CFC aumenta, portanto, há um menor acréscimo de resistência total à força cortante.

Palavras-chave

Força Cortante; Reforço Estrutural; Concreto Armado; Compósitos de Fibras de Carbono.

Abstract

Spagnolo Junior, Luis Alberto; Velasco, Marta de Souza Lima; Sánchez Filho, Emil de Souza (Advisors). **Experimental Study of Reinforced Concrete Beams Strengthened for Shear Force with Carbon Fiber Composites**. Rio de Janeiro, 2008. 290p. Msc. Dissertation – Civil Engineering Department, Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This analysis involves the experimental study of eight reinforced concrete beams of **T** section ($b_w = 15\text{ cm}$ e $h = 40\text{ cm}$), with 300 cm of length, bi-supported and with the same longitudinal reinforcement, strengthened for shear force with carbon fiber composites (CFC). They were divided in two series of four beams, with a reference beam for each series, where the internal transversal reinforcement ratio was greater for Serie I than Serie II. For the three strengthened beams of each series the number of layers of the reinforcement in CFC made by **U** stirrup varied, which were anchored longitudinally by stirrups of this composite. The CFC glue was done after the first diagonal cracks in the shear region. The results of the tests showed that the strengthened beams had a minimum increase of shear force of 36% in relation to the respective reference beams and the rupture of them occurred due to diagonal tension, with the CFC debonding in the region of its anchorage. The cinematic (upper-bound solution) and ACI-440 (2001) model presented results close to the experimental results for the shear strength. The experimental result of the shear force parcel resisted by the CFC presented superior results to the calculated by diverse theoretical models, and the most consistent ones were FIB-Bulletin 14 (2001) and Khalifa and Nanni (2002) models. The analyses of diverse parameters showed that the strengthening effectiveness ν_f decreases when the rigidity $E_f \rho_f$ of CFC increases, therefore there is a lesser increase of total strength to the shear force.

Keywords

Shear; Structural Strengthening; Reinforced Concrete; Carbon Fiber Composites.

Sumário

1	Introdução	24
1.1.	Histórico	24
1.2.	Objetivos	25
1.3.	Conteúdo	26
2	Técnicas de Reforço com Materiais Compósitos em Estruturas de Concreto	27
2.1.	Notas Iniciais	27
2.2.	Polímeros Reforçado com Fibras	27
2.2.1.	Matriz	27
2.2.2.	Fibras	28
2.2.3.	Polímero Reforçado com Fibras de Carbono	30
2.2.4.	Reforço à Força Cortante com CFC	33
3	Revisão Bibliográfica	35
3.1.	Notas Iniciais	35
3.2.	Resistência à Força Cortante e Modos de Ruptura	35
3.3.	Modelos e Normas	36
3.3.1.	Modelo da Treliça Generalizada	36
3.3.2.	ACI – 318 (1999)	40
3.3.3.	ACI – 440 (2001)	40
3.3.4.	FIB – Bulletin 14 (2001)	43
3.3.5.	Modelo de Chen e Teng (2002)	46
3.3.6.	Modelo de Khalifa e Nanni (2002)	51
3.3.7.	NBR – 6118 (2003)	54
3.3.8.	Modelo de Colloti et al. (2004)	55
3.3.9.	Modelo Cinemático	61
3.4.	Estudos Teóricos e Experimentais	66
3.4.1.	Estudo de Kani (1964)	66
3.4.2.	Estudo de Khalifa et al. (1999)	67

3.4.3. Estudo de Silva Filho (2001)	72
3.4.4. Estudo de Araújo (2002)	76
3.4.5. Estudo de Pellegrino e Modena (2002)	79
3.4.6. Estudo de Bousselham e Challal (2004)	83
4 Programa Experimental	87
4.1. Notas Iniciais	87
4.2. Materiais	88
4.2.1. Concreto	88
4.2.1.1. Resistência à Compressão do Concreto	89
4.2.1.2. Módulo de Elasticidade do Concreto	90
4.2.1.3. Resistência à Tração por Compressão Diametral do Concreto	92
4.2.2. Aço	93
4.2.3. Compósito de Fibras de Carbono	94
4.2.3.1. Ensaio de Resistência à tração do Compósito de Fibras de Carbono	95
4.3. Descrição das Vigas	97
4.3.1. Pré-dimensionamento	97
4.3.2. Verificação à Força Cortante das Vigas da Série I	101
4.3.3. Verificação à Força Cortante das Vigas da Série II	103
4.3.4. Verificação à Flexão	105
4.3.5. Montagem das Formas, Armadura e Concretagem das Vigas	105
4.3.6. Colagem do Reforço	108
4.3.7. Instrumentação	110
4.3.7.1. Extensômetros Elétricos de Resistência	110
4.4. Descrição e Seqüência dos Ensaios	113
5 Apresentação e Análise dos Resultados	116
5.1. Notas Iniciais	116
5.2. Apresentação dos Resultados	116
5.2.1. Viga VR1	116
5.2.2. Viga VI-1	117
5.2.3. Viga VI-2	119
5.2.4. Viga VI-3	120

5.2.5. Viga VR2	121
5.2.6. Viga VII-1	123
5.2.7. Viga VII-2	124
5.2.8. Viga VII-3	126
5.3. Análise dos Resultados	127
5.3.1. Parcelas Resistidas pelo Aço, Concreto e CFC	131
5.3.2. Parâmetros que Influenciam na Resistência do CFC	144
6 Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros	150
6.1. Sugestões para Trabalhos Futuros	153
Referências Bibliográficas	155
Anexo A Registros Fotográficos	160
Anexo B Resultados dos Ensaios à Tração das Barras de Aço	178
Anexo C Resultados dos Ensaios à Tração dos Corpos-de-Prova de CFC	181
Anexo D Resultados dos Ensaios das Vigas	183
Anexo E Gráficos dos Resultados dos Ensaios das Vigas	213
Anexo F Rotinas de Cálculo das Forças Teóricas	243

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Fibras utilizadas no reforço estrutural; www.sika.com , visitado em 2006.	28
Figura 2.2 – Gráfico tensão x deformação específica de fibras e outros materiais, adaptada de Beber (2003).	29
Figura 2.3 – Aplicação do CFC nas regiões tracionadas da laje; www.masterbuilders.com.br , visitado em 2006.	32
Figura 2.4 – Aplicação do CFC na região tracionada da viga; www.masterbuilders.com.br , visitado em 2006.	32
Figura 2.5 – Aplicação do CFC em colunas e nas regiões com força cortante em vigas; www.masterbuilders.com.br , visitado em 2006.	33
Figura 2.6 – Aplicação do CFC em seções de vigas solicitadas à força cortante.	33
Figura 2.7 – Modo de aplicação do CFC nas regiões com força cortante em vigas.	34
Figura 2.8 – Ângulo de direção do CFC nas regiões com força cortante em vigas.	34
Figura 3.1 – Mecanismos de resistência à força cortante de uma viga de concreto.	36
Figura 3.2 – Modelo da Treliça Clássica de Ritter-Mörsch.	37
Figura 3.3 – Modelo esquemático da Treliça Generalizada.	38
Figura 3.4 – Biela da Treliça Generalizada.	39
Figura 3.5 – Corte transversal e longitudinais do reforço; adaptada do ACI – 440 (2001).	41
Figura 3.6 – Reforço em tecido de FRP com inclinação em relação à horizontal; adaptada da FIB – Bulletin 14 (2001).	44
Figura 3.7 – Reforço contínuo com envolvimento completo (colagem contínua) e estribos em U ; adaptada da FIB – Bulletin 14 (2001).	45
Figura 3.8 – Esquema do modelo; adaptada de Chen e Teng (2002).	47
Figura 3.9 – Esquema para reforço contínuo; adaptada de Chen e Teng (2002).	48

Figura 3.10 – Esquema das vigas modeladas; adaptada de Colloti <i>et al.</i> (2004).	56
Figura 3.11 – Esquema para avaliação da aderência de estribos externos; adaptada de Colloti <i>et al.</i> (2004).	57
Figura 3.12 – Campo de compressão diagonal na biela de concreto; adaptada de Hoang e Nielsen (1998).	62
Figura 3.13 – Modelo da fissura deslizante: a) fissura diagonal; b) distribuição de tensão na formação da fissura; adaptada de Hoang e Nielsen (1998).	63
Figura 3.14 – Esquema do modelo da fissura deslizante para vigas de concreto armado reforçadas com estribos em CFC; adaptada de Sánchez <i>et al.</i> (2006).	64
Figura 3.15 – Variação da posição da força concentrada; adaptada de Kani (1964).	66
Figura 3.16 – Vale de ruptura por tração diagonal; adaptada de Kani (1964).	67
Figura 3.17 – Diferentes esquemas da ancoragem; adaptada de Khalifa <i>et al.</i> (1999).	68
Figura 3.18 – Posicionamento dos sistemas de ancoragem; adaptada de Khalifa <i>et al.</i> (1999).	68
Figura 3.19 – Dimensões e detalhamento das vigas (dimensões em mm); adaptada de Khalifa <i>et al.</i> (1999).	69
Figura 3.20 – Esquemas das vigas ensaiadas e da instalação dos LVTD e dos EER; adaptada de Khalifa <i>et al.</i> (1999).	70
Figura 3.21 – Gráfico força x deformação específica para as vigas BT2 e BT3; adaptada de Khalifa <i>et al.</i> (1999).	71
Figura 3.22 – Gráfico força x flecha no meio do vão das vigas; adaptada de Khalifa <i>et al.</i> (1999).	71
Figura 3.23 – Esquema de carregamento e geometria da viga; adaptada de Silva Filho (2001).	73
Figura 3.24 – Detalhamento das armaduras; adaptada de Silva Filho (2001).	73
Figura 3.25 – Detalhamento das armaduras do grupo 1; adaptada de	

Araújo (2002).	77
Figura 3.26 – Detalhamento das armaduras do grupo 2; adaptada de Araújo (2002).	78
Figura 3.27 – Esquema do carregamento (cotas em mm); adaptada Pellegrino e Modena (2002).	80
Figura 3.28 – Esquema de aplicação do reforço contínuo com CFC; adaptada Pellegrino e Modena (2002).	81
Figura 3.29 – Gráfico força versus deslocamento vertical para vigas sem armadura transversal; adaptada Pellegrino e Modena (2002).	81
Figura 3.30 – Gráfico força versus deslocamento vertical para vigas com armadura transversal; adaptada Pellegrino e Modena (2002).	81
Figura 3.31 – Modos de ruptura e tipo de envolvimento do reforço com FRP; adaptada de Bousselham e Challal (2004).	84
Figura 3.32 – Relação entre deformação e rigidez do FRP e resistência do concreto; adaptada de Bousselham e Challal (2004).	85
Figura 4.1 – Gráfico da resistência à compressão x idade do concreto.	89
Figura 4.2 – Gráfico tensão x deformação específica dos corpos-de-prova do concreto.	91
Figura 4.3 – Dimensões dos corpos-de-prova para ensaio à tração do CFC de acordo com a ASTM D 3039 / D 3039 M.	95
Figura 4.4 – Esquema de aplicação de forças às vigas (cotas em cm).	97
Figura 4.5 – Seção transversal das vigas T (cotas em cm).	97
Figura 4.6 – Solicitações nas vigas (cotas em cm).	98
Figura 4.7 – Esquema longitudinal da colagem do reforço em CFC (cotas em cm).	99
Figura 4.8 – Seção transversal AA' das vigas reforçadas VI-1 e VII-1.	100
Figura 4.9 – Seção transversal AA' das vigas reforçadas VI-2 e VII-2.	100
Figura 4.10 – Seção transversal AA' das vigas reforçadas VI-3 e VII-3.	101
Figura 4.11 – Armadura longitudinal das vigas da Série I.	101
Figura 4.12 – Armaduras transversais das vigas da Série I.	102
Figura 4.13 – Armadura longitudinal das vigas da Série II.	103
Figura 4.14 – Armaduras transversais das vigas da Série II.	104
Figura 4.15 – Seção transversal AA' das formas (cotas em cm).	106

Figura 4.16 – Vista superior das formas (cotas em cm).	107
Figura 4.17 – Vista lateral das formas (cotas em cm).	108
Figura 4.18 – Posicionamento dos EER colados nas armaduras das vigas da Série I.	110
Figura 4.19 – Posicionamento dos EER colados nas armaduras das vigas da Série II.	111
Figura 4.20 – Esquema do posicionamento dos EER colados na superfície do concreto em um dos lados da viga.	111
Figura 4.21 – Posicionamento dos EER colados no reforço em CFC.	112
Figura 4.22 – Posicionamento dos LVDT nas vigas das Séries I e II (cotas em cm).	113
Figura 4.23 – Esquema de aplicação de força nas vigas por meio de macaco hidráulico, célula de carga e viga metálica (cotas em cm).	113
Figura 5.1 – Forças cortantes últimas registradas nos ensaios das vigas.	130
Figura 5.2 – Razão entre a força cortante última da viga reforçada e da viga de referência.	130
Figura 5.3 – Ângulo médio de fissuração no “trecho de cortante” da viga VR1 medido por meio digital.	131
Figura 5.4 – Razão entre os ângulos θ_{CR} e θ_{CIN} .	133
Figura 5.5 – Parcelas da força cortante última resistida pelo CFC considerando-se os ângulos θ_{CR} e θ_{ε} .	135
Figura 5.6 – Região de descolamento do CFC da superfície de concreto da viga VII-1.	135
Figura 5.7 – Parcelas da força cortante última resistida pelo aço considerando-se os ângulos θ_{CR} e θ_{ε} .	136
Figura 5.8 – Parcelas da força cortante última resistida pelo concreto considerando-se os ângulos θ_{CR} e θ_{ε} .	136
Figura 5.9 – Razão entre os valores da força cortante última <i>versus</i> os valores da força cortante teórica segundo o ACI-318 (1999) e o ACI-440 (2001), o modelo cinemático e o modelo de Colloti <i>et al.</i> (2004).	138
Figura 5.10 – Razão entre os valores da força cortante última <i>versus</i> os valores da força cortante teórica segundo o ACI-318 (1999) e o ACI-440	

(2001) considerando-se o ângulo θ_{CR} .	139
Figura 5.11 – Razão entre os valores da força cortante última <i>versus</i> os valores da força cortante teórica segundo o ACI-318 (1999) e o ACI-440 (2001) considerando-se o ângulo θ_e .	140
Figura 5.12 – Razão entre a parcela experimental resistida pelo CFC <i>versus</i> o seu valor teórico segundo diversos modelos considerando-se o ângulo θ_{CR} .	142
Figura 5.13 – Razão entre a parcela experimental resistida pelo CFC <i>versus</i> o seu valor teórico segundo diversos modelos considerando-se o ângulo θ_e .	143
Figura 5.14 – Gráfico $v_f \times E_f \rho_f$.	146
Figura 5.15 – Gráfico $v_f \times \frac{E_{sw} \rho_{sw}}{E_f \rho_f}$.	147
Figura 5.16 – Gráfico $v_f \times \frac{E_f \rho_f}{f_c^{2/3}}$.	147
Figura 5.17 – Gráfico $v_f \times (E_{sw} \rho_{sw} + E_f \rho_f)$.	148
Figura 5.18 – Gráfico $v_f \times \frac{E_{sw} \rho_{sw} + E_f \rho_f}{f_c^{2/3}}$.	148
Figura 5.19 – Gráfico $v_f \times \theta$.	149

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Características mecânicas das fibras e do aço; adaptada de Beber (2003).	30
Tabela 2.2 – Características e dados de instalação dos sistemas de reforço com CFRP; adaptada de Beber (2003).	31
Tabela 3.1 – Fator de redução da resistência do reforço.	41
Tabela 3.2 – Coeficiente de segurança do compósito.	45
Tabela 3.3 – Propriedades mecânicas e geométricas das vigas.	74
Tabela 3.4 – Forças últimas e flechas máximas.	75
Tabela 3.5 – Força cortante teórica e última, deformação específica e modo de ruptura.	75
Tabela 3.6 – Características do reforço e resistência à compressão do concreto.	77
Tabela 3.7 – Força cortante teórica, última e modo de ruptura.	78
Tabela 3.8 – Propriedades da viga e do reforço.	80
Tabela 3.9 – Resultados ensaios dos experimentos de Pellegrino e Modena (2002).	82
Tabela 3.10 – Propriedades e parâmetros analisados por Boussselham e Challal (2004).	84
Tabela 4.1 – Consumo de material por m^3 de concreto.	88
Tabela 4.2 – Resistência à compressão do concreto para diversas idades.	89
Tabela 4.3 – Módulo de elasticidade do concreto para os corpos-de-prova de concreto.	91
Tabela 4.4 – Resultados da resistência à compressão diametral do concreto.	92
Tabela 4.5 – Resultados dos ensaios de resistência à tração das barras de aço.	93
Tabela 4.6 – Geometria dos corpos-de-prova de CFC recomendada pela ASTM D 3039 / D3039 M.	95
Tabela 4.7 – Resultados dos ensaios de resistência à tração dos corpos-	

de-prova de CFC.	96
Tabela 4.8 – Força cortante teórica e força de ruptura teórica das vigas da Série I.	102
Tabela 4.9 – Força Cortante Teórica e Força de Ruptura Teórica das Vigas da Série II.	104
Tabela 4.10 – Posicionamento angular dos EER colados na superfície do concreto.	112
Tabela 5.1 – Deformações específicas máximas lidas na superfície do concreto da viga VR1.	117
Tabela 5.2 – Deformações específicas máximas lidas na superfície do concreto da viga VI-1.	118
Tabela 5.3 – Deformações específicas máximas lidas na superfície do concreto da viga VI-2.	120
Tabela 5.4 – Deformações específicas máximas lidas na superfície do concreto da viga VI-3.	121
Tabela 5.5 – Deformações específicas máximas lidas na superfície do concreto da viga VR2.	122
Tabela 5.6 – Deformações específicas máximas lidas na superfície do concreto da viga VII-1.	124
Tabela 5.7 – Deformações específicas máximas lidas na superfície do concreto da viga VII-2.	125
Tabela 5.8 – Deformações específicas máximas lidas na superfície do concreto da viga VII-3.	127
Tabela 5.9 – Forças, deformações específicas, flechas últimas e modo de ruptura das vigas.	128
Tabela 5.10 – Força cortante última e parâmetros das vigas.	129
Tabela 5.11 – Ângulos θ_{CR} , θ_{ε} e θ_{CIN} , e a razão $\frac{\theta_{CR}}{\theta_{CIN}}$.	133
Tabela 5.12 – Parcelas experimentais da força cortante última (CFC, aço e concreto) considerando-se os ângulos θ_{CR} e θ_{ε} .	134
Tabela 5.13 – Força cortante teórica segundo o modelo cinemático, o modelo do ACI–318 (1999) e ACI–440 (2001), e modelo de Colloti <i>et al.</i> (2004).	137

Tabela 5.14 – Parcelas teóricas da força cortante última segundo o ACI–318 (1999) e o ACI–440 (2001) considerando-se o ângulo θ_{CR} .	139
Tabela 5.15 – Parcelas teóricas da força cortante última segundo o ACI–318 (1999) e o ACI–440 (2001) considerando-se o ângulo θ_{ε} .	140
Tabela 5.16 – Valores teóricos da parcela resistida pelo CFC segundo diversos modelos considerando-se o ângulo θ_{CR} .	142
Tabela 5.17 – Valores teóricos da parcela resistida pelo CFC segundo diversos modelos considerando-se o ângulo θ_{ε} .	143
Tabela 5.18 – Razão $\frac{V_{f,exp}}{V_{f,teor}}$ segundo os diversos modelos teóricos considerando-se os ângulos θ_{CR} e θ_{ε} .	144
Tabela 5.19 – Parâmetros que influenciam a deformação específica última do reforço em CFC.	145

Lista de Símbolos

Romanos

a Distância da aplicação da força concentrada até o apoio

considerado

A_f Área da seção da armadura transversal do reforço

A_{sl} Área da seção da armadura de flexão

A_{sw} Área da seção da armadura transversal do estribo de aço

b_w Largura da seção da viga

B Largura da mesa da viga

CFC Compósito de fibras de carbono

$CFRP$ Carbon fiber reinforced polymer

d Diâmetro do corpo-de-prova de concreto

d Altura efetiva da viga

d_f Altura efetiva do reforço transversal

D_f Fator de distribuições de tensões

E_c Módulo de elasticidade do concreto

E_f Módulo de elasticidade do reforço

E_s Módulo de elasticidade do aço

f_c Resistência do concreto à compressão

f_f Resistência à tração do reforço

$f_{f,e}$ Resistência efetiva à tração do reforço

$f_{f,u}$	Resistência última à tração do reforço
f_{ID}	Resistência à tração do concreto por compressão diametral
f_y	Resistência de escoamento do aço
F_b	Força transmitida por aderência
<i>FRP</i>	Fiber reinforced polymer
h	Altura da viga
h_f	Altura do reforço transversal
H	Altura da mesa da viga
k	Fator de redução do reforço
k_v	Fator de redução devido à aderência do reforço
L	Altura do corpo-de-prova de concreto
L_e	Comprimento de aderência ou ancoragem efetiva do reforço
$L_{m\acute{a}x}$	Comprimento de máximo de ancoragem do reforço
<i>LVDT</i>	Deflectômetros elétricos
R	Coefficiente de redução de resistência do reforço
M_{CR}	Momento fletor correspondente à ruptura por cortante
M_{FL}	Momento fletor resistente
M_u	Momento fletor de ruptura
n	Número de camadas do reforço
P_u	Força de ruptura
<i>PRF</i>	Polímero reforçado com fibras
<i>PRFC</i>	Polímero reforçado com fibras de carbono
s	Espaçamento entre as armaduras transversais de aço (estribos)

s_f	Espaçamento entre os estribos do reforço transversal
SG	Strain-gauge
t_f	Espessura do reforço
V_{fib}	Volume das fibras
V_{mat}	Volume da matriz
V	Força cortante
V_c	Força cortante resistida pelo concreto
$V_{c,exp}$	Força cortante resistida pelo concreto registrada no ensaio
$V_{c,teór}$	Força cortante resistida pelo concreto segundo modelo teórico
V_f	Força cortante resistida pelo reforço transversal
V_{fd}	Força cortante de projeto resistida pelo reforço transversal
$V_{f,exp}$	Força cortante resistida pelo reforço registrada no ensaio
$V_{f,teór}$	Força cortante resistida pelo reforço segundo modelo teórico
V_{sw}	Força cortante resistida pela armadura transversal interna
$V_{sw,exp}$	Força cortante resistida pelo aço registrada no ensaio
$V_{sw,teór}$	Força cortante resistida pelo aço segundo modelo teórico
V_R	Força cortante resistida pela biela
w_f	Largura do reforço transversal
$w_{f,e}$	Largura efetiva do reforço transversal
x	Projeção horizontal da fissura inclinada
z	Braço de alavanca

Gregos

α	Ângulo de inclinação das armaduras transversais (estribos de aço)
α_f	Ângulo de inclinação do reforço transversal
β	Ângulo de inclinação do reforço transversal
ε_c	Deformação específica do concreto
$\varepsilon_{f,e}$	Deformação específica efetiva do reforço
$\varepsilon_{fd,e}$	Deformação específica efetiva de projeto do reforço
$\varepsilon_{f,u}$	Deformação específica última do reforço
ϕ	Fator de redução da resistência à força cortante
γ_f	Coeficiente de segurança do reforço
ν_c	Fator de efetividade do concreto
ν_0	Fator de efetividade do concreto
ν_f	Fator de efetividade do reforço
θ	Ângulo de inclinação da biela de concreto (campo de compressão)
θ_{CR}	Ângulo de inclinação fissura
θ_ε	Ângulo de inclinação do campo de deformações específicas
θ_{CIN}	Ângulo de inclinação da linha de ruptura
ρ_f	Taxa geométrica da armadura transversal do reforço
ρ_{sl}	Taxa geométrica da armadura longitudinal do aço tracionado
ρ_{sw}	Taxa geométrica da armadura transversal de aço
σ_c	Tensão de compressão no concreto
$\sigma_{f,m\acute{a}x}$	Tensão máxima admissível do reforço

τ	Tensão de cisalhamento média; tensão tangencial máxima
τ_u	Tensão última de aderência entre o reforço e o concreto; tensão tangencial última normalizada
ω	Taxa mecânica da armadura transversal
ω_{sw}	Taxa mecânica da armadura transversal interna de aço
ω_{fw}	Taxa mecânica da armadura transversal do reforço externo
ψ_e	Taxa mecânica da armadura transversal interna
ψ_i	Taxa mecânica da armadura do reforço transversal
ψ_f	Fator de redução adicional do reforço à força cortante