



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

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.



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 Trelíça 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 Boussselham 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
$\sigma_{f,m\grave{a}x}$	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

1 Introdução

1.1. Histórico

As estruturas de concreto são extremamente complexas e apresentam uma enorme variedade de características, das quais dependem a sua maior ou menor adequação aos propósitos estabelecidos inicialmente pelo projeto. Muitas vezes podem ser necessárias intervenções durante a utilização das construções, de maneira a recuperar os elementos estruturais danificados ou aumentar as suas capacidades resistentes.

Excetuando-se os casos correspondentes à ocorrência de catástrofes naturais, pela violência das solicitações e o caráter imprevisível das mesmas, os problemas de patologias e a necessidade do reforço estrutural têm suas origens durante as três etapas básicas do processo da construção: projeto, execução e utilização.

O reforço pode se tornar imprescindível por qualquer uma das seguintes razões:

- Aumento do carregamento devido às sobrecargas acidentais elevadas, aumento das cargas móveis, instalação de máquinas pesadas, excesso de vibração.
- Danos nos elementos estruturais devido ao envelhecimento/deterioração dos materiais, corrosão das armaduras, impacto de veículos e ocorrência de sinistros.
- Limitação de flechas e/ou limitação das aberturas das fissuras.
- Modificação do sistema estrutural devido à eliminação de paredes, vigas ou pilares e da abertura em vigas ou lajes.
- Erros de projeto ou construção em virtude de um dimensionamento ou execução incorretos do elemento estrutural.

Após a análise da causa e verificação da necessidade do reforço, define-se então qual a melhor solução técnica para o problema. Além das técnicas convencionais de reforço estrutural (aumento da seção transversal, protensão externa, colagem de chapa de aço, etc.), uma técnica mais recente é a colagem de compósitos de fibras de carbono na estrutura.

Os materiais compósitos inicialmente desenvolvidos para aplicações nas indústrias aeroespacial, automotiva, naval, de equipamentos esportivos e armamentos, passaram a ocupar um lugar de destaque como alternativa viável no reforço de estruturas de concreto armado. Esses materiais podem resolver uma série de problemas no âmbito da reabilitação estrutural. A combinação de fibras e polímeros permite que o elemento de reforço seja confeccionado para atender a uma solução particular, tanto em relação à sua geometria quanto às suas propriedades mecânicas.

Os compósitos de fibra de carbono apresentam inúmeras vantagens em relação à chapa de aço, como, por exemplo, menor peso próprio, alta flexibilidade, fácil instalação e manuseio, alta resistência e alto módulo de elasticidade. Além disso, o compósito não é afetado pela corrosão eletroquímica, e é resistente ao efeito corrosivo de sais e outros agentes agressivos.

1.2. Objetivos

Como o reforço à flexão e à força cortante com materiais compósitos nos elementos de concreto armado tem sido largamente adotado, muitas questões ainda necessitam serem melhor entendidas, principalmente o seu comportamento e o mecanismo de resistência de vigas solicitadas à força cortante reforçadas com esses materiais, tais como: a eficiência do reforço, o modelo de ancoragem adotado, o modo de ruptura da viga em função do tipo de envolvimento do CFC, a deformação específica efetiva do CFC, o ângulo de inclinação da fissura diagonal principal, análise do modelo da Treliça Generalizada e demais modelos teóricos de dimensionamento da força cortante com a utilização de CFC. Com esses objetivos, neste trabalho foram testadas oito vigas de concreto armado de seção **T** bi-apoiadas, com duas forças concentradas aplicadas a uma distância de 87,5 cm dos apoios.

Todas as vigas foram dimensionadas de modo a garantir a ruptura por força cortante, a fim de comparar e avaliar os diversos parâmetros obtidos nos ensaios, com os resultados de alguns modelos teóricos e experimentais encontrados na literatura, tais como: deformação específica, ângulo de fissuração, rigidez, resistência efetiva, força cortante última, força cortante teórica, etc.

As vigas foram divididas em duas séries, sendo ensaiada uma viga de referência para cada série, ou seja, as que não têm reforço. Buscando-se avaliar uma situação mais próxima da realidade, as vigas reforçadas foram submetidas a um pré-carregamento, ou seja, o reforço foi executado com a viga já solicitada.

O reforço à força cortante com compósitos de fibra de carbono foi realizado por meio da colagem de tiras (estribos) em forma de **U**, ancorando-se as extremidades do reforço na alma da viga por meio de uma faixa longitudinal de CFC (compósitos de fibra de carbono).

1.3. Conteúdo

No Capítulo 2 é apresentado um resumo sobre o reforço de estruturas de concreto armado com materiais compósitos, as características e as vantagens técnicas desse tipo de reabilitação estrutural.

No Capítulo 3 é feita uma análise sucinta das diversas teorias, normas e pesquisas sobre o dimensionamento à força cortante de vigas de concreto utilizando-se esse tipo de reforço estrutural.

São descritos no Capítulo 4 os materiais (concreto, aço e CFC) utilizados no programa experimental, o esquema e a execução das séries de vigas.

Os resultados dos ensaios são mostrados no Capítulo 5, no qual são feitas as análises dos diversos parâmetros estudados, tais como as parcelas resistentes do reforço à força cortante, do aço e a do concreto. Estes valores são comparados com modelos encontrados na literatura.

As conclusões do estudo experimental e as sugestões para os trabalhos futuros são apresentadas no Capítulo 6. Nos anexos A, B, C, D, E e F são mostrados respectivamente os registros fotográficos da análise experimental, os gráficos das amostras de aço e CFC, as tabelas e os gráficos dos ensaios das vigas ensaiadas, e as rotinas de cálculo das forças teóricas das vigas.

2

Técnicas de Reforço com Materiais Compósitos em Estruturas de Concreto

2.1.

Notas Iniciais

Este capítulo trata de algumas propriedades dos materiais compósitos, as características físico-químicas da resina e das fibras, e a sua aplicabilidade dentro da construção civil, especificamente no campo da reabilitação estrutural.

2.2.

Polímeros Reforçado com Fibras

Os compósitos ou polímeros reforçado com fibras (FRP – *Fiber Reinforced Polymers*) são os materiais formados pela combinação de uma matriz polimérica, um material de reforço constituído por fibras contínuas e, geralmente, por alguns fillers e aditivos. As fibras são responsáveis pela resistência do compósito e a matriz é o produto que as une, sendo responsável pela transmissão das solicitações externas por meio de tensões tangenciais.

2.2.1.

Matriz

A matriz polimérica pode ser uma resina termofixa, como o adesivo epoxídico, o poliéster e o fenol, ou termoplástica, como o polipropileno e o nylon. As resinas termofixas (termorígidas) após a cura produzem uma estrutura molecular de ligações cruzadas fortes que não se fundem a altas temperaturas. Já para as termoplásticas as cadeias moleculares não se cruzam, logo amolecem e se fundem a alta temperatura.

Entre as resinas mais utilizadas em reforço e recuperação de estruturas de concreto destaca-se a epoxídica, por apresentar excelentes propriedades de aderência e durabilidade, as quais são derivadas do petróleo (etoxileno), resultante da combinação da epícloridrina e do bisfenol “A”. Além disso, tem grande

resistência à tração, boa resistência à fluência e baixa retração durante a cura. Outra grande vantagem desse material é sua resistência a grandes variações de temperatura (-40°C a $+50^{\circ}\text{C}$). Por ser um produto bi-componente, é composto de um agente principal (a própria resina) e um catalisador (endurecedor). Dentre as principais propriedades físicas deste material destacam-se:

- Resistência à tração variando de 55 MPa a 130 MPa , e a compressão variando de 120 MPa a 210 MPa ;
- Módulo de elasticidade: $2,5\text{ GPa}$ a $4,1\text{ GPa}$;
- Deformação específica na ruptura: $1,0\%$ a $9,0\%$;
- Peso específico: $10,8\text{ kN/m}^3$ a $12,7\text{ kN/m}^3$;
- Excelente adesão ao concreto com resistência entre 30 MPa e 50 MPa ;
- Retração na cura: $1,0\%$ a $5,0\%$.

2.2.2. Fibras

Os principais tipos de fibras utilizados nas aplicações da engenharia civil são os seguintes: vidro (*Glass*), carbono (*Carbon*) e Kevlar (*aramida – ARomatic polyAMID*). O processo de fabricação é diferente para cada um destes materiais, resultando em microestruturas com propriedades distintas (Figura 2.1).

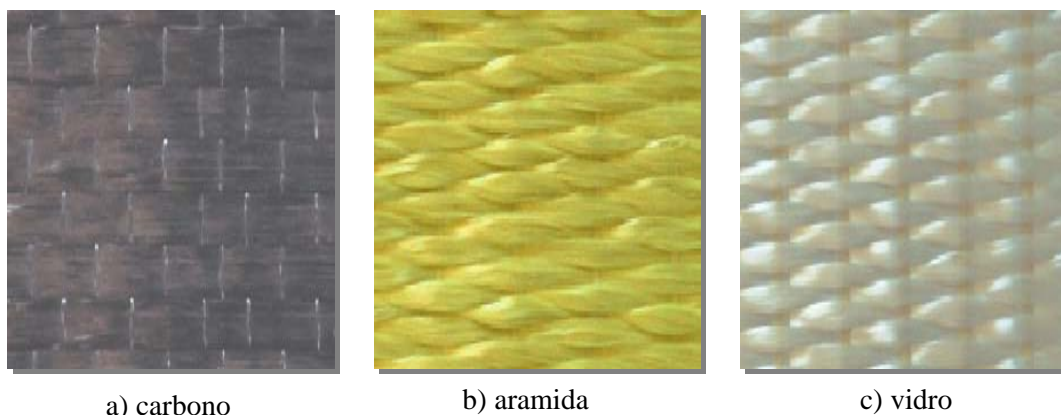


Figura 2.1 – Fibras utilizadas no reforço estrutural; www.sika.com, visitado em 2006.

O processo de fabricação das fibras de carbono ocorre por meio da carbonização de fibras de polímeros, como a poliacrilonitrila (PAN), sendo suas características mecânicas diretamente dependentes da estrutura molecular obtida. Dependendo do tipo de tratamento da fibra básica que inclui carbonização,

grafitização e oxidação, é possível fabricar fibras de carbono com diversos valores de resistência e módulo de elasticidade, sendo preta a sua cor natural.

As fibras de carbono são caracterizadas por uma combinação de baixo peso próprio, alta resistência, alta rigidez, facilidade de assumir diferentes formas e grande durabilidade. Este é um tipo de material baseado nas fortes ligações carbono-carbono e na leveza do átomo de carbono. A sua alta resistência e alto módulo de elasticidade se devem ao paralelismo entre os eixos das fibras e os seus diâmetros podem variar entre 0,07 mm e 0,10 mm, podendo ser fabricadas continuamente, sem limite de comprimento.

A Figura 2.2 e a Tabela 2.1 mostram algumas das principais propriedades mecânicas das fibras de carbono, vidro e aramida, e de outros materiais utilizados na construção civil como o aço.

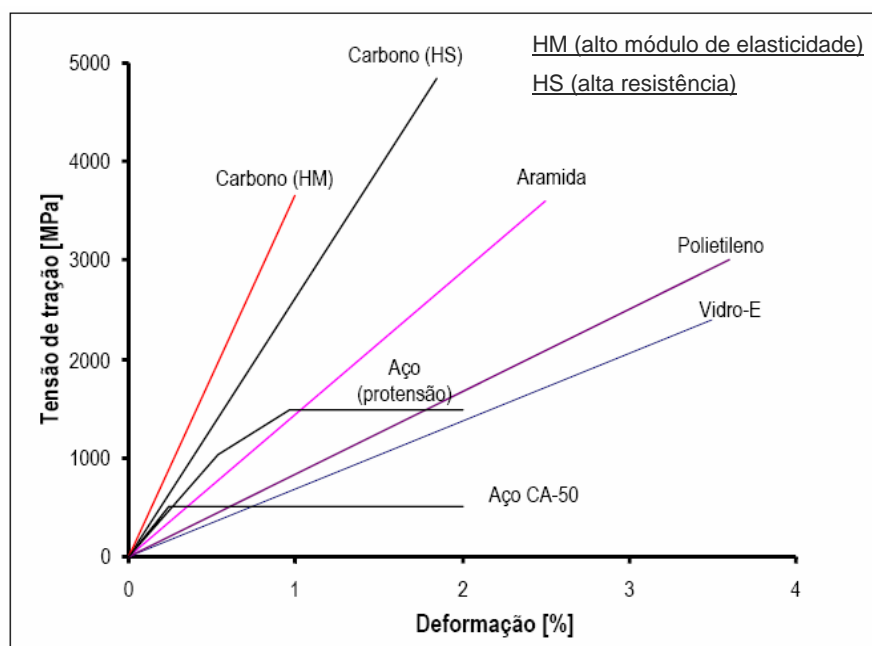


Figura 2.2 – Gráfico tensão x deformação específica de fibras e outros materiais, adaptada de Beber (2003).

Tabela 2.1 – Características mecânicas das fibras e do aço; adaptada de Beber (2003).

Propriedade	Vidro-E	Aramida	Carbono (HS)	Carbono (HM)	Aço CA-50
Resistência à tração (MPa)	2400	3600	3300 – 5000	1500 – 4700	500 (escoamento)
Módulo de elasticidade (GPa)	70	130	230 – 300	345 – 590	210
Deformação específica última (%)	3,5	2,5	1,5 – 2,2	0,6 – 1,4	0,2 (escoamento)
Peso específico (kg/m ³)	2560	1440	1800	1900	7850

2.2.3. Polímero Reforçado com Fibras de Carbono

O sistema resultante da resina polimérica e as fibras de carbono são denominados de Polímero Reforçado com Fibras de Carbono, ou *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP), ou simplesmente Compósitos de Fibras de Carbono (CFC). Os dois principais sistemas de reforço estrutural com CFC são: sistemas pré-fabricados e sistemas curados *in situ*.

Os sistemas pré-fabricados são sistemas laminados semi-rígidos de CFRP do tipo unidirecional, resultado da impregnação de um conjunto de feixes ou camadas contínuas de fibras por uma resina termofixa, consolidada por um processo de pultrusão. Esse processo é um método de fabricação contínuo, mecanizado, para produtos de seção uniforme, em resina poliéster, epóxi estervinílica ou fenólica reforçada com fibras, de desempenho superior aos materiais convencionais.

Para o sistema curado *in situ* a sua origem ocorre por meio de fibras contínuas, sob a forma de fios, mantas ou tecidos, em estado seco ou pré-impregnado, colados sobre a superfície de concreto a ser reforçado com resina epoxídica. As principais propriedades desses dois tipos de sistema são mostradas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Características e dados de instalação dos sistemas de reforço com CFRP; adaptada de Beber (2003).

Características	Sistemas Pré-Fabricados	Sistemas Curados <i>in situ</i>
Forma	laminados	mantas ou tecidos
Espessura	1,0 a 1,5 mm	0,1 a 0,5 mm
Utilização	Colagem dos elementos pré-fabricados com adesivo	Colagem e impregnação das mantas/tecidos com adesivo
Dados de instalação	<ul style="list-style-type: none"> – salvo condições especiais, aplicável somente em superfícies planas; – adesivo tixotrópico; – geralmente usa-se uma única camada; – rigidez do compósito e tixotropia do adesivo permitem a tolerância de algumas imperfeições na superfície reforçada. 	<ul style="list-style-type: none"> – independente da forma da superfície, necessidade de arredondamento dos cantos; – resina de baixa viscosidade para colagem e impregnação; – pode-se usar várias camadas.
	<ul style="list-style-type: none"> – má aplicação e mão-de-obra de baixa qualidade podem ocasionar perda de ação compósita entre o reforço e a estrutura. 	

Neste estudo será dado ênfase ao sistema curado *in situ*, e dentre os principais tipos de fibras de carbono deste sistema podem-se citar as seguintes mantas ou tecidos atualmente comercializados: o SIKAWRAP 230-C da empresa SIKA, o TEC-FIBER da empresa Rheotec, e o MBRACE da empresa Master Builders Technologies (MBT).

O reforço com CFC tem uma grande adaptabilidade à geometria dos elementos estruturais, o que torna suas aplicações rápidas, fáceis e eficazes. Porém, este sistema de reforço também apresenta algumas desvantagens como a sua baixa resistência ao fogo, risco de deterioração quando exposto aos raios ultravioletas e o risco de vandalismo. Na maioria das vezes apresentam custos iniciais mais elevados se comparado a outras técnicas de reforço, como as que empregam chapas de aço.

No aspecto do dimensionamento do reforço propriamente dito citam-se três principais objetivos para a aplicação do CFC nas estruturas de concreto armado:

- aumento do momento fletor resistente de lajes (Figura 2.3) e vigas (Figura 2.4) pela adição de camadas de compósito de fibras de carbono na face tracionada (flexão);
- aumento da capacidade resistente à força cortante de vigas pela colagem do material compósito nas laterais da viga (Figura 2.5);

- aumento da ductilidade e resistência de colunas ou pilares sujeitos a solicitações sísmicas por meio do envolvimento completo do elemento estrutural com material compósito (Figura 2.5).

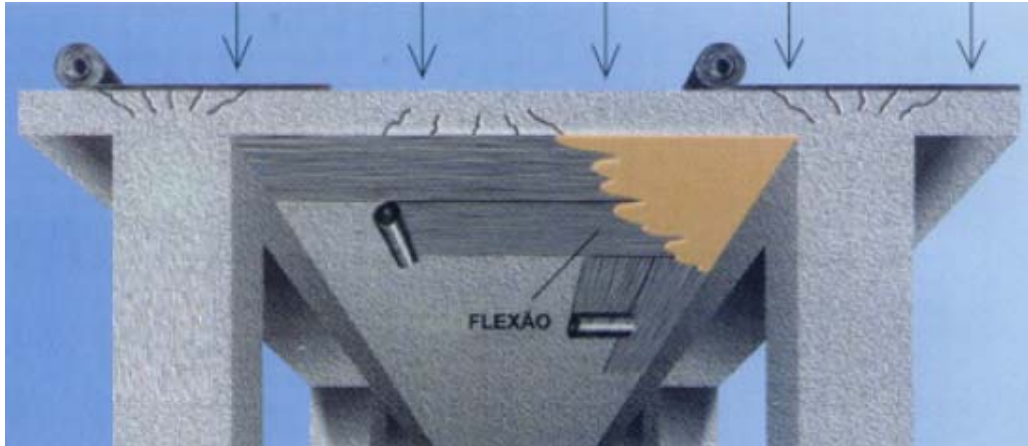


Figura 2.3 – Aplicação do CFC nas regiões tracionadas da laje; www.masterbuilders.com.br, visitado em 2006.

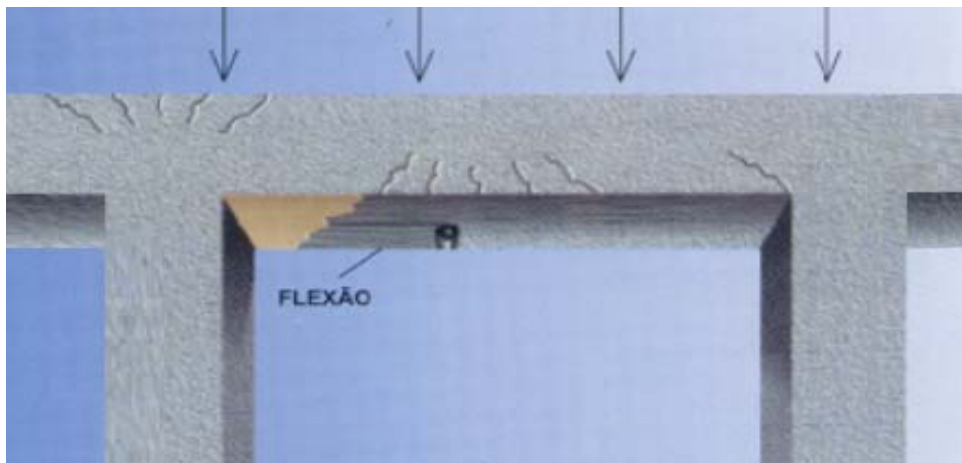


Figura 2.4 – Aplicação do CFC na região tracionada da viga; www.masterbuilders.com.br, visitado em 2006.

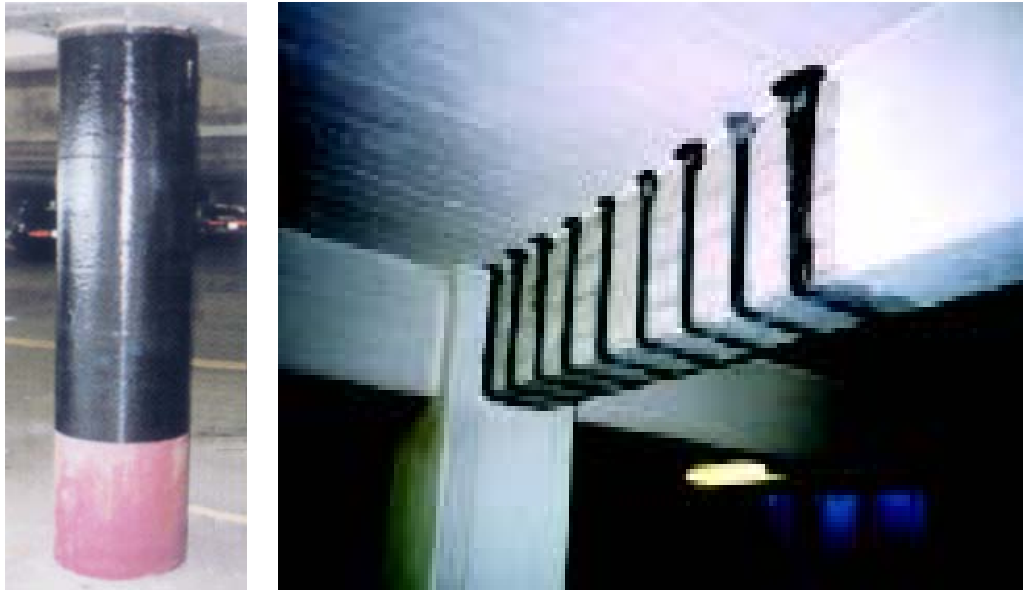


Figura 2.5 – Aplicação do CFC em colunas e nas regiões com força cortante em vigas; www.masterbuilders.com.br, visitado em 2006.

2.2.4. Reforço à Força Cortante com CFC

Com o objetivo de se aumentar a capacidade resistente à força cortante de vigas com o uso de compósitos de fibras de carbono (CFC), o reforço é colado na alma da viga utilizando-se três configurações típicas como mostrado na Figura 2.6.

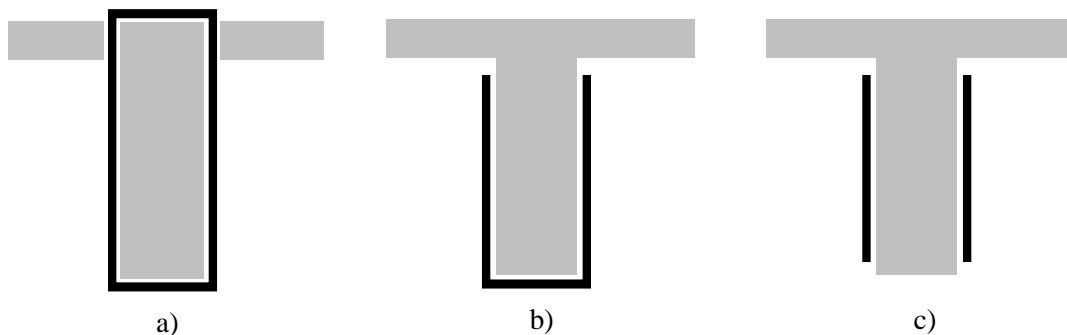


Figura 2.6 – Aplicação do CFC em seções de vigas solicitadas à força cortante.

De acordo com a literatura técnica, em geral, o envolvimento completo da alma tem se mostrado mais eficiente, seguido do envolvimento em U e por último a colagem do reforço somente nas laterais da viga (Figura 2.6). Porém, no caso do envolvimento completo a sua aplicação é mais difícil, pois há a necessidade de se

fazer uma pequena abertura na laje. Para os casos (b) e (c), pode ser utilizada uma ancoragem mecânica na extremidade do reforço para torná-lo mais eficiente.

O reforço com compósitos de fibra de carbono pode ser aplicado de modo contínuo na alma da viga na região a ser reforçada, ou em tiras (estribos) conforme é mostrado na Figura 2.7.

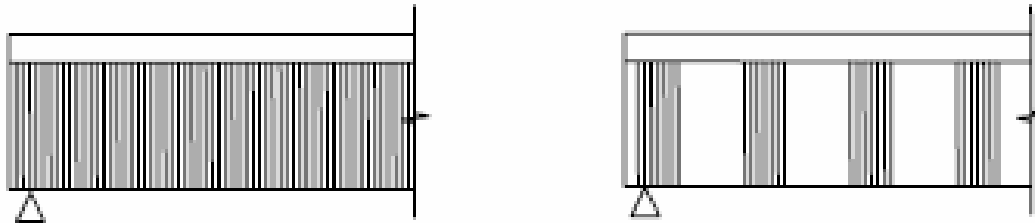


Figura 2.7 – Modo de aplicação do CFC nas regiões com força cortante em vigas.

As fibras do reforço podem ser unidirecionais, sendo aplicado verticalmente (caso mais usual) como mostrado na Figura 2.8, caso (a), ou normais à fissura diagonal, caso (b). As fibras também podem ser orientadas em múltiplas direções, criando-se uma pseudo-isotropia como nos casos (c) e (d).

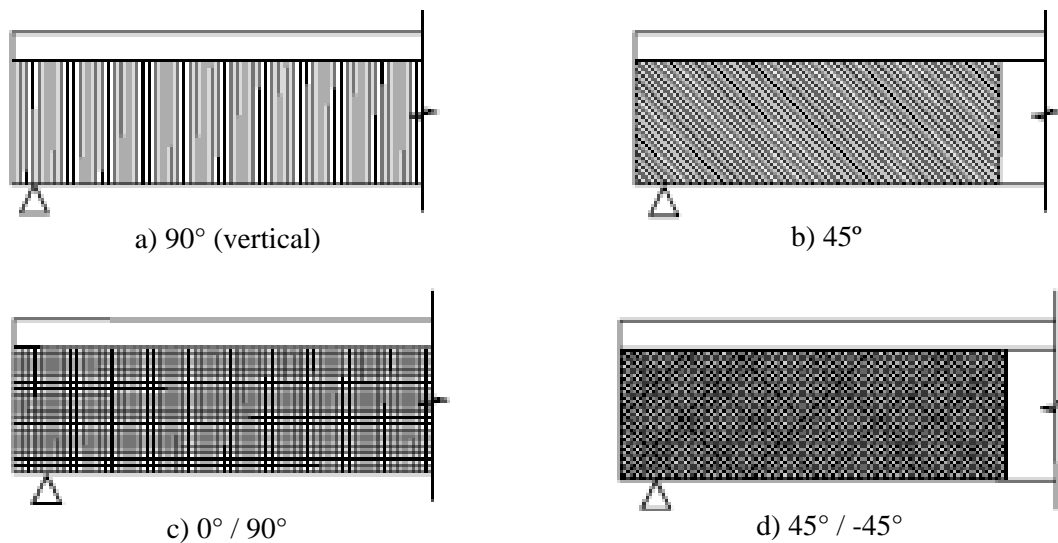


Figura 2.8 – Ângulo de direção do CFC nas regiões com força cortante em vigas.

3 Revisão Bibliográfica

3.1. Notas Iniciais

Neste item são apresentados alguns conceitos clássicos referentes ao dimensionamento à força cortante de vigas, como o da Treliça Generalizada e o estudo de Kani. Modelos teóricos e prescrições normativas que tratam do dimensionamento de vigas com e sem a utilização de reforço estrutural são discutidos. Alguns trabalhos experimentais realizados no Brasil e no exterior sobre o reforço à força cortante de vigas de concreto armado por meio de compósitos de fibras de carbono são descritos.

Como o comportamento à força cortante de uma viga é mais complexo do que à flexão, conseqüentemente o comportamento do reforço à força cortante também é mais complexo. Na revisão bibliográfica mostra-se que o dimensionamento à força cortante depende do tipo de execução do reforço, do sistema de ancoragem adotado e da deformação específica efetiva do CFC.

3.2. Resistência à Força Cortante e Modos de Ruptura

As vigas de concreto armado resistem às solicitações tangenciais pela interação de diferentes mecanismos, como pode ser observado na Figura 3.1. A força cortante é resistida pela combinação da contribuição do concreto não fissurado no banzo comprimido, pelo efeito de pino (*dowel effect*) gerado pela armadura longitudinal de tração e pelo engrenamento dos agregados (*aggregate interlock*). A armadura transversal (estribos internos) não contribui para a resistência até que se forme a primeira fissura diagonal, e a partir daí o estribo passa a auxiliar na resistência à força cortante, transmitindo tensão entre os dois lados da fissura.

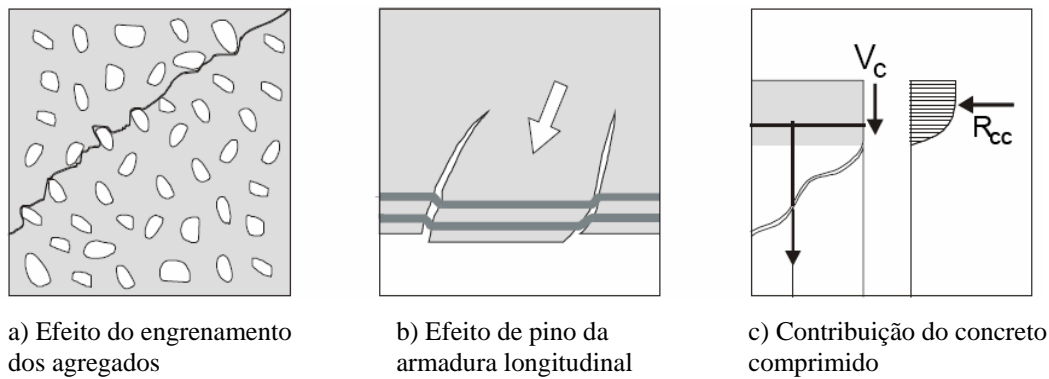


Figura 3.1 – Mecanismos de resistência à força cortante de uma viga de concreto.

Os modos de ruptura associados às vigas submetidas a forças cortantes na presença de armaduras transversais efetivas podem ser classificados da seguinte forma (Fusco, 1981):

- ruptura por força cortante – compressão: corresponde aos esmagamento da bielas diagonais de concreto;
- ruptura por força cortante – tração: ocorre quando é vencida a resistência da armadura transversal, ocorrendo a ruptura por tração diagonal;
- ruptura por força cortante – flexão: decorre da interação da força cortante com o momento fletor e surgem quando as fissuras diagonais cortam uma parte da região que formaria o banzo comprimido da viga.

A resistência à força cortante de uma viga é dada pela soma da parcela resistida pelo concreto e pelas armaduras. Com o uso dos compósitos de fibras de carbono (CFC) por meio da colagem de estribos em **U** numa viga de seção **T**, tem-se uma terceira parcela resistente, que é a parcela do reforço.

3.3. Modelos e Normas

3.3.1. Modelo da Treliça Generalizada

O modelo clássico para o cálculo da armadura transversal para resistir à força cortante é o modelo da treliça de Ritter-Mörsch, idealizado por Ritter no final do século XIX e aprimorado por Mörsch no início do século XX.

Esse modelo é sugerido pelo aspecto da fissuração das vigas fletidas, conforme mostrado na Figura 3.2, sendo baseado nas seguintes hipóteses:

- o concreto não resiste à tração;
- a viga se comporta como uma treliça de banzos paralelos;
- as bielas diagonais de compressão têm inclinação $\theta = 45^\circ$ em relação ao eixo longitudinal da viga.

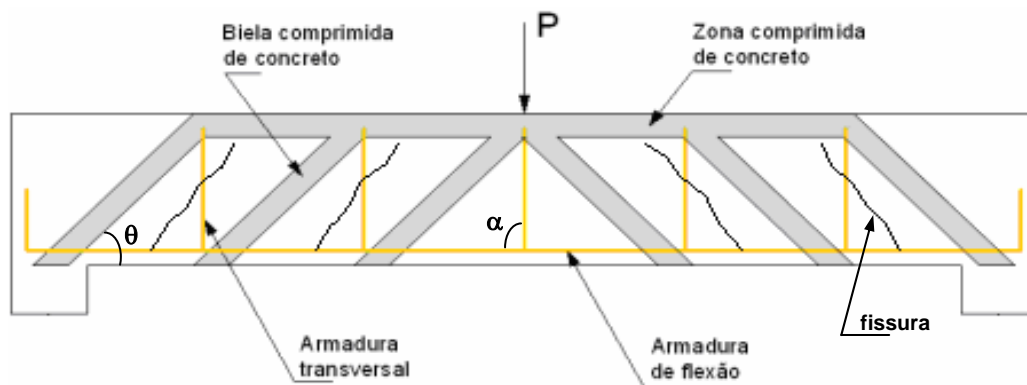


Figura 3.2 – Modelo da Treliça Clássica de Ritter-Mörsch.

A armadura transversal tem uma inclinação $45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ em relação ao eixo longitudinal da viga.

O modelo da Treliça Generalizada surgiu com os estudos de Fritz Leonhardt e René Walther, que na década de 1960 ensaiaram diversas vigas e concluíram que o modelo de Ritter-Mörsch não era consistente, pois o ângulo das bielas de concreto era diferente de 45° .

A Figura 3.3 ilustra o modelo da Treliça Generalizada onde:

- α – ângulo de inclinação das barras transversais;
- θ – ângulo de inclinação das bielas;
- s – espaçamento entre as barras transversais;
- z – braço de alavanca;
- V_α – força em uma barra transversal;
- V_s – força cortante solicitante.

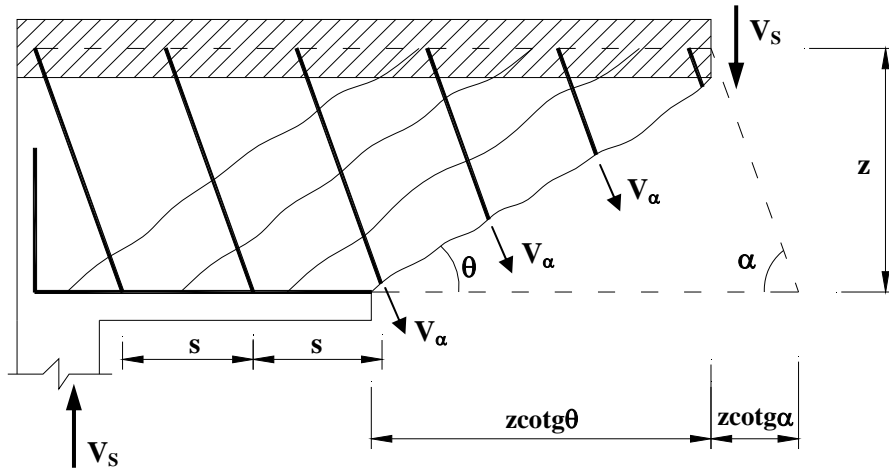


Figura 3.3 – Modelo esquemático da Treliça Generalizada.

O número de barras transversais que cortam uma fissura é dado por:

$$n = \frac{z}{s} (\cotg \theta + \cotg \alpha) \quad (3.1)$$

O equilíbrio das forças verticais $\Sigma F_y = 0$ é dado por:

$$V_s - (nV_\alpha) \text{sen} \alpha = 0 \quad (3.2)$$

sendo

$$V_\alpha = A_{s\alpha} \sigma_s \quad (3.3)$$

onde

$A_{s\alpha}$ – área de uma barra transversal;

σ_s – tensão em uma barra transversal.

Para a força cortante resistida pela armadura transversal tem-se:

$$V_s = \frac{z}{s} A_{s\alpha} \sigma_s \text{sen} \alpha (\cotg \theta + \cotg \alpha) \quad (3.4)$$

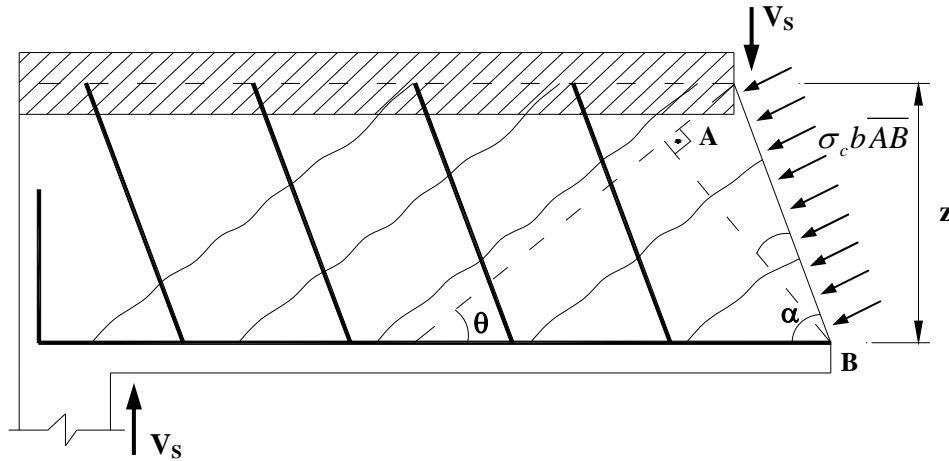


Figura 3.4 – Biela da Treliça Generalizada.

A força de compressão nas bielas de concreto, seccionando-se a viga junto a uma barra transversal (Figura 3.4) é obtida considerando-se:

$$\overline{AB} = \frac{z}{\text{sen}\alpha} \cos\psi \quad (3.5)$$

sendo

$$\psi = \alpha - \left(\frac{\pi}{2} - \theta \right) \quad (3.6)$$

logo

$$\cos\psi = \cos \left[\alpha - \left(\frac{\pi}{2} - \theta \right) \right] = \cos\alpha \text{sen}\theta + \text{sen}\alpha \cos\theta \quad (3.7)$$

Com a expressão 3.5 tem-se:

$$\overline{AB} = \frac{z}{\text{sen}\alpha} (\cos\alpha \text{sen}\theta + \text{sen}\alpha \cos\theta) = z \text{sen}\theta (\cotg\alpha + \cotg\theta) \quad (3.8)$$

Pelo equilíbrio das forças verticais ($\Sigma F_y = 0$), a força cortante resistida pela biela é dada por:

$$V_R = \sigma_c b \overline{AB} \text{sen}\theta = \sigma_c b z (\cotg\alpha + \cotg\theta) \text{sen}^2\theta \quad (3.9)$$

3.3.2. ACI – 318 (1999)

Essa norma usa uma expressão empírica para prever a resistência à força cortante de uma seção transversal de vigas de concreto armado. A parcela resistida pelo concreto é dada por:

$$V_c = \left(0,16\sqrt{f_c} + 17\rho_{sl} \frac{a}{d} \right) b_w d \leq 0,29b_w d \sqrt{f_c} \quad (3.10)$$

onde

f_c – resistência à compressão do concreto;

ρ_{sl} – taxa geométrica da armadura longitudinal;

a – distância da aplicação da força até o apoio considerado;

d – altura útil;

b_w – largura da alma da viga.

A força cortante resistida pelos estribos verticais é dada por:

$$V_s = \frac{A_{sw} f_y d}{s} \leq 0,68\sqrt{f_c} b_w d \quad (3.11)$$

onde

A_{sw} – área do estribo vertical;

s – espaçamento entre os estribos;

f_y – resistência ao escoamento da armadura transversal.

3.3.3. ACI – 440 (2001)

A capacidade nominal da força cortante de uma viga reforçada com polímero reforçado com fibras (FRP) é determinada pela adição da contribuição do reforço externo, da armadura interna e da parcela devida ao concreto:

$$V_u = \phi(V_c + V_s + \psi_f V_f) \quad (3.12)$$

onde

ϕ – fator de redução de resistência (ACI 318-99);

ψ_f – fator de redução adicional do reforço à força cortante.

Tanto a parcela resistente relativa à contribuição do concreto V_c e parcela resistida pelos estribos verticais V_s são obtidas por meio das expressões fornecidas pela norma ACI 318-99, item 3.4.

O parâmetro ψ_f da equação 3.12 é função do tipo do envolvimento e execução do reforço. Essa norma recomenda os valores da Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Fator de redução da resistência do reforço.

Tipo de execução	ψ_f
Envolvimento completo	0,95
Envolvimento em U ou somente nos lados	0,85

A contribuição do sistema de reforço com FRP está baseada na orientação das fibras e no modelo de fissuração adotado (Khalifa *et al.* 1998). A Figura 3.5 esquematiza o reforço por meio de estribos perpendiculares ao eixo da viga, ou inclinados em relação ao mesmo.

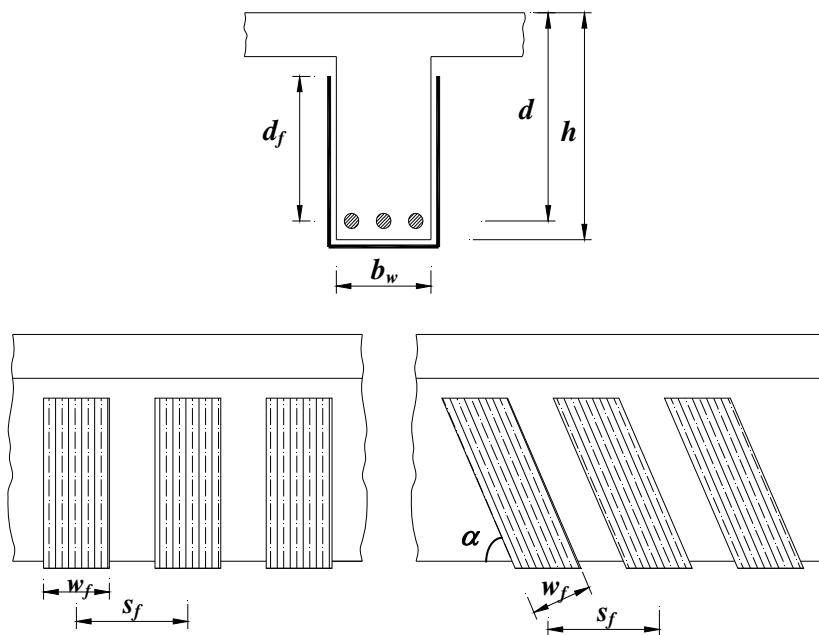


Figura 3.5 – Corte transversal e longitudinais do reforço; adaptada do ACI – 440 (2001).

A resistência à força cortante devida ao reforço é dada por:

$$V_f = \frac{A_f f_{f,e} (\operatorname{sen} \alpha + \operatorname{cos} \alpha) d_f}{s_f} \quad (3.13)$$

sendo

$$A_f = 2nt_f w_f \quad (3.14)$$

e

$$f_{f,e} = \varepsilon_{f,e} E_f \quad (3.15)$$

onde

α_f – ângulo de inclinação das tiras de reforço;

s_f – espaçamento dos estribos de FRP;

d_f – altura efetiva do FRP;

A_f – área da seção transversal do FRP;

n – número de camadas do FRP;

t_f – espessura do FRP;

w_f – largura dos estribos do FRP;

$f_{f,e}$ – tensão efetiva do FRP;

$\varepsilon_{f,e}$ – deformação específica efetiva do FRP;

E_f – módulo de elasticidade do FRP.

Por meio dos possíveis modos de ruptura e do tipo de execução do reforço é possível determinar o valor da deformação específica efetiva.

Para o caso de **envolvimento completo** da seção da viga reforçada é adotada uma deformação específica máxima de 0,4%, com o objetivo de se evitar que ocorra a perda de resistência associada à perda de engrenamento dos agregados antes da ruptura do compósito. Essa limitação é dada por:

$$\varepsilon_{f,e} = 0,004 \leq 0,75\varepsilon_{f,u} \quad (3.16)$$

Nos casos de **envolvimento em U** ou **reforço somente nos lados** da viga de concreto armado, o fenômeno que governa este tipo de execução é o descolamento, ou seja, a ruptura por aderência. A deformação específica é limitada também em 0,4%, sendo dada por:

$$\varepsilon_{f,e} = k_v \varepsilon_{f,u} \leq 0,004 \quad (3.17)$$

onde k_v é o fator de redução devido à aderência do reforço.

Esse fator de redução devido à aderência é determinado por meio da resistência à compressão do concreto, do tipo de envolvimento e da rigidez do material compósito, então:

$$\kappa_v = \frac{k_1 k_2 L_e}{11900 \varepsilon_{f,u}} \leq 0,75 \quad (3.18)$$

sendo

$$L_e = \frac{23300}{(n t_f E_f)^{0,58}} \quad (3.19)$$

onde L_e é o comprimento de aderência efetivo em *mm*, com t_f em *mm* e E_f em *MPa*.

Os fatores k_1 e k_2 são dados pelas seguintes expressões:

$$k_1 = \sqrt[3]{\left(\frac{f_c}{27}\right)^2}, \text{ com } f_c \text{ em } MPa \quad (3.20)$$

– para envolvimento em **U**:

$$k_2 = \frac{d_f - L_e}{d_f} \quad (3.21)$$

– para colagem somente nos lados:

$$k_2 = \frac{d_f - 2L_e}{d_f} \quad (3.22)$$

3.3.4. FIB – Bulletin 14 (2001)

Esta Norma se baseia em estudos que comprovam que quando uma viga de concreto atinge sua resistência última à força cortante, o material compósito é tracionado na direção da fibra até um determinado valor da deformação específica, o qual, em geral, é menor que a deformação específica última ε_{fu} , e define a deformação específica efetiva ε_{fe} . Portanto, este modelo se baseia nos estudos de Triantafyllou (1998) e Täljsten (1999a), nos quais o reforço à força cortante com FRP é analisado de maneira análoga ao do cálculo da parcela resistente do estribo de aço.

A força cortante total de projeto resistida pelo elemento estrutural reforçado, usando a nomenclatura do Eurocode 2, é dada por:

$$V_{Rd} = V_{cd} + V_{wd} + V_{fd} \quad (3.23)$$

A contribuição do reforço com FRP é ilustrada na Figura 3.6, sendo dada pela seguinte expressão com base na Treliça Generalizada:

$$V_{fd} = 0,9\varepsilon_{f,e} E_f \rho_f b_w d (\cot g \theta + \cot g \alpha) \text{sen} \alpha \quad (3.24)$$

onde

α – ângulo de inclinação das tiras de reforço;

θ – ângulo de inclinação do campo de compressão diagonal;

b_w – largura da viga;

d – altura efetiva da viga;

$\varepsilon_{fd,e}$ – deformação específica efetiva do FRP (valor de projeto);

E_f – módulo de elasticidade do FRP;

ρ_f – taxa da armadura transversal do FRP.

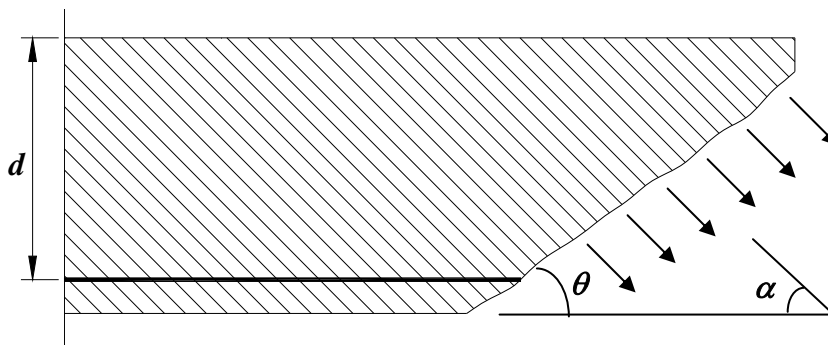


Figura 3.6 – Reforço em tecido de FRP com inclinação em relação à horizontal; adaptada da FIB – Bulletin 14 (2001).

A taxa de armadura transversal do reforço é calculada em função do tipo de colagem do mesmo sobre a viga, podendo ser dos seguintes tipos (Figura 3.7):

a) reforço por meio de colagem contínua do reforço:

$$\rho_f = \frac{2t_f \text{sen} \alpha}{b_w} \quad (3.25)$$

onde t_f é a espessura da tira de FRP.

b) reforço por meio da colagem de estribos de FRP:

$$\rho_f = \frac{2t_f b_f}{b_w s_f} \quad (3.26)$$

sendo

b_f – largura do reforço;

s_f – espaçamento entre os eixos das tiras do reforço.

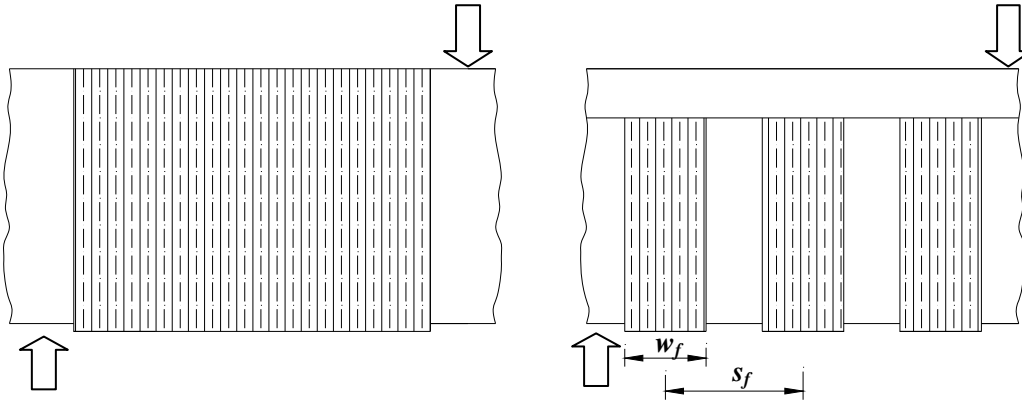


Figura 3.7 – Reforço contínuo com envolvimento completo (colagem contínua) e estribos em U; adaptada da FIB – Bulletin 14 (2001).

A deformação específica efetiva de projeto é calculada por meio da seguinte expressão:

$$\varepsilon_{fd,e} = \frac{k\varepsilon_{f,e}}{\gamma_f} \quad (3.27)$$

onde

k – fator de redução = 0,8;

γ_f – coeficiente de segurança parcial do reforço;

$\varepsilon_{f,e}$ – deformação específica efetiva do reforço.

O coeficiente de segurança está relacionado com o material utilizado (tipo de fibra) e com o controle de qualidade da aplicação do reforço (Tabela 3.2).

Tabela 3.2 – Coeficiente de segurança do compósito.

Tipo de Compósito	Aplicação do tipo A ⁽¹⁾	Aplicação do tipo B ⁽²⁾
Fibras de Carbono	1,20	1,35
Aramida	1,25	1,45
Vidro	1,30	1,50

⁽¹⁾ Alto controle de qualidade da aplicação.

⁽²⁾ Controle normal de qualidade, em locais de difícil aplicação.

Caso a ruptura da viga reforçada à força cortante ocorra por descolamento, ou seja, por ruptura de aderência do compósito, o coeficiente de segurança é dado por:

$$\gamma_f = \gamma_{fb} = 1,30 \quad (3.28)$$

Em função dos resultados experimentais advindos dos estudos de Triantafyllou e Antonopoulos (2000), concluiu-se que a deformação específica efetiva $\varepsilon_{f,e}$ é dependente do comprimento efetivo de ancoragem, sendo este função do tipo de execução do reforço (envolvimento completo, envolvimento em U ou colagem somente nos lados), e também da resistência à compressão do concreto.

Para a deformação específica efetiva do polímero reforçado com fibras (FRP) para **envolvimento completo** da seção, quando ocorre a ruptura do reforço, tem-se:

$$\varepsilon_{f,e} = 0,17 \left(\frac{f_c^{2/3}}{E_f \rho_f} \right)^{0,3} \varepsilon_{f,u} \quad (3.29)$$

onde $\varepsilon_{f,u}$ é a deformação específica última do FRP;

Quando o tipo de reforço for por meio de **envolvimento em U** ou **colagem somente nos lados**, pode ocorrer o descolamento ou a ruptura do mesmo. Para o descolamento do reforço utiliza-se a seguinte expressão para a deformação específica efetiva:

$$\varepsilon_{f,e} = 0,65 \left(\frac{f_c^{2/3}}{E_f \rho_f} \right)^{0,56} 10^{-3} \quad (3.30)$$

Para o envolvimento completo em U ou colagem somente nos lados adota-se o valor mínimo encontrado usando-se as expressões 3.29 e 3.30, cujos valores de f_c e E_f são dados em *MPa* e em *GPa*, respectivamente.

3.3.5. Modelo de Chen e Teng (2002)

Nesse modelo a resistência à força cortante de uma viga de concreto armado é dada pela contribuição do concreto V_c , pela armadura transversal V_s , e pela contribuição do reforço em FRP V_f . As parcelas V_c e V_s podem ser obtidas

diretamente das normas existentes (**ACI-318** e **Eurocode 2**), pois são na essência os modelos de treliça, clássica ou generalizada.

A colagem do reforço nesse estudo foi executada por meio de envolvimento completo da viga, envolvimento em **U**, ou com a colagem somente nos lados da viga. O esquema geral do modelo é mostrado na Figura 3.8.

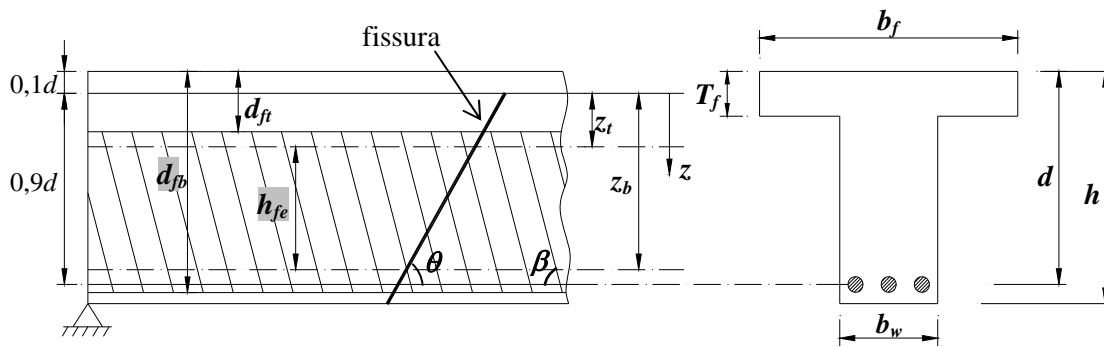


Figura 3.8 – Esquema do modelo; adaptada de Chen e Teng (2002).

A altura efetiva do reforço é dada por

$$h_{fe} = z_b - z_t \quad (3.31)$$

onde

$$z_t = (0,1d + d_{ft}) - 0,1d = d_{ft} \quad (3.32)$$

$$z_b = [d - (h - d_{fb})] - 0,1d = 0,9d - h + d_{fb} \quad (3.33)$$

Nesse modelo é enfatizado que a distribuição de tensões no CFC ao longo da fissura inclinada não é uniforme para o Estado Limite Último, tanto para a ruptura do compósito por tração, como para a ruptura por aderência do mesmo. A tensão média efetiva do reforço em FRP ao longo de uma fissura devido à força cortante é dada por:

$$f_{f,e} = D_f \sigma_{f,máx} \quad (3.34)$$

onde

$f_{f,e}$ – resistência efetiva do FRP;

D_f – fator de distribuição de tensões;

$\sigma_{f,máx}$ – tensão máxima admissível do FRP.

Para o esquema da Figura 3.8, onde a fissura devida à força cortante é inclinada de um ângulo θ em relação ao eixo longitudinal da viga, e para estribos de mesma largura e colados em ambos os lados da viga, a parcela resistente do reforço é dada por:

$$V_{d,f} = 2f_{f,e}t_f w_f \frac{h_{fe}(\cot g\theta + \cot g\beta) \text{sen}\beta}{s_f} \quad (3.35)$$

onde

t_f – espessura do reforço;

w_f – largura do reforço perpendicular à orientação da fibra de cada estribo;

s_f – espaçamento entre os estribos;

β_f – ângulo de inclinação das fibras do material compósito;

θ – ângulo de inclinação do campo de compressão.

Para o caso de reforço contínuo, como mostrado na Figura 3.9, tem-se:

$$s_{fe} = \frac{w_f}{\text{sen}\beta} \quad (3.36)$$

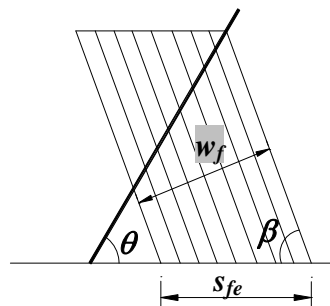


Figura 3.9 – Esquema para reforço contínuo; adaptada de Chen e Teng (2002).

Ruptura por aderência

Este tipo de ruptura ocorre nos casos em que o reforço é realizado com o **envolvimento em U** ou **em tiras coladas nos lados da viga**.

Admitindo-se que a relação entre o comprimento máximo de ancoragem $L_{máx}$ e o comprimento efetivo de ancoragem L_e é dado por:

$$\lambda = \frac{L_{máx}}{L_e} \quad (3.37)$$

onde

$$L_e = \sqrt{\frac{E_f t_f}{\sqrt{f_c}}}, \text{ com } E_f \text{ e } f_c \text{ em MPa e } t_f \text{ em mm} \quad (3.38)$$

com

t_f – espessura do FRP;

E_f – módulo de elasticidade do FRP;

f_c – resistência à compressão do concreto.

Para envolvimento em U o comprimento máximo de ancoragem é dado por:

$$L_{m\acute{a}x} = \frac{h_{fe}}{\text{sen}\beta} \quad (3.39)$$

Para a colagem somente nos lados da viga tem-se:

$$L_{m\acute{a}x} = \frac{h_{fe}}{2\text{sen}\beta} \quad (3.40)$$

O fator de distribuição de tensões para este tipo de ruptura é função do parâmetro λ .

Para $\lambda \leq 1$ tem-se:

$$D_f = \frac{2}{\pi\lambda} \frac{1 - \cos\left(\frac{\pi}{2}\right)\lambda}{\text{sen}\left(\frac{\pi}{2}\right)\lambda} \quad (3.41)$$

Para $\lambda > 1$ tem-se:

$$D_f = 1 - \frac{\pi - 2}{\pi\lambda} \quad (3.42)$$

Para o dimensionamento a tensão máxima do reforço é limitada pela resistência última de aderência proposta por Chen e Teng (2002) e pela tensão última do compósito, sendo:

$$\sigma_{f,m\acute{a}x} = \text{mín} \left[\frac{f_f}{\gamma_f}; \frac{0,427}{\gamma_{fb}} \beta_w \beta_L \sqrt{\frac{E_f \sqrt{f_c}}{t_f}} \right] \quad (3.43)$$

onde

f_f – tensão de ruptura do FRP à tração;

γ_f – coeficiente de segurança à tração do FRP ($\gamma_f = 1,25$);

$\gamma_{f,b}$ – coeficiente de segurança de aderência do FRP ($\gamma_{f,b} = 1,25$).

O coeficiente β_w representa o coeficiente que relaciona a largura do reforço ao concreto, sendo dado por:

$$\beta_w = \sqrt{\frac{2 - \frac{w_f}{s_{fe} \text{sen} \beta}}{1 + \frac{w_f}{s_{fe} \text{sen} \beta}}} \quad (3.44)$$

onde para o reforço contínuo tem-se

$$\beta_w = \frac{\sqrt{2}}{2} \quad (3.45)$$

e β_L representa o efeito do comprimento de ancoragem do reforço.

Sendo $\lambda < 1$ tem-se:

$$\beta_L = \text{sen} \left(\frac{\pi \lambda}{2} \right) \quad (3.46)$$

e para $\lambda \geq 1$ resulta

$$\beta_L = 1 \quad (3.47)$$

Ruptura do reforço

Esse tipo de ruptura governa o caso em que o reforço é realizado com o envolvimento completo da seção da viga, ou para envolvimento em U desde que este último seja ancorado de maneira adequada em suas extremidades.

O fator de distribuição de tensões para esse caso é dado por:

$$D_f = \frac{1 + \zeta}{2} \quad (3.48)$$

onde

$$\zeta = \frac{z_t}{z_b} \quad (3.49)$$

A tensão máxima do reforço pode ser obtida por meio das seguintes expressões:

– para:

$$\frac{f_f}{E_f} \leq \varepsilon_{f,u} \quad (3.50)$$

então

$$\sigma_{f,máx} = \frac{f_f}{\gamma_f} \quad (3.51)$$

– para:

$$\frac{f_f}{E_f} > \varepsilon_{f,u} \quad (3.52)$$

então

$$\sigma_{f,máx} = \varepsilon_{f,u} \frac{E_f}{\gamma_f} \quad (3.53)$$

3.3.6. Modelo de Khalifa e Nanni (2002)

Esse modelo adota dois modos de ruptura para o cálculo da parcela resistente do reforço com compósitos de fibras de carbono (CFC): ruptura por tração ou ruptura por aderência. O esquema para o reforço com estribos externos verticais ou inclinados é mostrado na Figura 3.13.

A contribuição da parcela referente ao reforço com CFC é dada por:

$$V_f = \frac{A_f (f_{f,e} / \gamma_f) (0,9d_f) (1 + \cot g\beta) \text{sen}\beta}{s_f} \quad (3.54)$$

sendo

$$A_f = 2t_f w_f \quad (3.55)$$

onde

β – ângulo de inclinação do reforço;

s_f – espaçamento do reforço;

A_f – área da seção transversal do reforço;

t_f – espessura do reforço;

w_f – largura dos estribos do reforço;

$f_{f,e}$ – tensão efetiva do reforço;

d_f – altura útil do reforço.

O valor da tensão efetiva do CFC é dado por:

$$f_{f,e} = Rf_{f,u} \quad (3.56)$$

onde

R – coeficiente de redução de resistência do reforço;

$f_{f,u}$ – tensão última do reforço.

O coeficiente de redução de resistência é calculado em função dos modos de ruptura do reforço. Um limite superior deste coeficiente é estabelecido com o objetivo de se controlar a perda de resistência associada à abertura da fissura, que leva à diminuição da contribuição do engrenamento dos agregados.

Ruptura do reforço

Baseado nos ensaios executados em vigas com o rompimento do reforço, Khalifa *et al.* (1998) propõem a seguinte formulação para o cálculo do coeficiente de redução de resistência:

$$R = 0,56(\rho_f E_f)^2 - 1,22(\rho_f E_f) + 0,78 \quad (3.57)$$

sendo

$$\rho_f E_f \leq 0,7 \text{ GPa} \quad (3.58)$$

com

$$\rho_f = \frac{2t_f w_f}{b_w s_f} \quad (3.59)$$

onde

ρ_f – taxa do reforço à força cortante;

b_w – tensão efetiva do reforço;

E_f – módulo de elasticidade do reforço.

Sendo o modo de execução com **envolvimento completo** ou com **envolvimento em U, com uma efetiva ancoragem da extremidade do reforço**, o valor de R encontrado para este modo de ruptura deve ser comparado com o limite superior do coeficiente de redução dado por:

$$R = \frac{0,006}{\varepsilon_{f,u}} \quad (3.60)$$

onde

$\varepsilon_{f,u}$ – deformação específica última do reforço.

Adota-se para os tipos de execução mencionados no parágrafo anterior, o menor dos dois valores calculados pelas expressões 3.57 e 3.60.

Ruptura por aderência

Para este modo de ruptura o modelo baseia-se na determinação do comprimento de ancoragem efetivo e na rigidez axial do reforço $t_f E_f$.

O comprimento de ancoragem L_e foi estudado por Miller (1999), sendo adotado um valor de 75 mm por esse pesquisador.

A expressão para o coeficiente de redução para esse modo de ruptura escreve-se:

$$R = \frac{\sqrt[3]{f_c^2} w_{f,e}}{\varepsilon_{f,u} d_f} [738,93 - 4,06(t_f E_f)] 10^{-6} \quad (3.61)$$

sendo

$$20 \text{ mmGPa} \leq t_f E_f \leq 90 \text{ mmGPa} \quad (3.62)$$

onde

f_c – resistência à compressão do concreto;

$w_{f,e}$ – largura efetiva do reforço.

A parcela da força cortante resistida pelo reforço em CFC, admitindo-se as bielas inclinadas a 45°, depende da configuração do mesmo:

a) **para envolvimento em U:**

$$w_{f,e} = d_f - L_e \quad (3.63)$$

b) **para colagem somente nos lados da viga:**

$$w_{f,e} = d_f - 2L_e \quad (3.64)$$

onde d_f é a altura efetiva do reforço.

Para envolvimento completo da seção tem-se:

$$w_{f,e} = w_f \quad (3.65)$$

O valor do coeficiente de redução para esse modo de ruptura (expressão 3.61) deve ser comparado com os valores calculados pelas expressões 3.57 e 3.60 adotando-se o menor deles.

3.3.7. NBR – 6118 (2003)

Esta norma apresenta dois modelos de cálculo possíveis para a determinação da resistência à força cortante em vigas de concreto armado, o da treliça clássica modificada e a treliça generalizada. No primeiro, denominado Modelo de Cálculo I, o ângulo da diagonal comprimida de concreto é igual a 45° e a contribuição do concreto V_c , é considerada constante. Já para o Modelo de Cálculo II, a inclinação da diagonal comprimida (biela de concreto) pode variar entre 30° e 45°.

Para a determinação da parcela V_c considera-se o Modelo de Cálculo I na flexão simples, sendo:

$$V_c = V_{c0} = 0,6 f_{ctd} b_w d \quad (3.66)$$

com

$$f_{ctd} = \frac{f_{ctk,inf}}{\gamma_c} = \frac{0,7 f_{ctm}}{\gamma_c} = \frac{0,7 \times 0,3}{\gamma_c} \sqrt[3]{f_{ck}^2} \quad (3.67)$$

onde

f_{ck} – resistência característica à compressão do concreto;

γ_c – coeficiente de segurança do concreto;

d – altura útil;

b_w – largura da alma da viga.

Considerando-se os estribos de aço com inclinação de 90° em relação a horizontal tem-se:

$$V_{sw} = \frac{A_{sw} f_{yk} 0,9d}{s} \quad (3.68)$$

onde

A_{sw} – área do estribo vertical;

s – espaçamento entre os estribos;

f_{yk} – tensão de escoamento da armadura transversal característica.

A condição do elemento estrutural solicitado à força cortante é satisfatória quando verificados os estados limites últimos, atendidas simultaneamente as duas condições seguintes:

$$V_{Sd} \leq V_{Rd2} \quad (3.69)$$

$$V_{Sd} \leq V_{Rd3} = V_c + V_{sw} \quad (3.70)$$

onde

V_{Sd} – força cortante solicitante de cálculo da seção;

V_{Rd2} – força cortante resistente de cálculo, relativa à ruína das diagonais comprimidas de concreto;

V_{Rd3} – força cortante resistente de cálculo, relativa à ruína por tração diagonal.

A verificação da compressão diagonal do concreto (bielas de compressão) é feita por meio da seguinte expressão:

$$V_{Rd2} = 0,27\alpha_v b_w d \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (3.71)$$

com

$$\alpha_v = 1 - \frac{f_{ck}}{250} \quad (3.72)$$

3.3.8. Modelo de Colloti et al. (2004)

Esse modelo considera os diversos tipos de mecanismos de ruptura das vigas reforçadas à força cortante, incluindo-se o modo de ruptura devido ao descolamento do reforço.

Sendo o CFC um material elástico linear a contribuição do reforço depende da sua deformação específica na vizinhança da fissura. Os resultados experimentais mostram que a deformação específica não é uniforme, mas varia ao longo da fissura, e o deslocamento local do reforço pode ocorrer próximo à mesma. Dependendo do comprimento de ancoragem do reforço pode ocorrer ruptura por aderência do mesmo. A contribuição do reforço deve ser limitada a uma deformação específica efetiva à tração do CFC, a qual é menor que a deformação específica última desse material.

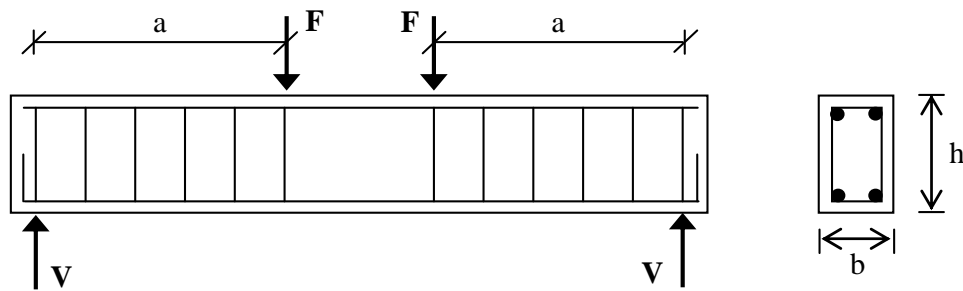


Figura 3.10 – Esquema das vigas modeladas; adaptada de Colloti *et al.* (2004).

Para a viga simplesmente apoiada solicitada por duas forças concentradas (Figura 3.10), são admitidas as seguintes hipóteses para a formulação do modelo:

1) a força cortante V origina uma tensão transversal média ao longo da alma da viga:

$$\tau = \frac{V}{bd_v} \quad (3.73)$$

onde b é a largura e d_v é altura útil da viga.

2) os estribos internos verticais de aço têm um espaçamento uniforme s , e estão sujeitos a uma tensão equivalente dada por:

$$\sigma_s = \rho_{sw} f_y \quad (3.74)$$

A taxa geométrica da armadura transversal de aço é dada por:

$$\rho_{sw} = \frac{A_{sw}}{bs} \quad (3.75)$$

onde

A_{sw} – área armadura transversal de aço;

f_y – tensão de tração no aço.

3) após a fissuração desenvolve-se um campo de tensões, consistindo-se de uma compressão uniaxial σ_c inclinada de um ângulo θ com relação ao eixo horizontal.

4) a resistência do concreto comprimido é dada por:

$$f_c = v_c f'_c \quad (3.76)$$

onde

f'_c – resistência obtida em corpos-de-prova padronizados;

v_c – fator de efetividade do concreto.

Assumindo-se que a eficácia do reforço externo à força cortante pode ser avaliada de uma maneira similar à adotada para os estribos internos de aço, a taxa mecânica de armadura total para resistir essa força é dada por:

$$\psi = \psi_i + \psi_e \quad (3.77)$$

com

$$\psi_i = \frac{A_{sw} f_y}{b s f_c} \quad (3.78)$$

onde

ψ_i – taxa mecânica de armadura interna;

ψ_e – taxa mecânica do reforço em CFC.

Ruptura por aderência

A Figura 3.11 mostra a força vertical F_b do reforço em forma de estribos verticais para resistir à força cortante.

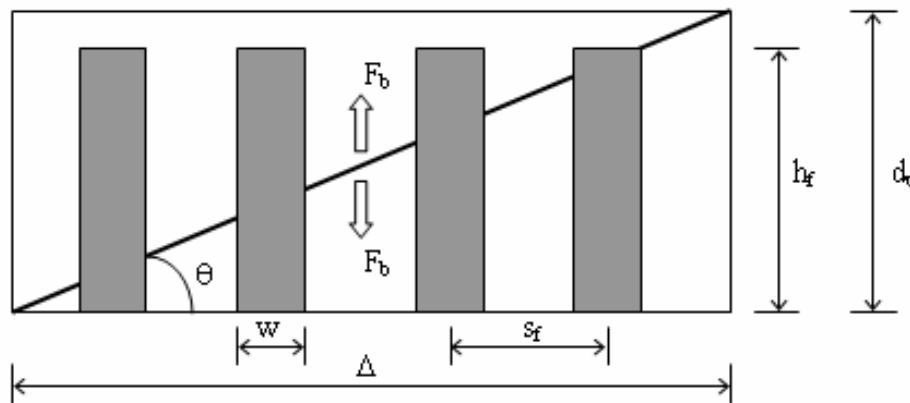


Figura 3.11 – Esquema para avaliação da aderência de estribos externos; adaptada de Coloti *et al.* (2004).

Sendo:

$$\Delta = d_v \cot g \theta \quad (3.79)$$

$$A_b = 2 n_l w_f h_f = 2 \left(\frac{\Delta}{s_f} \right) w_f h_f \quad (3.80)$$

onde

A_b – área do reforço externo colado ao concreto;

w_f – largura do estribo externo;

h_f – altura do estribo externo;

s_f – espaçamento do estribo externo.

A força a ser transmitida por aderência é dada por:

$$F_b = \frac{A_b \tau_f}{2} = 2 \left(\frac{\Delta}{2s_f} \right) w_f h_f \tau_u \quad (3.81)$$

onde τ_u é a tensão última de aderência entre o CFC e o concreto.

A força distribuída por unidade de comprimento é dada por:

$$p_b = \frac{F_b}{\Delta} = \left(\frac{w_f h_f}{s_f} \right) \tau_u \quad (3.82)$$

Essa pesquisa adotada uma expressão empírica para a tensão de aderência CFC-Concreto, obtida por Swamy *et al.* (1986):

$$\tau_u = 2,77 + 0,06(f'_c - 20) \quad (3.83)$$

para

$$f'_c > 20 \text{ MPa} \quad (3.84)$$

Ruptura do reforço

Nesse caso a ruptura à força cortante é governada pela ruptura dos estribos, e o mecanismo de resistência do reforço externo é análogo aos estribos de aço internos de aço. Os resultados de diversos experimentos encontrados na literatura mostram que a ruptura dos estribos de CFC geralmente ocorre para uma tensão média menor que a resistência nominal do material, devido à concentração de tensões, por exemplo, nas quinas. A contribuição do reforço à força cortante por unidade de comprimento é dada por:

$$p_f = \frac{A_f f_{f,e}}{s_f} = \frac{2t_f w_f V_f f_{f,u}}{s_f} \quad (3.85)$$

onde

A_f – área do reforço externo à força cortante;

t_f – espessura do CFC;

$f_{f,e}$ – resistência efetiva do CFC;

$f_{f,u}$ – resistência nominal última do CFC;

ν_f – fator de efetividade do reforço.

Considerando-se esses dois modos de ruptura para o reforço tem-se:

1) para estribos em **U**:

$$\psi_e = \min \left[\frac{P_b}{bf_c}; \frac{P_f}{bf_c} \right] \quad (3.86)$$

$$\psi = \psi_i + \psi_e = \frac{A_{sw}f_y}{bsf_c} + \min \left[\frac{w_f h_f \tau_u}{bs_f f_c}; \frac{2w_f t_f f_{f,e}}{bs_f f_c} \right] \quad (3.87)$$

2) para o reforço envolvendo totalmente a seção:

$$\psi_e = \frac{P_f}{bf_c} \quad (3.88)$$

$$\psi = \psi_i + \psi_e = \frac{A_{sw}f_y}{bsf_c} + \frac{2w_f t_f f_{f,e}}{bs_f f_c} \quad (3.89)$$

Definindo-se os seguintes parâmetros:

$$\eta = \frac{A_{sw}f_y}{bd_v f_c} \quad (3.90)$$

$$\alpha = \frac{a}{d_v} \quad (3.91)$$

As seguintes relações são funções dos modos de ruptura da viga (Nielsen, 1984):

a) esmagamento da biela de concreto e/ou do escoamento dos estribos:

– para:

$$0 \leq \psi \leq \psi_0 = \frac{\sqrt{1+\alpha^2} - \alpha}{2\sqrt{1+\alpha^2}} \quad (3.92)$$

$$\frac{\tau}{f_c} = \frac{\sqrt{1+\alpha^2} - \alpha}{2} + \psi\alpha \quad (3.93)$$

– para:

$$\psi_0 \leq \psi \leq 0,5 \quad (3.94)$$

$$\frac{\tau}{f_c} = \sqrt{\psi(1-\psi)} \quad (3.95)$$

– para:

$$\psi \geq 0,5 \quad (3.96)$$

$$\frac{\tau}{f_c} = 0,5 \quad (3.97)$$

b) modo de ruptura relacionado ao esmagamento da biela de concreto e/ou do escoamento da armadura longitudinal:

– para:

$$\psi \leq \psi_0 \quad (3.98)$$

$$\frac{\tau}{f_c} = \frac{\sqrt{4\eta(1-\eta^2) + \alpha^2} - \alpha}{2} \quad (3.99)$$

$$\eta \leq 0,5 \quad (3.100)$$

ou

$$\frac{\tau}{f_c} = \frac{\sqrt{1 + \alpha^2} - \alpha}{2} \quad (3.101)$$

$$\eta > 0,5 \quad (3.102)$$

– para:

$$\psi > \psi_0 \quad (3.103)$$

$$\frac{\tau}{f_c} = \psi \left(\sqrt{\frac{2\eta}{\psi} + \alpha^2} - \alpha \right) \quad (3.104)$$

c) modo de ruptura relacionado à resistência das barras longitudinais e/ou ao esmagamento da seção de concreto (ruptura à flexão):

$$\frac{\tau}{f_c} = \frac{M_u}{abd_v f_c} \quad (3.105)$$

Com o menor dos três valores de τ acima determinados, tem-se a força cortante resistida pela viga por meio da expressão 3.73.

3.3.9. Modelo Cinemático

Este modelo obedece às hipóteses do estudo de Hoang e Nielsen (1998) que desenvolveram um modelo cinemático da Teoria da Plasticidade (*upper-bound*) para a análise de vigas de concreto armado solicitadas à força cortante, sendo complementado por Sánchez et al. (2006), que apresentaram condições suplementares de modo a calcular a força cortante última de vigas reforçadas com estribos de CFC.

Hoang e Nielsen (1998) propuseram inicialmente em suas análises que a ruptura à força cortante ocorre de dois modos: a) compressão da biela de concreto da alma da viga; b) o desenvolvimento da fissura inclinada devido à força cortante. Sendo a armadura transversal de grande magnitude, a ruptura ocorre por esmagamento da biela de concreto. E para vigas com baixa taxa de armadura transversal ou sem essa armadura, a resistência à força cortante é determinada pelo modelo da fissura deslizante (*cracking sliding model*).

O estudo da resistência da biela comprimida é realizado considerando-se um campo de tensões estaticamente admissível na alma da viga. Neste modelo o concreto é admitido sob um estado uniaxial de tensão de compressão σ_c , inclinada de um ângulo θ com o eixo longitudinal da viga, e com a armadura longitudinal de flexão resistindo à componente longitudinal dessa tensão, cuja componente vertical é resistida pelos estribos verticais (Figura 3.12).

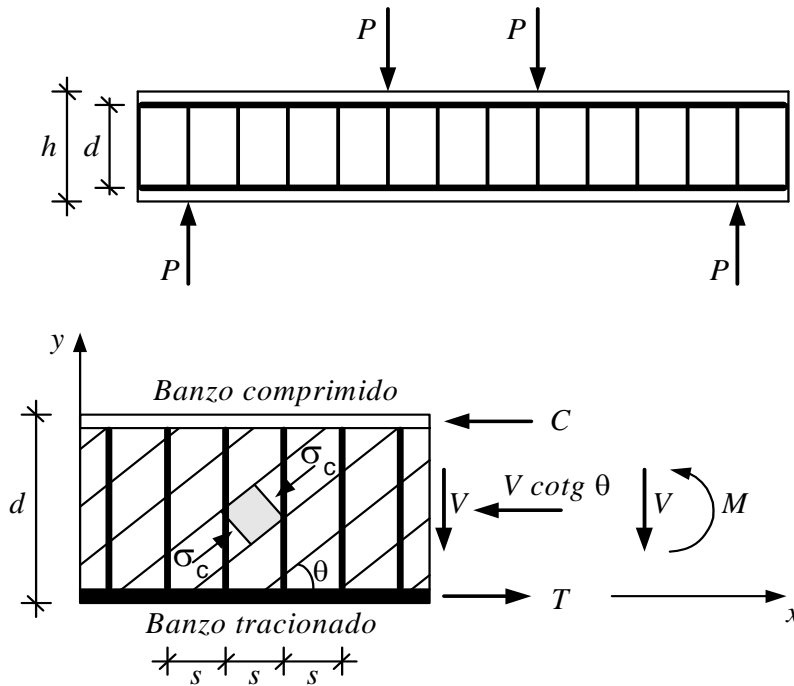


Figura 3.12 – Campo de compressão diagonal na biela de concreto; adaptada de Hoang e Nielsen (1998).

Este modelo assume que a taxa de armadura longitudinal é elevada, e que a ruptura ocorrerá após o aço dos estribos atingirem o escoamento, sendo as vigas sub-dimensionadas transversalmente.

A ruptura da biela ocorre quando se atinge uma compressão efetiva $\nu_0 f_c$, sendo f_c a resistência à compressão do concreto, e ν_0 é o fator de efetividade do concreto.

Sendo ω a taxa mecânica da armadura transversal (estribos), a tensão tangencial máxima é pode ser expressa por:

– para:

$$\omega \leq \frac{\nu_0}{2} \tag{3.106}$$

$$\frac{\tau}{\nu_0 f_c} = \sqrt{\frac{\omega}{\nu_0} \left(1 - \frac{\omega}{\nu_0} \right)} \tag{3.107}$$

– para:

$$\omega > \frac{\nu_0}{2} \tag{3.108}$$

$$\frac{\tau}{v_0 f_c} = 0,5 \tag{3.109}$$

E o ângulo da biela comprimida é expresso pela seguinte equação:

$$\operatorname{tg} \theta = \sqrt{\frac{\omega}{1-\omega}} \leq 1 \tag{3.110}$$

O fator de efetividade do concreto é dado por:

$$v_0 = \frac{0,88}{\sqrt{f_c}} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{h}} \right) (1 + 26\rho_{sl}) \tag{3.111}$$

onde

$$\rho_{sl} = \frac{A_{sl}}{b_w d} \tag{3.112}$$

A Figura 3.31 apresenta os esquemas que originaram os cálculos da resistência à força cortante pelo modelo da fissura deslizante, que foram obtidas com base nas condições de compatibilidade e critérios de plastificação e ruptura dos materiais, e formam uma solução cinemática da Teoria da Plasticidade para vigas de concreto armado.

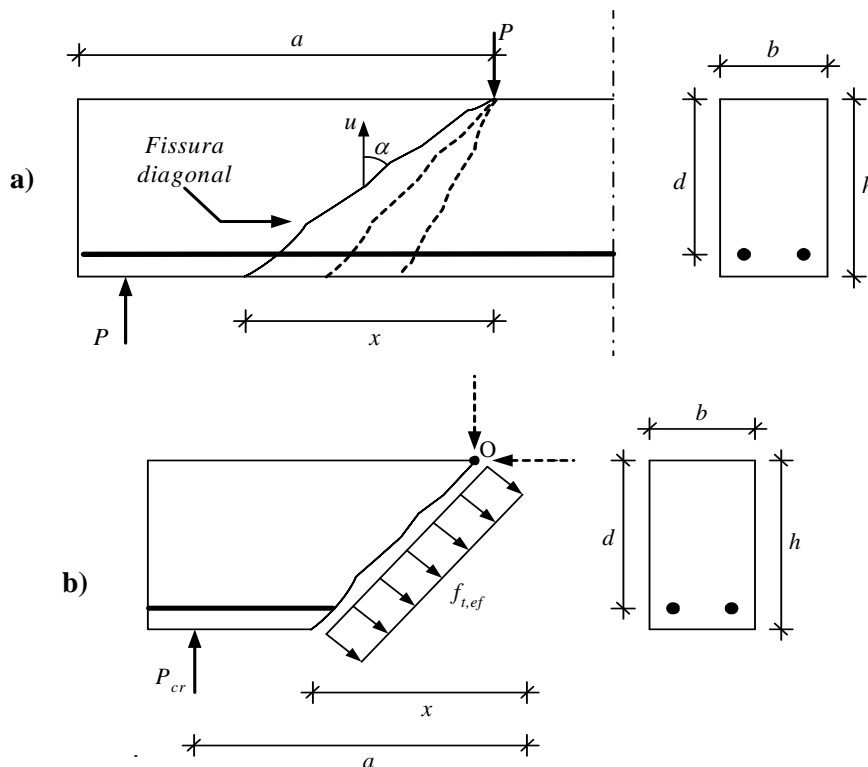


Figura 3.13 – Modelo da fissura deslizante: a) fissura diagonal; b) distribuição de tensão na formação da fissura; adaptada de Hoang e Nielsen (1998).

Sánchez *et al.* (2006) propõem a inserção no modelo cinemático de uma parcela adicional para o cálculo da resistência à força cortante de vigas de concreto armado que é a parcela referente aos estribos de CFC (Figura 3.14).

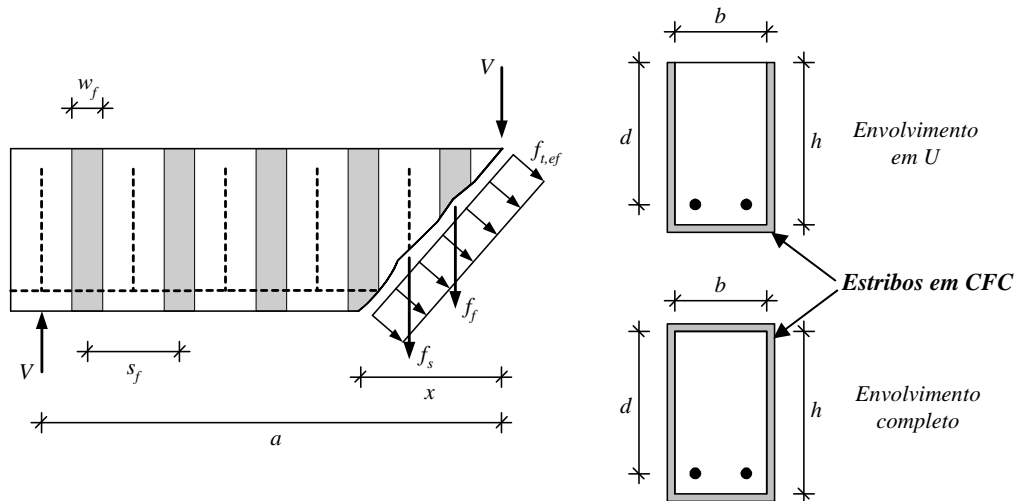


Figura 3.14 – Esquema do modelo da fissura deslizante para vigas de concreto armado reforçadas com estribos em CFC; adaptada de Sánchez *et al.* (2006).

A taxa mecânica da armadura transversal da viga é admitida como a soma de dois termos referentes ao aço e o CFC:

$$\omega = \omega_{sw} + \omega_{fw} \tag{3.113}$$

sendo:

$$\omega_{sw} = \frac{A_{sw}}{b_w d} \frac{f_{yw}}{f_c} \tag{3.114}$$

$$\omega_{fw} = \frac{2t_f w_f \text{sen } \beta}{b_w s_f} \frac{f_{f,e}}{f_c} \tag{3.115}$$

Para o cálculo da tensão efetiva do CFC $f_{f,e}$ foi adotado o modelo de Chen e Teng (2002), apresentado no item 3.11, cuja hipótese está baseada na existência de aderência entre o estribo de CFC e o concreto.

A tensão tangencial última normalizada é dada por:

$$\frac{\tau_u}{\tau_c} = 11,64 \sqrt{\frac{(\omega_{sw} + \omega_{fw})}{v_0}} \tag{3.116}$$

onde

$$\tau_c = 0,059\nu_0 f_c \quad (3.117)$$

A solução cinemática proposta para a resistência última à força cortante de uma viga com estribos regularmente espaçados pode ser expressa da seguinte forma:

– para:

$$\frac{(\omega_{sw} + \omega_{fw})}{\nu_0} \leq 0,21 \quad (3.118)$$

$$\frac{\tau_u}{\tau_c} = 11,64 \sqrt{\frac{(\omega_{sw} + \omega_{fw})}{\nu_0}} - \frac{16,95}{\nu_0 h} (\omega_{sw} s + \omega_{fw} s_f) \quad (3.119)$$

– para:

$$\frac{(\omega_{sw} + \omega_{fw})}{\nu_0} > 0,21 \quad (3.120)$$

$$\frac{\tau_u}{\tau_c} = 2,67 + \frac{16,95}{\nu_0} \left[\omega_{sw} \left(0,75 - \frac{s}{h} \right) + \omega_{fw} \left(0,75 - \frac{s_f}{h} \right) \right] \quad (3.121)$$

O ângulo teórico θ_{CIN} pode ser expresso utilizando-se a seguinte relação:

$$tg \theta_{CIN} = \frac{h}{x} \quad (3.122)$$

onde

h – altura da viga;

x – projeção horizontal da fissura diagonal.

Segundo Hoang e Nielsen (1998) para vigas com estribos verticais a distância x é determinada por meio da expressão:

$$\frac{x}{h} = \sqrt{\frac{2\tau_c}{\omega f_c}} \quad (3.123)$$

Adaptando-se as expressões 3.107 e 3.116, tem-se:

$$tg \theta_{CIN} = \left[\frac{2\tau_c}{(\omega_{sw} + \omega_{fw}) f_c} \right]^{-0,5} \quad (3.124)$$

onde θ_{CIN} é o ângulo de inclinação da linha de plastificação (*yield line*) assumida igual ao ângulo de inclinação da fissura.

3.4. Estudos Teóricos e Experimentais

3.4.1. Estudo de Kani (1964)

Segundo os estudos experimentais desenvolvidos por Kani (1964), o modo de ruptura de uma viga solicitada à flexão simples está condicionado à relação a/d , onde:

a – distância da aplicação da força até o apoio considerado;

d – altura útil.

Conforme a variação da aplicação da força F (Figura 3.15) esse estudo mostra que para valores de a/d acima de 5,0, a ruptura da viga ocorre por flexão. Para $a/d \leq 1,0$ a ruptura está associada ao desenvolvimento de uma fissura diagonal próxima ao apoio.

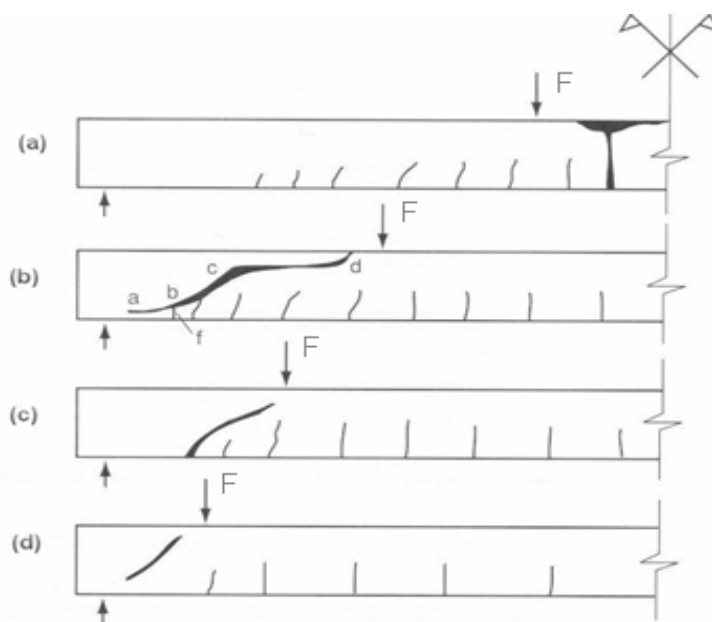


Figura 3.15 – Variação da posição da força concentrada; adaptada de Kani (1964).

Na figura 3.16 se constata a existência de um determinado intervalo de valores de a/d em que a capacidade resistente é influenciada pela força cortante dentro de uma região em que o momento correspondente à ruptura por cortante, M_{CR} , é inferior ao momento fletor resistente da viga, M_{FL} .

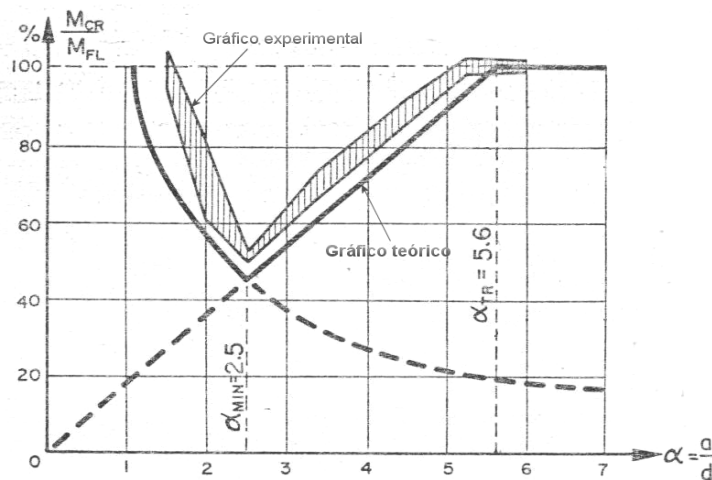


Figura 3.16 – Vale de ruptura por tração diagonal; adaptada de Kani (1964).

O intervalo de valores da relação a/d , em que o comportamento é influenciado pela presença do cortante, é designado “*Vale de Ruptura por Tração Diagonal*” (Figura 3.16). Para valores de a/d fora desta faixa, o comportamento é regido pela flexão (Garcia, 2002).

Kani (1964) concluiu também, que quanto maior é a porcentagem de armadura longitudinal, maior é a probabilidade de uma ruptura regida pelo cortante, já que o incremento desta armadura origina um aumento da resistência à flexão superior ao da resistência ao cortante.

3.4.2. Estudo de Khalifa et al. (1999)

Para aumentar resistência à força cortante de vigas de concreto armado de seções **T**, utiliza-se o reforço com CFC aplicado nos lados da seção na forma de **U**, formando estribos com fibras perpendiculares ao eixo longitudinal da viga. Nesse caso deve-se garantir a ancoragem da extremidade da força de tração desses estribos, pois o comprimento de ancoragem é por vezes insuficiente para garantir que não ocorra a ruptura por aderência, ou seja, de modo que o estribo de CFC seja efetivo na resistência. Esta situação é mais crítica em regiões de momento fletor negativo, pois as fissuras inclinadas desenvolvem-se na parte superior da viga, onde se tem um menor comprimento de ancoragem junto às mesas da seção **T**, levando ao rompimento prematuro (por aderência) do reforço estrutural.

No caso da ancoragem mecânica dos estribos em U, observa-se que a ancoragem aumenta a resistência à força cortante em 20% em relação àquelas vigas ensaiadas sem ancoragem na extremidade (Sato *et al.*, 1997a).

Esse tipo de ancoragem ocorre por meio da fixação da extremidade, ou próximo a essa, do CFC no interior do concreto. A Figura 3.17 mostra três configurações usadas para a ancoragem do reforço: a) distante do canto (em uma superfície plana); b) após o canto; c) antes do canto.

As aplicações típicas dessas ancoragens são mostradas na Figura 3.18.

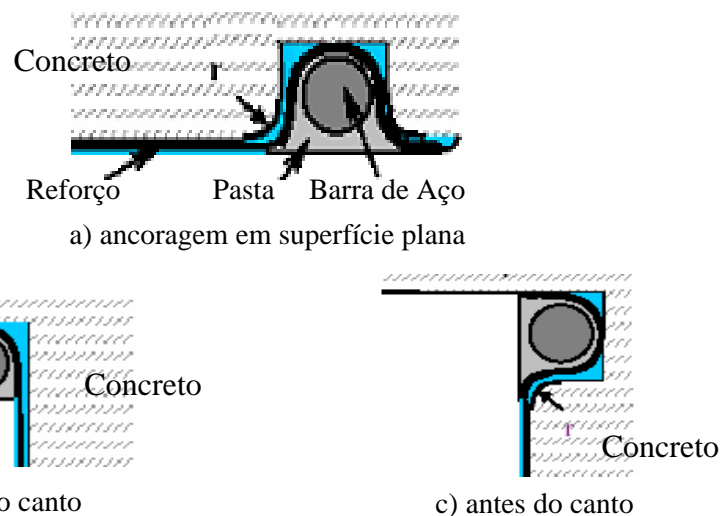


Figura 3.17 – Diferentes esquemas da ancoragem; adaptada de Khalifa *et al.* (1999).

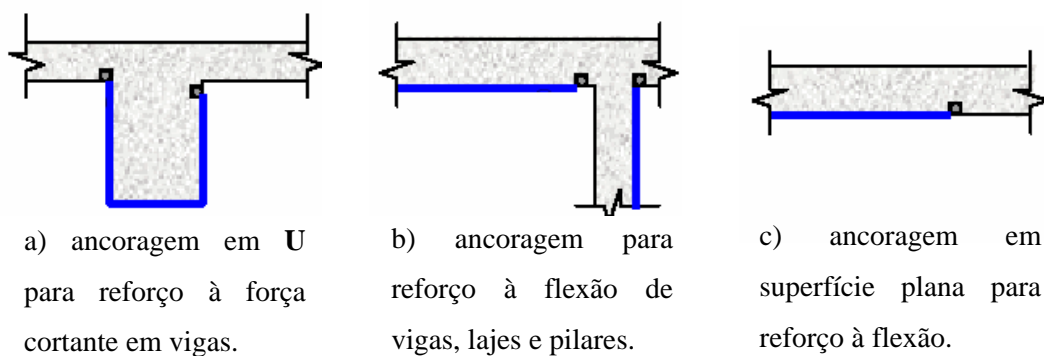


Figura 3.18 – Posicionamento dos sistemas de ancoragem; adaptada de Khalifa *et al.* (1999).

Neste trabalho a ancoragem do reforço em CFC foi obtida por meio da abertura de sulcos no concreto perpendiculares à direção longitudinal da viga, próximos ao extremo das fibras de carbono. O rasgo foi executado utilizando-se

ferramentas e métodos convencionais, sendo o diâmetro recomendado da barra de aço é de 10 mm , e a dimensão do sulco pode ser de 1,5 vezes esse diâmetro.

Esses autores ensaiaram e analisaram três vigas de concreto armado simplesmente apoiadas. Os detalhes das vigas e suas dimensões são mostrados na Figura 3.19. A viga BT1 foi a viga de referência, na qual não se usou reforço. As vigas BT2 e BT3 foram reforçadas usando-se tecido de CFC aderidos em suas superfícies na forma de estribos em U, porém, a viga BT3 teve o seu reforço ancorado em ambos os lados da mesa da seção T, no flange da mesa. A viga BT2 não teve nenhuma ancoragem. Os esquemas das vigas ensaiadas, com a instalação dos LVDT e dos extensômetros elétricos de resistência (EER) são mostrados na Figura 3.20. A espessura da camada de CFC foi de $0,165\text{ mm}$ e as taxas de armadura de aço transversal interna e longitudinal são dadas, respectivamente, por: $\rho_{sw} = 1,05\%$ e $\rho_{sl} = 2,25\%$.

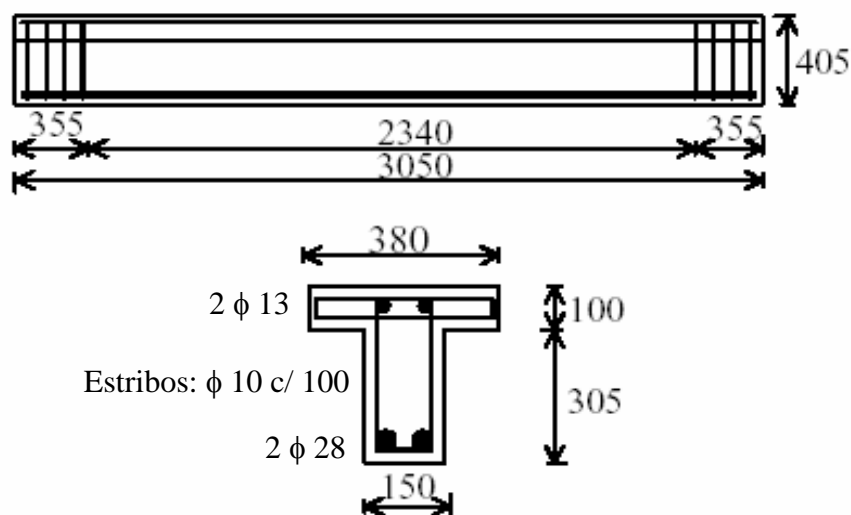


Figura 3.19 – Dimensões e detalhamento das vigas (dimensões em mm); adaptada de Khalifa *et al.* (1999).

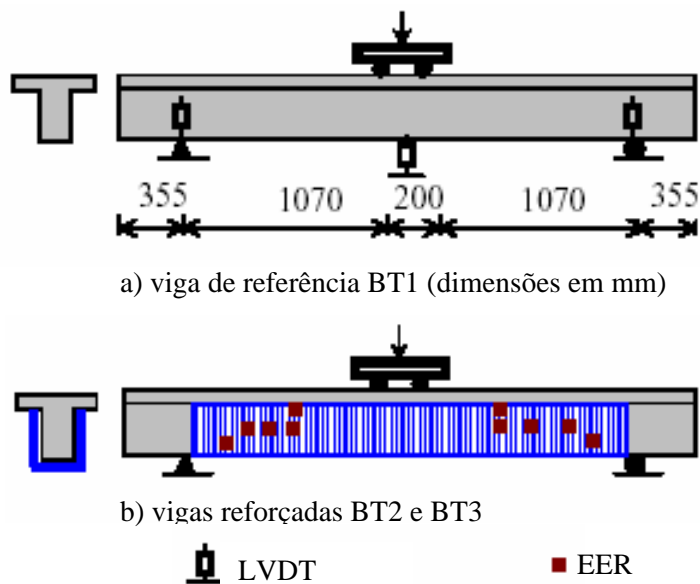


Figura 3.20 – Esquemas das vigas ensaiadas e da instalação dos LVDT e dos EER; adaptada de Khalifa *et al.* (1999).

A viga BT1 apresentou a primeira fissura diagonal para a força aplicada de 110 kN, e o rompimento da mesma ocorreu para uma força de 180 kN.

Na viga BT2 a ruptura devido à força cortante se iniciou com o descolamento do CFC situado sobre a fissura principal, que surgiu no mesmo local observado na viga BT1. Em seguida ocorreu a ruptura da biela de compressão para uma força de 310 kN. A deformação específica máxima da fibra foi da ordem de 4,5‰, a qual corresponde a 28% da deformação específica última do CFC.

Na viga BT3 o modo de ruptura mudou de compressão da biela (como observado na viga BT2) para o modo de ruptura à flexão. A deformação específica máxima na fibra foi da ordem de 6,3‰, ou seja, 40% da deformação específica última. Não ocorreu descolamento do reforço nesta viga quando da ruptura. Após o rompimento à flexão o CFC rompeu-se no extremo da fissura próxima ao apoio.

A força última para a viga BT3 foi de 442 kN, com aumentos de 145% e 42% a mais em relação às vigas BT1 e BT2, respectivamente. As deformações específicas lidas pelos EER e as flechas das três vigas são mostrados nas Figuras 3.21 e 3.22, respectivamente. O gráfico da Figura 3.22 mostra que a viga BT3 ganhou mais rigidez e ductilidade do que a viga BT2. A flecha no meio do vão da

viga BT3, quando da ruptura, foi aproximadamente três vezes maior que a flecha da viga BT2.

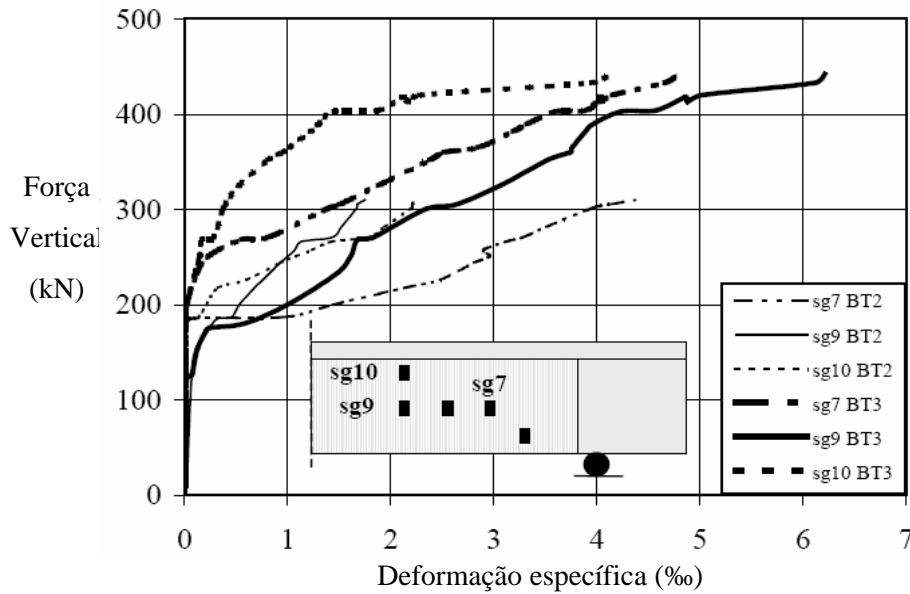


Figura 3.21 –Gráfico força x deformação específica para as vigas BT2 e BT3; adaptada de Khalifa *et al.* (1999).

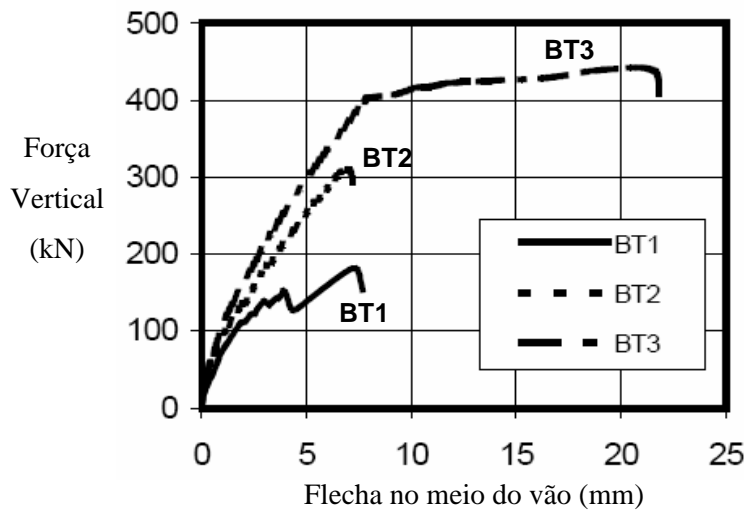


Figura 3.22 – Gráfico força x flecha no meio do vão das vigas; adaptada de Khalifa *et al.* (1999).

A resistência efetiva do CFC foi calculada aplicando-se um coeficiente de redução à sua resistência nominal, a qual é dependente do modo de ruptura, ou seja, pela ruptura do material do reforço por tração ou ruptura por aderência do mesmo.

O reforço com estribos em **U** com ancoragem na extremidade considera apenas a ruptura do material de reforço. O coeficiente de redução é função deste modo de ruptura e da deformação específica última do CFC. Esse limite é reduzido para evitar que a abertura da fissura inclinada seja de grande magnitude, e com isso evitar que ocorra uma perda no efeito de engrenamento dos agregados, o qual contribui para a resistência à força cortante. Analisando-se os resultados entre as vigas BT2 e BT3, tem-se que o uso da ancoragem produz um aumento de aproximadamente 30% na resistência da viga. O sistema de ancoragem dos estribos em **U** fornece uma solução efetiva para casos em que o comprimento de ancoragem reta do reforço não é suficiente. Para uma viga reforçada com CFC sem ancoragem aumentou-se a capacidade resistente à força cortante, porém, a viga rompeu devido ao descolamento do reforço por ruptura de aderência. Na viga ensaiada onde foi usada a ancoragem, a capacidade à força cortante da viga aumentou ainda mais, e não ocorreu o descolamento do reforço quando da ruptura da viga.

3.4.3. Estudo de Silva Filho (2001)

Silva Filho realizou estudos experimentais em oito vigas bi-apoiadas de concreto de seção transversal **T**, com comprimento total de 4,4 m e vão livre de 4,0 m, com duas cargas concentradas e relação $\frac{a}{d} = 3,01$. Todas as vigas foram subdimensionadas à força cortante, onde havia uma viga de referência, outras sete foram pré-fissuradas e posteriormente reforçadas externamente à força cortante com compósitos de fibras de carbono (CFC) e, então, levadas à ruptura. O esquema do ensaio e a geometria das vigas são mostrados na Figura 3.23.

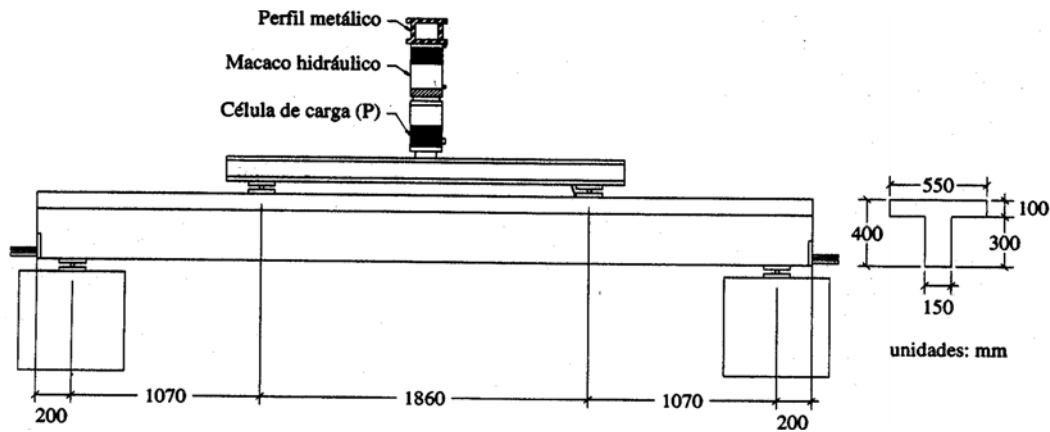


Figura 3.23 – Esquema de carregamento e geometria da viga; adaptada de Silva Filho (2001).

As oito vigas tinham a mesma taxa de armadura transversal ($\rho_{sw} = 1,68 \text{ cm}^2 / m$) e longitudinal ($\rho_l = 2,55 \%$), no qual se buscou uma capacidade resistente à força cortante de 65% da capacidade resistente a flexão. Os detalhes das armaduras estão esquematizados na Figura 3.24.

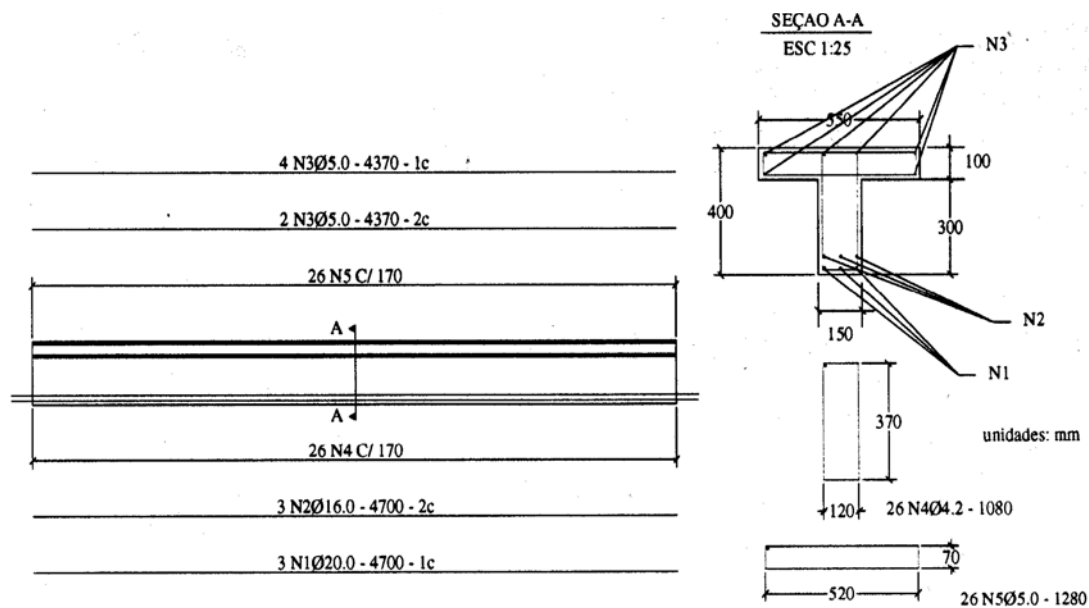


Figura 3.24 – Detalhamento das armaduras; adaptada de Silva Filho (2001).

Nas vigas reforçadas com CFC variou-se o tipo de ancoragem (envolvimento completo e em U), o número de camadas e o ângulo de inclinação do mesmo. A largura w_{fe} adotada foi de 150 mm e o dimensionamento à força cortante foi realizado pelo método do ACI. A tensão de escoamento da barra de

ação de $4,2\text{ mm}$ foi de 770 MPa . O tecido de fibras de carbono utilizado nos ensaios foi a fibras unidirecionais de alta resistência CF130, do sistema MBrace. Foram adotados os seguintes valores para o CFC, fornecido pelo fabricante desse sistema: $f_{fu} = 3790\text{ MPa}$, $E_f = 22800\text{ MPa}$, $t_f = 0,165\text{ mm}$ e $\varepsilon_{fu} = 1,7\%$. As demais características mecânicas e geométricas deste estudo experimental são apresentadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Propriedades mecânicas e geométricas das vigas.

Viga	Tipo de envolvimento	Camadas de CFC	Inclinação do reforço	s_{fe} (mm)	f_c (MPa)
V1REF	–	–	–	–	44,8
V2	Completo	1	90°	230	41,9
V3	Completo	2	90°	200	42,2
V5	Completo	1	45°	200	45,3
V6	Completo	1	45°	230	46,4
V4	Em U, sem ancoragem na alma	3	90°	200	45,3
V7	Em U, com ancoragem na alma com barras de aço	1	90°	230	45,3
V8	Em U, com ancoragem na alma com barras de aço	2	90°	200	45,3

Durante os ensaios foram posicionados LVDT em alguns pontos da viga para medição da flecha e colados EER no reforço, para medição da deformação específica no compósito. As forças últimas das vigas e as suas respectivas flechas são apresentadas na Tabela 3.4, e a força cortante teórica, a força de ruptura para essa solicitação e o modo de ruptura são apresentados na Tabela 3.5.

Tabela 3.4 – Forças últimas e flechas máximas.

Viga	Força última (kN)	Flecha máxima (mm)
V1REF	320,7	16,8
V2	589,0	39,8
V3	570,0	41,3
V5	579,0	44,1
V6	573,0	44,8
V4	402,4	22,4
V7	480,9	23,8
V8	500,4	23,7

Tabela 3.5 – Força cortante teórica e última, deformação específica e modo de ruptura.

Viga	V_{u_teor} (kN)	V_{u_exp} (kN)	Modo de Ruptura	Deformação máxima do reforço (%)
V1REF	194,0	160,4	Tração diagonal	–
V2	252,5	294,5	Flexão	3,14
V3	333,5	285,0	Flexão	1,88
V5	280,5	289,5	Flexão	1,77
V6	284,0	286,5	Flexão	1,53
V4	321,5	201,2	Descolamento do CFRP	3,37
V7	253,0	245,5	Tração diagonal, com descolamento do CRFP	13,90
V8	296,5	250,2	Tração diagonal, com descolamento do CRFP	0,18

Para as vigas reforçadas com envolvimento completo (V2, V3, V5 e V6) as forças últimas foram 60,5%, em média, em relação à viga de referência V1REF. Porém, não foi possível observar o limite da capacidade resistente à força cortante deste tipo de reforço devido ao tipo de ruptura ocorrido (flexão).

A viga V7, com uma camada de reforço, envolvimento em U e ancoragem do reforço na alma com a utilização de barras de aço, apresentou a capacidade resistente à força cortante 39% superior em relação à viga V1REF. A viga V8 também apresentou a sua capacidade resistente à força cortante 39% superior em relação à viga V1REF. Na viga V4 também com envolvimento em U, porém, sem

ancoragem na alma, houve o descolamento da fibra antes que a viga atingisse a força última.

A respeito das deformações específicas máximas lidas pelos extensômetros colados no reforço constata-se que para maioria das vigas ensaiadas os valores dessas deformações específicas efetivas ficaram bem abaixo do valor último indicado pelo fabricante do reforço que é de 17%. Apenas para a viga V7 o valor da deformação lido no ensaio (13,9%) foi próximo ficou próximo ao estipulado pelo fabricante.

3.4.4. Estudo de Araújo (2002)

Esse autor teve como objetivo dar continuidade ao estudo de Silva Filho, e na sua pesquisa foram mantidas as mesmas características geométricas das vigas, bem como o esquema de aplicação de força adotado em tal estudo. As dimensões das vigas e os detalhes do carregamento são mostrados na Figura 3.23.

Foram analisadas oito vigas de concreto armado, divididas em dois grupos de quatro, no qual para cada grupo havia uma viga de referência e as outras três reforçadas externamente à força cortante com CFC. As principais variáveis em cada grupo foram o espaçamento, as camadas, a inclinação e o tipo de ancoragem das faixas de CFC. O sistema do reforço utilizado foi o MBrace CF130, no qual o mesmo tinha as mesmas características do estudo de Silva Filho (2001).

A largura adotada para os estribos de CFC foi de 150 mm, sendo que os esquemas do reforço e a resistência do concreto f_c para cada viga são mostrados na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Características do reforço e resistência à compressão do concreto.

Viga	Tipo de envolvimento e ancoragem do reforço	Camadas de CFC	Ângulo do CFC	s_{fe} (mm)	f_c (MPa)
V1REF	–	–	–	–	23,3
V2	Em U (ancoragem na alma c/ 01 camada de 5 cm de CFC)	1	90°	230	22,5
V3	Em U (ancoragem na alma c/ 01 camada de 10 cm de CFC)	1	90°	230	22,5
V4	Em U (ancoragem na alma c/ 02 camadas de 10 cm de CFC)	2	90°	200	22,5
V5REF	–	1	–	–	46,1
V6	Completo	1	90°	230	45,7
V7	Completo	2	90°	200	45,8
V8	Completo	1	45°	325	46,6

Com o objetivo de se evitar a ruptura à flexão, as vigas do grupo 2 tinham uma taxa de armadura longitudinal maior que as do grupo 1. Para o aço de 5,0 mm a tensão de escoamento foi de 866 MPa, e para as barras de 16,0 mm, 20,0 mm e 22,0 mm os valores foram, respectivamente, 656 MPa, 765 MPa e 712 MPa. Os detalhes das armaduras são mostrados nas Figuras 3.25 e 3.26.

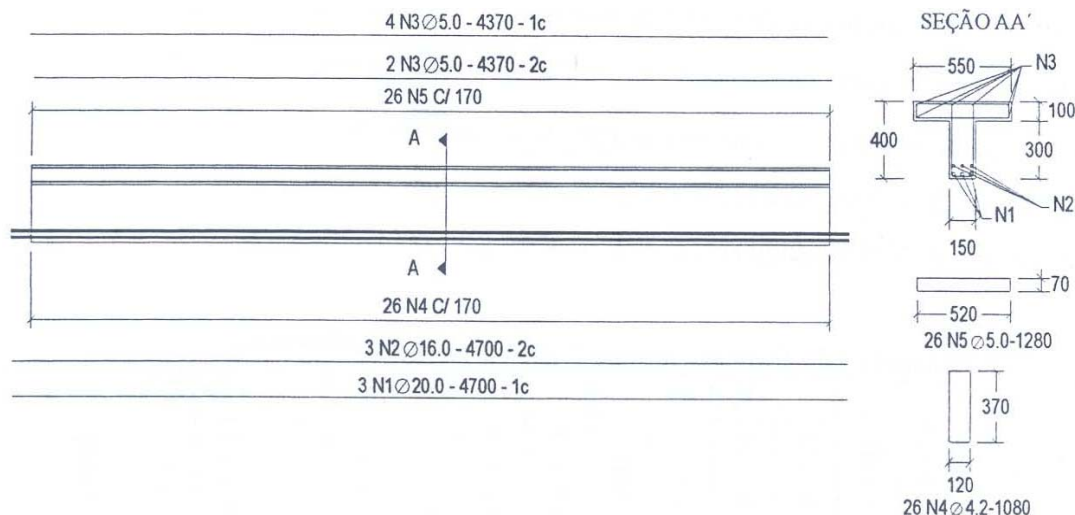


Figura 3.25 – Detalhamento das armaduras do grupo 1; adaptada de Araújo (2002).

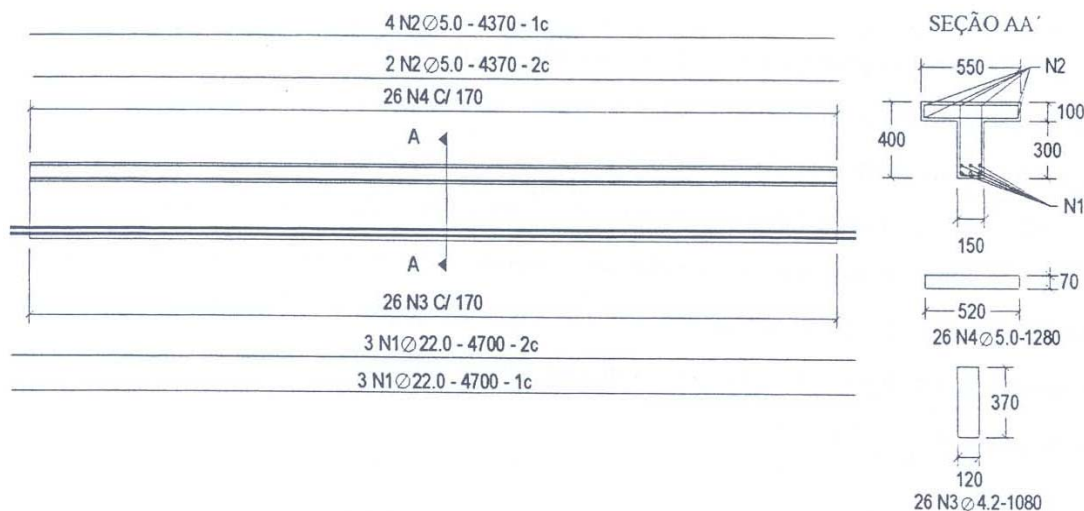


Figura 3.26 – Detalhamento das armaduras do grupo 2; adaptada de Araújo (2002).

Assim como no estudo de Silva Filho (2001), as vigas reforçadas foram pré-fissuradas e então recarregadas até a ruptura. Em todas as vigas foram fixados EER nas armaduras longitudinais e transversais, e também no próprio reforço para a leitura da deformação específica desses materiais. Também foram colocados LVDT no meio de cada viga com o objetivo de se verificar o deslocamento vertical durante o ensaio. A força cortante teórica, a força de ruptura para esse esforço e o modo de ruptura são mostrados na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Força cortante teórica, última e modo de ruptura.

Viga	V_{u_teor} (kN)	V_{u_exp} (kN)	Modo de Ruptura	Deformação máxima do reforço (%)
V1REF	117,5	130,0	Tração diagonal	–
V2	116,7	147,5	Descolamento do CFC	2,92
V3	116,7	157,5	Descolamento do CFC	2,81
V4	116,7	150,0	Descolamento do CFC	0,84
V5REF	145,3	186,0	Tração diagonal	–
V6	145,0	325,0	Ruptura do CFC	7,50
V7	145,1	394,0	Ruptura do CFC	3,78
V8	145,7	306,0	Ruptura do CFC	6,31

Para as vigas reforçadas com envolvimento em U e ancoragem na alma (V2, V3 e V4) as cargas últimas foram 13,5%, 21,1% e 15,4% superiores, respectivamente, em relação à viga de referência V1REF. Como as faixas horizontais de ancoragem de CFC trabalhavam perpendicularmente à direção das fibras, sua contribuição não era tão efetiva se caso solicitadas longitudinalmente. Logo, ocorreu o descolamento dessa ancoragem e a seguir as vigas V2, V3 e V4 atingiram o colapso por tração diagonal.

Para as vigas V6, V7 e V8 as forças últimas foram 74,7%, 118,8% e 64,5% superiores, respectivamente, em relação à viga de referência V5REF, com envolvimento completo do reforço na alma e mesa das vigas, por meio de furos realizados nas mesas. Para as três vigas a ruptura ocorreu por ruptura do CFC, onde as fibras foram expelidas na região de colapso, levando junto poucos fragmentos de concreto. Este tipo de reforço com envolvimento completo demonstra sua maior eficiência em relação ao envolvimento em U.

A respeito das deformações específicas máximas lidas pelos extensômetros colados no reforço constata-se que para as vigas com envolvimento completo os valores dessas deformações foram bem superiores em relação às vigas com colagem em U.

3.4.5. Estudo de Pellegrino e Modena (2002)

Esses autores estudaram 11 vigas retangulares de concreto reforçadas à força cortante por meio da colagem de tecidos de fibra de carbono (CFC) em ambos os lados da viga. As vigas foram divididas em dois grupos, no qual a diferença entre os mesmos era a presença de armadura transversal interna, havendo uma viga de referência para cada grupo. As vigas foram dimensionadas de forma a garantir que a ruptura à força cortante ocorresse antes da ruptura à flexão. O esquema do carregamento é mostrado na Figura 3.27.

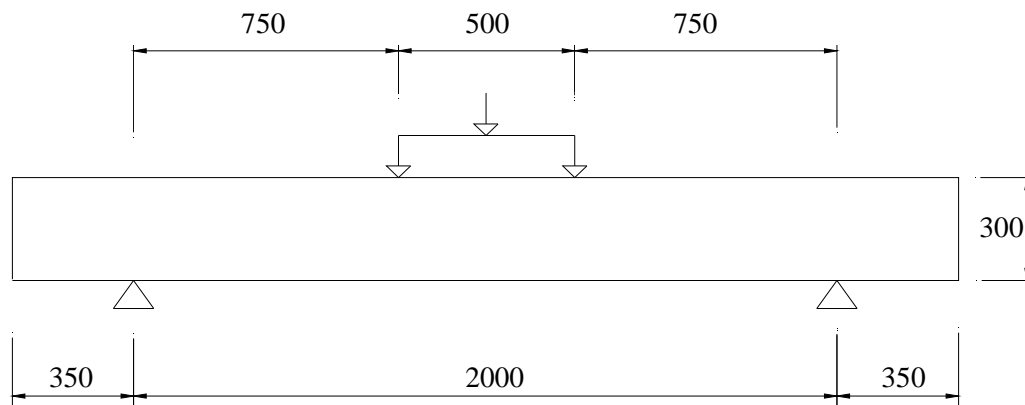


Figura 3.27 – Esquema do carregamento (cotas em mm); adaptada Pellegrino e Modena (2002).

A largura e altura das vigas foram de 20 cm e 35 cm, respectivamente, onde se tem a seguinte relação: $a/d = 3,00$. O valor da tensão de escoamento do aço dos estribos foi de 548 MPa e o módulo de elasticidade dos mesmo foi de 210 GPa. Os demais dados geométricos e mecânicos das vigas e do reforço são mostrados na Tabela 3.8. O esquema do reforço é apresentado na Figura 3.28 e nas Figuras 3.29 e 3.30 são mostrados os deslocamentos verticais medidos nos ensaios das vigas com e sem armadura transversal interna.

Tabela 3.8 – Propriedades da viga e do reforço.

Viga	Estribos	f_c (MPa)	t_f (mm)	E_f (GPa)	f_{fu} (MPa)	ρ_f (%)	ρ_{sw} (%)	$\rho_{s,f} = \frac{E_s A_{sw}}{E_f A_f}$
TR30C1	–	27,5	–	–	–	–	–	–
TR30C2	–	27,5	0,165	233,6	3550	0,22	–	–
TR30C3	–	27,5	0,495	233,6	3550	0,66	–	–
TR30C4	–	27,5	0,495	233,6	3550	0,66	–	–
TR30D1	$\phi 8$ c/20	31,4	–	–	–	–	0,335	–
TR30D10	$\phi 8$ c/20	31,4	0,330	233,6	3550	0,44	0,335	0,68
TR30D2	$\phi 8$ c/20	31,4	0,495	233,6	3550	0,66	0,335	0,46
TR30D20	$\phi 8$ c/20	31,4	0,495	233,6	3550	0,66	0,335	0,46
TR30D3	$\phi 8$ c/20	31,4	0,165	233,6	3550	0,22	0,335	1,37
TR30D4	$\phi 8$ c/20	31,4	0,330	233,6	3550	0,44	0,335	0,68
TR30D40	$\phi 8$ c/20	31,4	0,330	233,6	3550	0,44	0,335	0,68

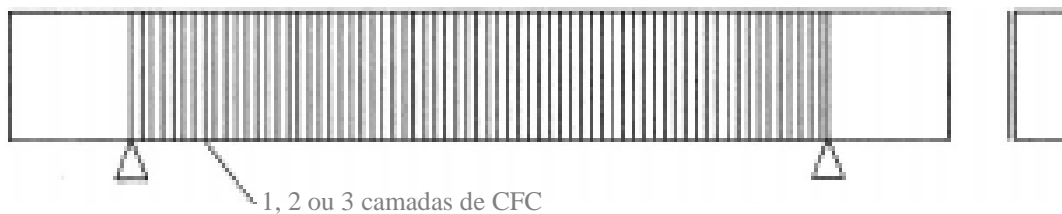


Figura 3.28 – Esquema de aplicação do reforço contínuo com CFC; adaptada Pellegrino e Modena (2002).

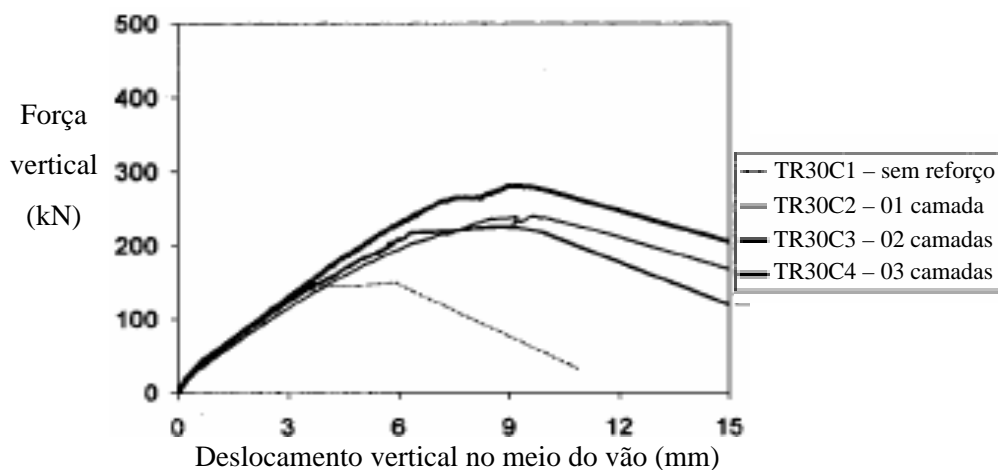


Figura 3.29 – Gráfico força versus deslocamento vertical para vigas sem armadura transversal; adaptada Pellegrino e Modena (2002).

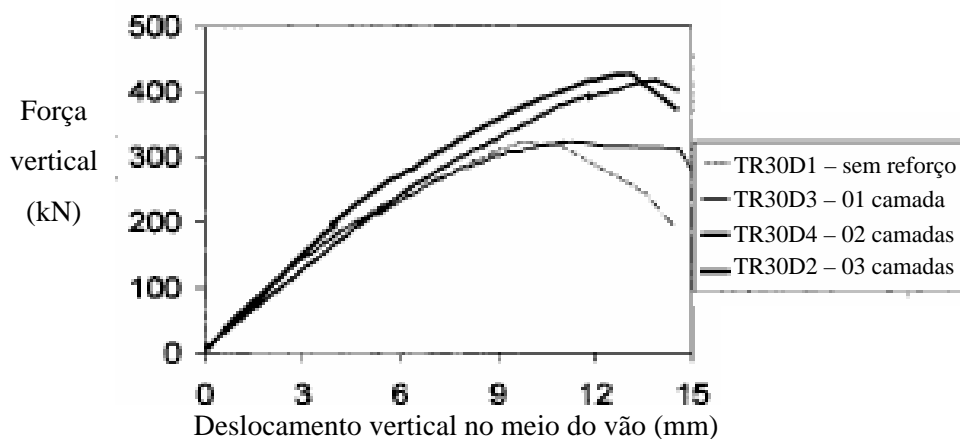


Figura 3.30 – Gráfico força versus deslocamento vertical para vigas com armadura transversal; adaptada Pellegrino e Modena (2002).

A viga de referência do grupo sem a presença de estribos (TR30C1) apresentou uma única fissura principal diagonal que se desenvolveu desde o apoio até o ponto de aplicação da força. Com o acréscimo do reforço (TR30C2, TR30C3 e TR30C4) o modelo de fissuração mudou radicalmente, com o surgimento de fissura quase horizontal próxima ao apoio, e fazendo um ângulo de

aproximadamente 45° próximo ao ponto de carregamento. De uma forma geral o mecanismo de ruptura para as vigas desse grupo foi o de ruptura por tração diagonal na região de cortante combinado o descolamento do compósito.

Para a viga de referência do grupo com armadura transversal interna (TR30D1), o modelo de fissuração para a ruptura à força cortante apresentou várias fissuras subverticais, além da fissura principal diagonal.

A viga TR30D3, com uma camada não mostrou nenhum incremento com relação à força última, apresentando apenas uma ruptura mais dútil em relação à viga de referência. Houve neste caso o destacamento do cobrimento do concreto.

O mecanismo de ruptura das vigas TR30D10, D2, D20, D4 e D40 foram praticamente idênticos, com o destacamento do cobrimento do concreto e o aparecimento de várias fissuras na zona de ancoragem do reforço. As inclinações das fissuras foram menores que 45°.

A Tabela 3.9 apresenta os resultados dos ensaios e o comparativo dos valores experimentais e teóricos. Para o cálculo do V_c e V_f foram utilizados as expressões do Eurocode, e para a parcela do reforço à força cortante $V_{f,teór}$ foi adotado o modelo de Khalifa *et al.* (1998).

Tabela 3.9 – Resultados ensaios dos experimentos de Pellegrino e Modena (2002).

Viga	Camadas de CFC	$V_{n,exp}$ (kN)	$V_{n,teor}$ (kN)	$V_{f,test}$ (kN)	$V_{f,teor}$ (kN)	$\frac{V_{f,exp}}{V_{f,teor}}$	$\frac{V_{f,teor}}{V_{n,teor}}$	$\frac{V_{f,exp}}{V_{n,exp}}$
TR30C1	–	74,7	65,9	–	–	–	–	–
TR30C2	01	120,0	108,0	45,3	42,1	1,08	0,64	0,61
TR30C3	03	112,8	150,3	38,1	88,4	0,43	1,34	0,51
TR30C4	03	140,2	150,3	65,5	88,4	0,74	1,34	0,88
TR30D1	–	161,5	126,9	–	–	–	–	–
TR30D10	02	193,0	198,5	31,5	71,6	0,44	0,56	0,19
TR30D2	03	213,3	219,5	51,8	92,6	0,56	0,73	0,32
TR30D20	03	247,5	219,5	86,0	92,6	0,93	0,73	0,53
TR30D3	01	161,4	169,0	0,0	42,1	0,00	0,33	0,00
TR30D4	02	208,8	198,5	47,3	71,6	0,66	0,56	0,29
TR30D40	02	212,0	198,5	50,5	71,6	0,71	0,56	0,31

Esses autores concluíram que com o uso de estribos de aço e do reforço com CFC, a eficácia desse reforço transversal diminui quando a rigidez axial $E_f \rho_f$ aumenta e também quando aumenta a relação entre a rigidez da armadura transversal e a rigidez do CFC $\frac{E_{sw} \rho_{sw}}{E_f \rho_f}$.

Com base nos resultados experimentais, os autores propuseram uma nova expressão para o cálculo do fator de redução R para ruptura de vigas por descolamento do reforço, inicialmente proposto por Khalifa *et al.* (1998).

$$R^* = -0,53 \ln \rho_{s,f} + 0,29 \quad (3.125)$$

3.4.6. Estudo de Bouselham e Challal (2004)

Esses autores compilaram e analisaram inúmeras pesquisas a fim de estudar os mais variados parâmetros com maior influência no comportamento de vigas de concreto armado reforçadas externamente à força cortante com Polímeros Reforçados com Fibras (FRP), incluindo não somente as fibras de carbono, mas também as de aramida e de vidro.

Neste trabalho foram considerados mais de 100 resultados em ensaios experimentais de vigas de concreto reforçadas à força cortante, nos quais a Tabela 3.10 apresenta as diversas propriedades e parâmetros verificados nesses ensaios.

Uma primeira análise da base de dados estudada é mostrada na Figura 3.31, na qual se constata a maior eficiência do reforço com FRP por meio do envolvimento completo da viga, onde todas as vigas com esta configuração romperam por fratura (tração) do compósito, seguido do envolvimento em U e da colagem somente nos lados.

Tabela 3.10 – Propriedades e parâmetros analisados por Bouselham e Challal (2004).

Geometria da Viga	Tipo de Viga	Concreto e Aço	Tipo de Fibras	Configuração do Reforço
Seção retangular	Vigas com $a/d > 2,5$	Resistência do concreto	Carbono	Colagem somente no lados
Seção T	Vigas esbeltas	Armadura longitudinal	Aramida	Em U
Vão menor que 2m	Fator de escala (altura útil)	Armadura transversal	Vidro	Envolvimento completo
Vão entre 2m e 4m	Pré-fissuração	–	–	Contínuo
Vão maior que 4m	–	–	–	Em estribos (tiras)
–	–	–	–	Ângulo do reforço igual a 90 graus
–	–	–	–	Ângulo do reforço difere de 90 graus

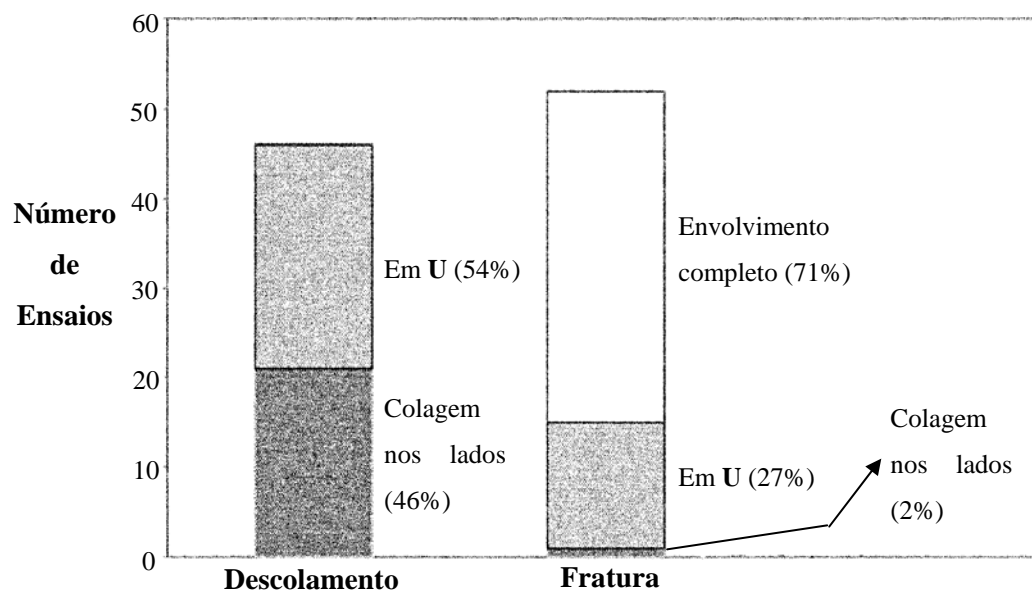


Figura 3.31 – Modos de ruptura e tipo de envolvimento do reforço com FRP; adaptada de Bouselham e Challal (2004).

Na seqüência foi então analisada para os fatores apresentados na Tabela 3.10, onde os autores apresentam diversas relações nas quais se destaca a da

rigidez $E_f \rho_f$, a resistência à compressão do concreto f_c e deformação específica efetiva do PRF $\varepsilon_{f,e}$. Pela Figura 3.32 constata-se que à medida que a deformação efetiva $\varepsilon_{f,e}$ diminui, a relação $E_f \rho_f / f_c^{2/3}$ aumenta, onde $\varepsilon_{f,u}$ é a deformação específica última do reforço. Nesta análise gráfica, observa-se também que o tipo de ruptura é influenciado pela deformação específica efetiva do compósito, sendo que para $\varepsilon_{f,e}$ de pequena magnitude tem-se a ruptura por descolamento, e para $\varepsilon_{f,e}$ de grande magnitude tem-se a ruptura por fratura do FRP.

Outra relação importante observada por esses autores é a $\frac{E_s \rho_{sw}}{E_f \rho_f}$, onde o

aumento da mesma acarreta um decréscimo no ganho de resistência total V , tanto para ruptura por descolamento quanto para ruptura por fratura (tração) do compósito.

A relação $\frac{E_s \rho_{sl}}{E_f \rho_f}$ influencia também a resistência total V nas vigas cuja

ruptura é por descolamento do FRP. Essa influência é um pouco menor nas vigas que rompem por fratura do reforço.

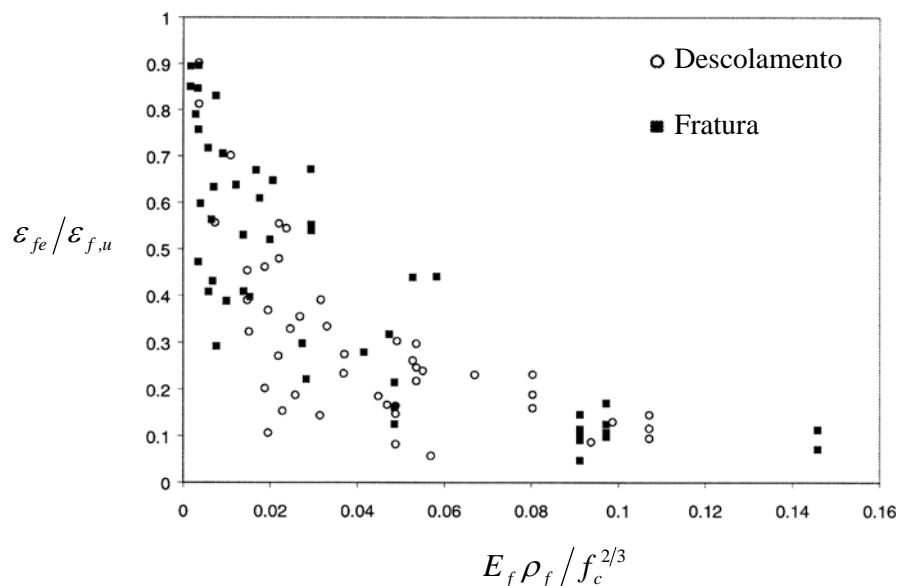


Figura 3.32 – Relação entre deformação e rigidez do FRP e resistência do concreto; adaptada de Boussselham e Challal (2004).

Outro fator importante, neste caso para o tipo de ruptura das vigas ensaiadas está relacionado ao parâmetro $\frac{a}{d}$, sendo que para:

- $\frac{a}{d} \leq 2,5$, ocorre a fratura do FRP;
- $2,5 < \frac{a}{d} \leq 3,2$, observa-se uma zona de transição onde pode ocorrer tanto a fratura do reforço como o descolamento do mesmo;
- $\frac{a}{d} > 3,2$, ocorre a ruptura por descolamento do FRP.

Para o caso do efeito escala Boussselham e Challal (2004) consideraram que este parâmetro influencia as vigas sem a presença de armadura transversal, na qual os autores constataram que para as rupturas por descolamento do FRP, as vigas com altura útil d menor que 300 mm, o ganho de resistência total V tende a diminuir com o aumento da altura útil.

Esses autores concluíram que as diversas relações entre as grandezas associadas ao reforço à força cortante com FRP possuem um caráter apenas qualitativo e que mais investigações experimentais são necessárias para confirmar e traduzir por meio de equações as variações apresentadas neste trabalho.

4 Programa Experimental

4.1. Notas Iniciais

Este estudo tem como objetivo avaliar o comportamento estrutural de vigas de seção **T** de concreto armado reforçadas à força cortante com CFC por meio da:

- a) o efeito da colagem de estribos em forma de **U**;
- b) determinação das flechas nas seções abaixo da aplicação das forças e no meio do vão da viga;
- c) determinação das deformações específicas na armadura interna;
- d) determinação das deformações específicas nos estribos (tiras) de CFC;
- e) determinação das deformações específicas da biela de concreto;
- f) obtenção da força de ruptura e da força cortante última para as vigas.

Na execução do reforço das vigas a ancoragem das tiras foi feita por meio da colagem de duas fitas de CFC de *5 cm* de largura, para garantir que não ocorra o descolamento do mesmo. Esta ancoragem foi executada junto à mesa da viga e na sua direção longitudinal.

Foram ensaiadas oito vigas de concreto armado bi-apoiadas, com resistência de dosagem à compressão igual ou superior a *35 MPa*. Todas as vigas tinham a mesma armadura longitudinal, sendo essas vigas divididas em duas séries, cada uma com quatro vigas.

A série I era composta de uma viga de referência (VR1) e três vigas reforçadas com tiras em **U** (VI-1, VI-2, VI-3), nas quais se variou o número de camadas do reforço (uma, duas e três camadas). Nessa série, no trecho de flexão simples, foi colocada uma armadura transversal em estribos verticais de aço. A série II também tinha uma viga de referência (VR2), e mesma variação dos números de camadas do reforço em CFC (VII-1, VII-2 e VII-3), porém, adotou-se uma taxa de armadura transversal em estribos verticais de aço no trecho sujeito à flexão simples menor que a adotada para a série I.

Numa primeira etapa, buscando-se simular uma situação real na qual o reforço é usualmente executado, as vigas VI-1, VI-2, VI-3, VII-1, VII-2 e VII-3 foram pré-fissuradas, descarregadas sob deformação constante, reforçadas com CFC e então carregadas até as suas respectivas rupturas.

Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados na confecção das vigas, descrevendo-se suas características, os esquemas de concretagem e de instrumentação das vigas, os sistemas de aplicação da força, a descrição das etapas de aplicação do reforço, além de todas as etapas dos ensaios.

4.2. Materiais

4.2.1. Concreto

O concreto usinado utilizado na confecção das vigas foi fornecido no dia 06 de Setembro de 2006 num caminhão betoneira pela empresa CONCRELAGOS CONCRETO LTDA, sendo dosado para alcançar uma resistência à compressão mínima de 35 *MPa* aos 28 dias. O cimento utilizado no preparo do concreto foi do tipo CPIII-40-RS, e o concreto apresentou um abatimento de tronco de cone de 120 *mm*.

As quantidades dos materiais empregados na execução do concreto são mostradas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Consumo de material por m^3 de concreto.

Material	Quantidade
Cimento CPIII-40-RS	331 <i>kg</i>
Areia média lavada	0,563 m^3
Areia fina	0,415 m^3
Brita 0	0,604 m^3
Água	163 <i>l</i>
Aditivo	1,16 <i>l</i>

4.2.1.1. Resistência à Compressão do Concreto

Foram realizados ensaios de compressão em 19 corpos-de-prova cilíndricos. Os corpos-de-prova foram moldados conforme as prescrições da NBR-5738 com dimensões de 150 mm x 300 mm, ensaiados aos 28 dias após a concretagem e na época de realização do ensaio de algumas das vigas. Esses ensaios foram realizados na prensa CONTENCO do Laboratório de Estruturas e Materiais (LEM) da PUC-Rio, com capacidade de carga de 2400 kN, conforme mostra a Foto A.1 do Anexo A. Os valores médios da resistência à compressão do concreto são mostrados na Tabela 4.2, e no diagrama tensão *versus* idade do concreto mostrado na Figura 4.1.

Tabela 4.2 – Resistência à compressão do concreto para diversas idades.

Quantidade de corpos-de-prova	Idade do concreto em dias (data)	$f_{c,médio}$ (MPa)	Viga
4	28 (04/10/06)	44,9	–
3	48 (24/10/06)	48,4	VR1
3	57 (02/11/06)	49,9	VR2
3	153 (09/02/07)	50,9	VII-1
3	216 (12/04/07)	51,7	VII-2, VI-1 e VI-2
3	335 (06/08/07)	52,3	VII-3 e VI-3

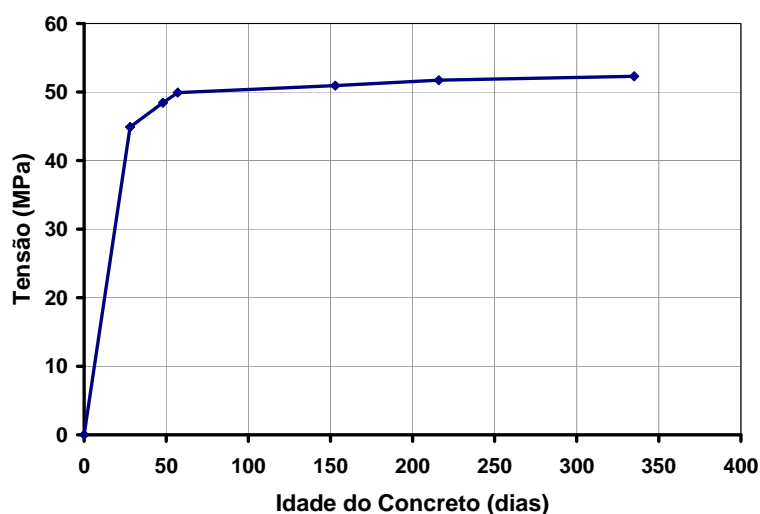


Figura 4.1 – Gráfico da resistência à compressão x idade do concreto.

4.2.1.2. Módulo de Elasticidade do Concreto

Para determinação do módulo de deformação estática (módulo de elasticidade do concreto) foram moldados três corpos-de-prova de concreto de acordo com as prescrições da NBR-5738, com dimensões de 150 mm x 300 mm. Foram utilizados dois EER em cada corpo-de-prova para medir a deformação do concreto durante o ensaio no qual se adotou a média desses valores. O equipamento utilizado para a realização desse ensaio foi o mesmo utilizado para a determinação da resistência à compressão do concreto. Esses ensaios foram realizados de acordo com NBR-8522, e consistem na aplicação de carregamentos crescentes, com leituras das deformações para as respectivas forças aplicadas. A relação constitutiva do concreto é dada por:

$$\sigma_c = E_c \varepsilon_c \quad (4.1)$$

onde

σ_c – tensão no concreto;

E_c – módulo de elasticidade do concreto;

ε_c – deformação específica do concreto.

O procedimento utilizado para a determinação do módulo de elasticidade do concreto é o correspondente a uma simulação de uma estrutura em seu primeiro carregamento (plano de carga III da NBR-8522), ou seja, obtém-se por meio da equação 4.2 o módulo de deformação secante, sendo este o módulo que corresponde a $0,3f_c$. Segundo a NBR-8522, os ensaios são válidos quando os valores da tensão de ruptura dos corpos-de-prova não diferem mais de 20% das resistências previstas. Como a resistência inicialmente prevista desses corpos-de-prova está em torno de 50 MPa, todos os resultados apresentados na Tabela 4.3 são válidos. Com o aumento da força aplicada efetuaram-se as leituras das deformações específicas. Para cada força tem-se uma tensão no concreto e a sua respectiva deformação específica. O módulo de elasticidade é calculado por meio da seguinte expressão:

$$E = \frac{\sigma_n - \sigma_{inf}}{\varepsilon_n - \varepsilon_0} \quad (4.2)$$

onde

E_c – módulo de deformação constante;

σ_n – tensão considerada para o cálculo do módulo secante;

σ_{inf} – 0,5 MPa ;

ε_n – deformação específica correspondente à tensão σ_n ;

ε_0 – deformação específica correspondente à leitura l_0 ;

n – variação dos níveis de aplicação de força, 01, ... 0,7 ou 0,8.

Os resultados dos ensaios são apresentados na Tabela 4.3. A Figura 4.2 mostra o gráfico tensão *versus* deformação específica dos três corpos-de-prova ensaiados. O esquema do ensaio e da aplicação da força é mostrado na Foto A.2 do Anexo A.

Tabela 4.3 – Módulo de elasticidade do concreto para os corpos-de-prova de concreto.

CP	Força de ruptura (kN)	Tensão de ruptura (MPa)	Deform. específica de ruptura (‰)	Força p/ 0,3f _c (kN)	Tensão p/ 0,3f _c (MPa)	Deform. específica p/ 0,3f _c (‰)	Deform. específica p/ 0,5 MPa (‰)	Módulo de elasticidade secante (GPa)
1	946,5	53,6	2,17	283,9	16,1	0,55	0,032	30,1
2	908,5	51,4	1,89	272,6	15,4	0,52	0,033	30,6
3	971,9	55,0	2,42	291,6	16,5	0,56	0,031	30,2

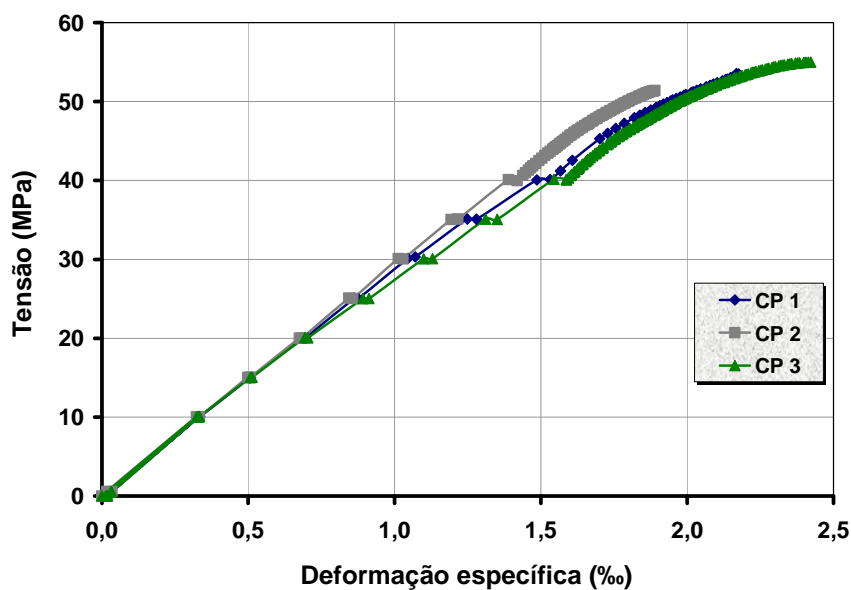


Figura 4.2 – Gráfico tensão x deformação específica dos corpos-de-prova do concreto.

O módulo de elasticidade secante médio do concreto utilizado na confecção das vigas foi $E_c = 30,3 \text{ GPa}$.

4.2.1.3.

Resistência à Tração por Compressão Diametral do Concreto

Os ensaios de compressão diametral de três corpos-de-prova de concreto foram realizados aos 28 dias após a concretagem das vigas conforme NBR-7222. Os corpos-de-prova para a realização desse ensaio foram moldados de acordo com a NBR-5738, e tinham dimensões de $150 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$. O equipamento utilizado para a realização desse ensaio foi o mesmo utilizado para a determinação da resistência à compressão do concreto.

Após a realização do ensaio obteve-se a força máxima de cada corpo-de-prova. A resistência à tração por compressão diametral é dada por:

$$f_{t,D} = \frac{2F}{\pi dL} \quad (4.3)$$

onde

$f_{t,D}$ – resistência à tração por compressão diametral, expressa em MPa;

F – força máxima obtida no ensaio;

d – diâmetro do corpo-de-prova;

L – altura do corpo-de-prova.

Com o valor da força máxima para cada ensaio é obtida a resistência à tração para um corpo-de-prova. Na Tabela 4.4 são mostrados os resultados de compressão diametral para os corpos-de-prova. O registro do ensaio é mostrado na Foto A.3 do Anexo A.

Tabela 4.4 – Resultados da resistência à compressão diametral do concreto.

Corpos-de-prova	Força (kN)	Resistência à tração (MPa)
1	310,0	4,39
2	275,0	3,90
3	280,0	3,96

A resistência à tração média do concreto utilizado na confecção das vigas foi $f_{t,D} = 4,08 \text{ MPa}$.

4.2.2. Aço

Para as armaduras longitudinal e transversal das vigas foram utilizadas barras de aço CA-50 e CA-60. Os diâmetros das barras longitudinal foram de 16,0 *mm*, armadura de flexão, e 5,0 *mm*, armadura de montagem, sendo esta desprezada na parcela de contribuição à força de compressão. A armadura transversal consistiu de estribos de 5,0 *mm*, espaçados ao longo do comprimento da viga a cada 10 ou 20 *cm*, dependendo das séries. Foram ensaiadas seis amostras de aço de acordo com a norma NBR-ISO-6892. As três amostras de aço de 5,0 *mm* e as outras três com diâmetro de 16,0 *mm* foram ensaiadas à tração na máquina MTS do Laboratório do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Todos os valores obtidos nos ensaios de tração foram superiores aos mínimos exigidos pela norma. Os resultados dos ensaios de resistência à tração encontram-se na Tabela 4.5 e os gráficos no Anexo B. As amostras de 5,0 *mm* e 16,0 *mm* ensaiadas são mostradas na Foto A.4 do Anexo A.

Tabela 4.5 – Resultados dos ensaios de resistência à tração das barras de aço.

	Corpos-de-prova	Tensão de escoamento (MPa)	Deform. de escoamento (‰)	Deform. de ruptura (‰)	Módulo de Elasticidade (GPa)
φ 5,0	01	589,6	3,0	10,0	196,5
	02	602,4	3,0	8,0	200,8
	03	594,7	3,0	8,0	198,2
	Média	595,50	3,00	8,70	198,50
φ 16,0	01	606,3	2,94	9,02	206,2
	02	600,6	2,97	9,38	202,2
	03 ⁽¹⁾	598,3	0,68	2,86	879,8
	Média	599,65	1,99	4,14	204,20

⁽¹⁾ Corpo-de-prova desprezado no cálculo da média.

4.2.3. Compósito de Fibras de Carbono

Na execução do reforço com CFC à força cortante das vigas VI-1, VI-2, VI-3, VII-1, VII-2 e VII-3 foi utilizado o sistema de reforço estrutural do fabricante SIKA, SIKAWRAP-230C e SIKADUR 330, com as seguintes características:

a) Resina epoxídica ou adesivo epóxi (SIKADUR 330):

- Média viscosidade, tixotrópico e bicomponente de pega normal.
- Componente A: branco.
- Componente B: cinza escuro.
- Mistura A+B: cinza claro.
- Proporção dos componentes: 20% de componente A e 80% de componente B (em peso).
- Consumo: 1ª camada (0,7 a 1,2 kg/m²) e 2ª camada (0,5 kg/m²).
- Tempo de vida útil da mistura (*pot-life*): 40 min (25°C).
- Cura total: 7 dias.

b) Tecido de fibra de carbono (SIKAWRAP-230C)

- Base: tecido de fibra de carbono unidirecional.
- Cor: preta.
- Densidade: 1,78 g/cm³.
- Peso: 220 g/m².
- Dimensão (rolo): 30 cm de largura x 50 m de comprimento.
- Espessura: 0,122 mm.
- Módulo de elasticidade: 230 GPa.
- Resistência à tração: 4100 MPa.
- Deformação específica: 17,0 %.

Os componentes desse sistema são mostrados nas Fotos A.5 e A.6 do Anexo A.

4.2.3.1.

Ensaio de Resistência à tração do Compósito de Fibras de Carbono

Foram realizados ensaios em corpos-de-prova com o CFC para medir a resistência à tração dos mesmos. O método do ensaio foi o da norma ASTM D 3039 / D 3039 M, que especifica os procedimentos para determinação da resistência à tração e do módulo de elasticidade de materiais compostos de fibras revestidos com matriz polimérica (resina epoxídica).

Essa norma estabelece dimensões mínimas para os corpos-de-prova. As dimensões utilizadas nos ensaios de resistência à tração são mostradas na Figura 4.3.

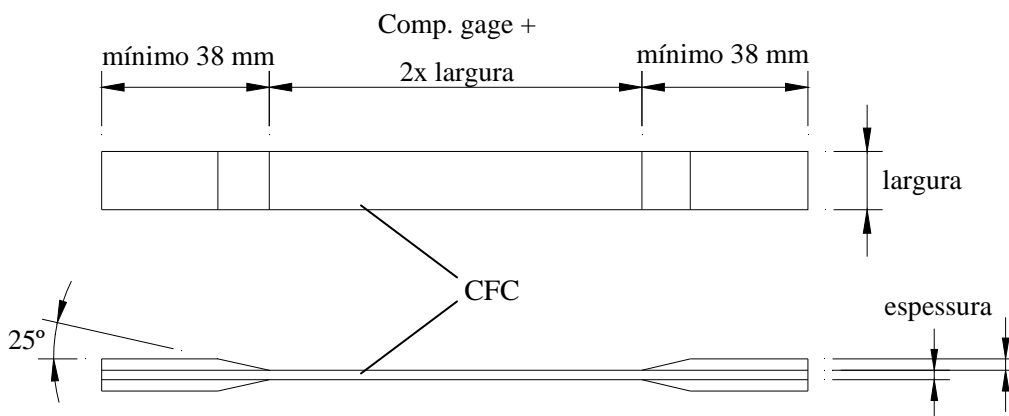


Figura 4.3 – Dimensões dos corpos-de-prova para ensaio à tração do CFC de acordo com a ASTM D 3039 / D 3039 M.

Os corpos-de-prova unidirecionais tinham abas com o objeto de evitar o surgimento de falhas prematuras quando da aplicação da força.

A Tabela 4.6 apresenta algumas dimensões recomendadas pela norma ASTM D 3039 / D 3039 M em função da orientação das fibras.

Tabela 4.6 – Geometria dos corpos-de-prova de CFC recomendada pela ASTM D 3039 / D3039 M.

Orientação das Fibras	Largura (mm)	Comp. (mm)	Espessura (mm)	Comp. Aba (mm)	Espessura Aba (mm)
0° unidir.	15	250	1,0	56	1,5
90° unidir.	25	175	2,0	25	1,5
Fios descont.	25	250	2,5	–	–

Foram realizados ensaios à tração em cinco corpos-de-prova de CFC unidirecional revestidos com resina epoxídica, com dimensões de 1,5 cm de largura e 25 cm de comprimento. O ensaio foi realizado na máquina MTS do Laboratório do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio. Foram coladas, com a mesma resina epoxídica, duas (uma em cada lado) pequenas “chapas” de alumínio (placas de fixação) em cada uma das extremidades da amostra. Foram feitas ranhuras em ambos os lados de cada uma das “chapas” para promover uma melhor aderência entre a mesma e o tecido de fibras de carbono, e evitar o escorregamento entre a garra de fixação e o corpo-de-prova.

A resistência à tração do CFC é dada por:

$$f_{f,u} = \frac{P_{máx}}{A} \quad (4.4)$$

Os resultados do ensaio constam da Tabela 4.7 e os gráficos resultantes de cada amostra de CFC são mostrados no Anexo B. Na Foto A.7 do anexo A é mostrado os corpos-de-prova utilizados nos ensaios e o equipamento utilizado para a realização dos mesmos. Para a determinação da tensão de ruptura, a espessura considerada foi a indicada pelo fabricante 0,122 mm.

Tabela 4.7 – Resultados dos ensaios de resistência à tração dos corpos-de-prova de CFC.

CP	Força de ruptura (kN)	Tensão de ruptura (MPa)	Deformação específica (%)	Módulo de Elasticidade (GPa)
1	5,122	2724,26	11,223	242,74
2	5,640	3004,37	11,477	261,77
3	6,777	3562,02	13,411	265,60
4	5,063	2646,86	10,255	258,10
5	5,474	2908,31	11,812	246,22
Média	5,615	2969,16	11,636	255,17

4.3. Descrição das Vigas

4.3.1. Pré-dimensionamento

Foram ensaiadas oito vigas com seção **T**, divididas em duas séries de quatro vigas. Cada série tinha uma viga de referência, ou seja, sem o reforço à força cortante com o CFC. Todas as vigas tinham as mesmas características geométricas, variando-se uma série para outra apenas a taxa de armadura transversal interna na região a ser reforçada, ou seja, no trecho de flexão simples. As vigas tinham um comprimento total de $3,00\text{ m}$, com duas forças aplicadas à $87,5\text{ cm}$ dos apoios. O esquema do carregamento estático e a geometria das vigas são mostrados nas Figuras 4.4 e 4.5.

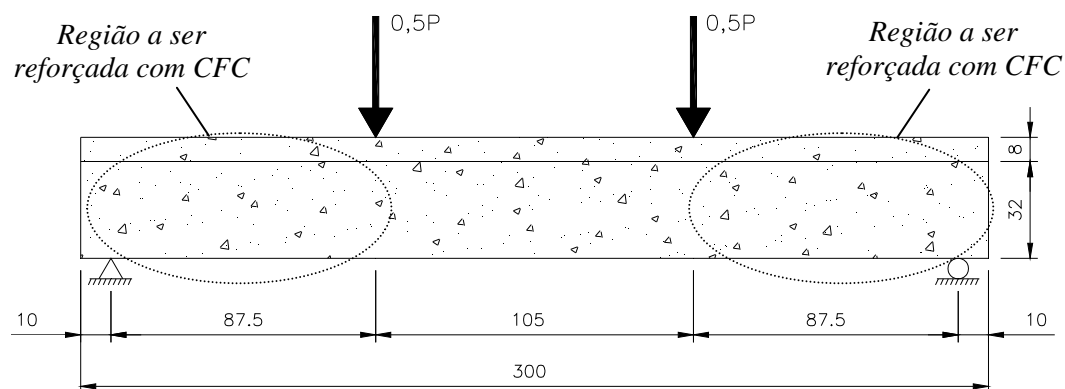


Figura 4.4 – Esquema de aplicação de forças às vigas (cotas em cm).

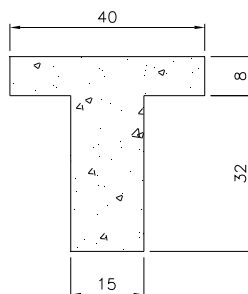


Figura 4.5 – Seção transversal das vigas T (cotas em cm).

Sendo a distância da aplicação da força ao eixo do apoio à esquerda $a = 87,5\text{ cm}$ e a altura útil $d = 36\text{ cm}$, tem-se:

$$\frac{a}{d} = \frac{87,5}{36} = 2,4 \quad (4.5)$$

Segundo Kani (1964), para valores $\frac{a}{d} \cong 2,0$, a ruptura da viga está associada ao desenvolvimento de uma fissura inclinada dentro do trecho de flexão simples.

O esquema e os diagramas das solicitações das vigas são mostrados na Figura 4.6.

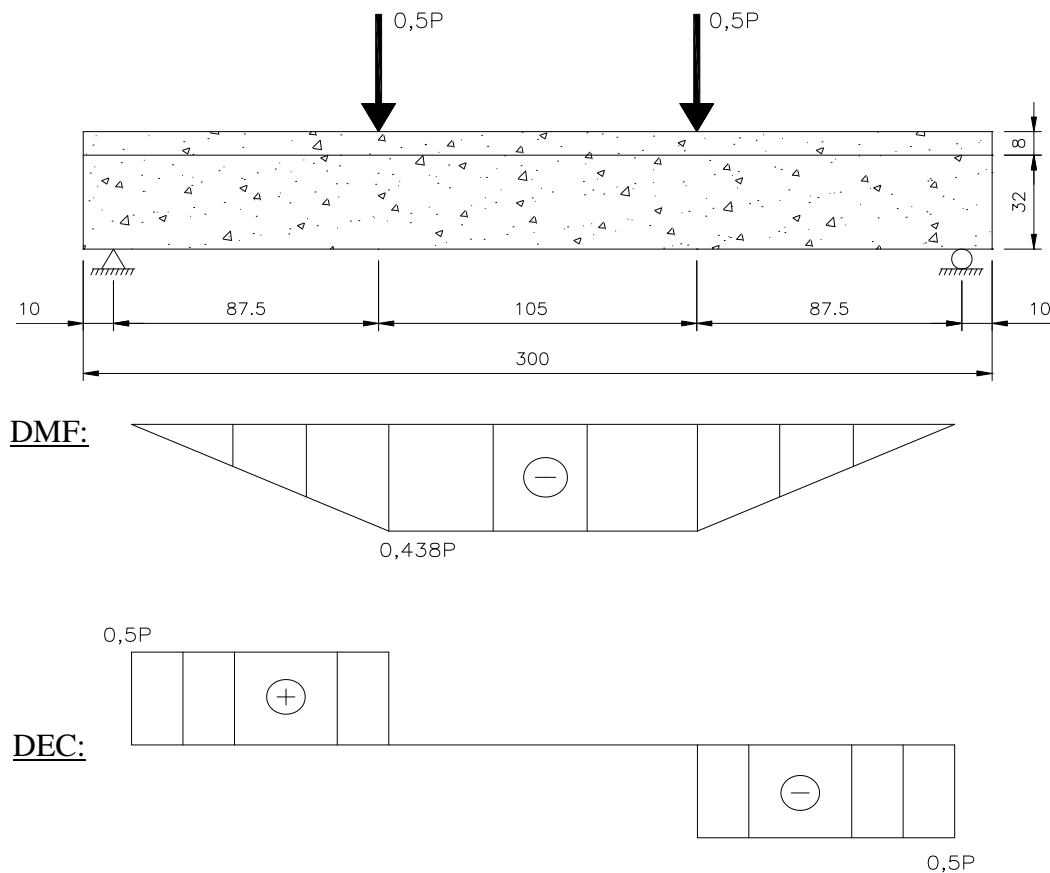


Figura 4.6 – Solicitações nas vigas (cotas em cm).

Para a série I tem-se a viga de referência VR1, sendo as vigas com reforço denominadas I-1, I-2 e I-3. Para a série II tem-se de igual modo VR2, II-1, II-2 e II-3. Para as três últimas vigas de cada série variou-se a espessura do reforço, adotando-se uma, duas, ou três camadas de CFC, sendo que para estas vigas foi colocada uma ancoragem para se evitar o descolamento pré-maturo do reforço.

Para o reforço foram usadas tiras em U na alma da viga de tecido de fibras de carbono com dimensões de 10 cm x 79 cm. Para a ancoragem na alma também

foram usadas tiras de CFC no sentido longitudinal das vigas com dimensões de $5\text{ cm} \times 87,5\text{ cm}$. O esquema longitudinal de colagem do reforço é mostrado na Figura 4.7.

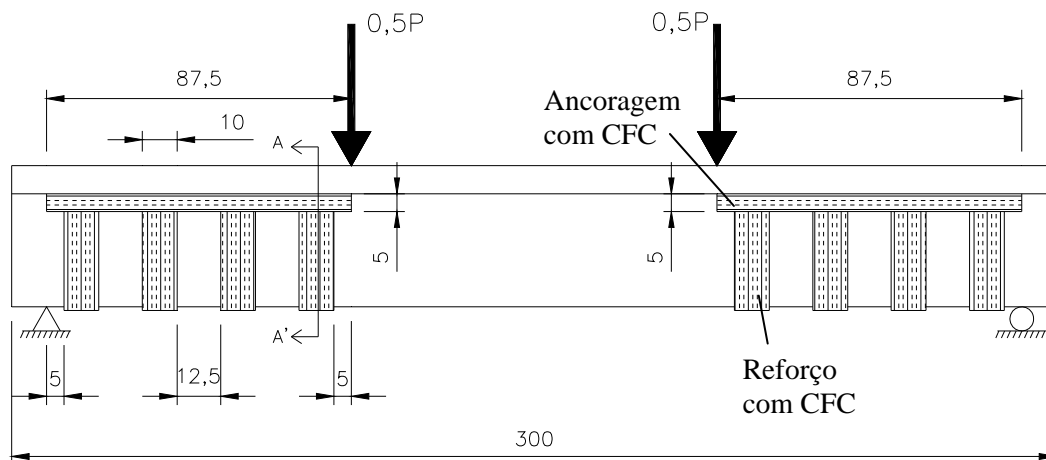


Figura 4.7 – Esquema longitudinal da colagem do reforço em CFC (cotas em cm).

Nas vigas foi adotada uma armadura transversal mínima (estribos internos) na região de flexão pura, e uma armadura de flexão obtida considerando-se para o pré-dimensionamento os seguintes dados:

- largura da viga $b_w = 15\text{ cm}$;
- largura da mesa $B = 40\text{ cm}$;
- altura da viga $h = 40\text{ cm}$;
- altura da mesa $H = 8\text{ cm}$;
- altura útil $d = 35,4\text{ cm}$;
- espessura de uma camada de CFC $t_{f1} = 0,122\text{ mm}$;
- espessura de duas camadas de CFC $t_{f2} = 0,244\text{ mm}$;
- espessura de três camadas de CFC $t_{f3} = 0,366\text{ mm}$;
- largura do estribo em CFC $w_f = 100\text{ mm}$;
- espaçamento do estribo em CFC $s_f = 225\text{ mm}$;
- armadura de flexão $A_{sl} = 12,06\text{ cm}^2$ (seis barras de $16,0\text{ mm}$);
- armadura transversal da série I $A_{sw} = 3,93\text{ cm}^2 / \text{m}$ ($\phi 5,0\text{ c} / 10$);
- armadura transversal da série II $A_{sw} = 1,96\text{ cm}^2 / \text{m}$ ($\phi 5,0\text{ c} / 20$);
- resistência à compressão do concreto $f_c = 35\text{ MPa}$;

– tensão de escoamento do aço $f_y = 500$ MPa .

Sendo a taxa de reforço à força cortante dada por:

$$\rho_f = \frac{2t_f w_f}{b_w s_f} \quad (4.6)$$

Tem-se para as vigas com uma camada de reforço $\rho_f = 0,072\%$ (Figura 4.8).

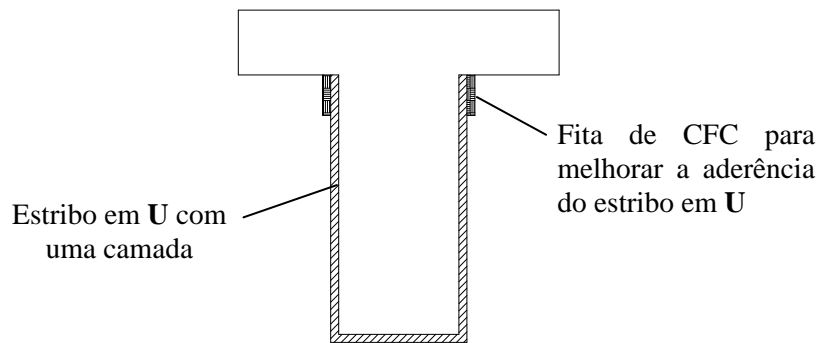


Figura 4.8 – Seção transversal AA' das vigas reforçadas VI-1 e VII-1.

Nas vigas com duas camadas de reforço (Figura 4.9) tem-se $\rho_f = 0,145\%$.

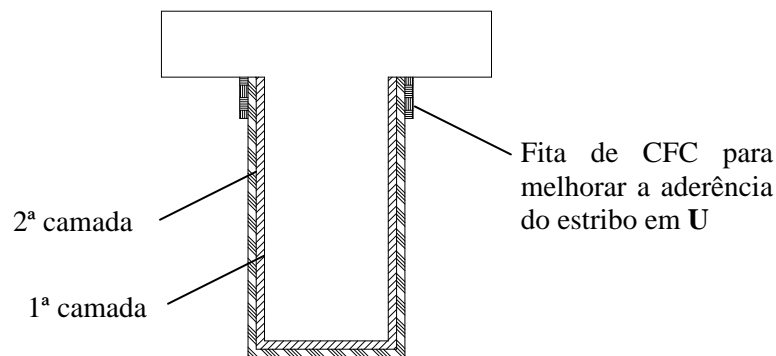


Figura 4.9 – Seção transversal AA' das vigas reforçadas VI-2 e VII-2.

Para as vigas com três camadas de reforço (Figura 4.10) tem-se $\rho_f = 0,217\%$.

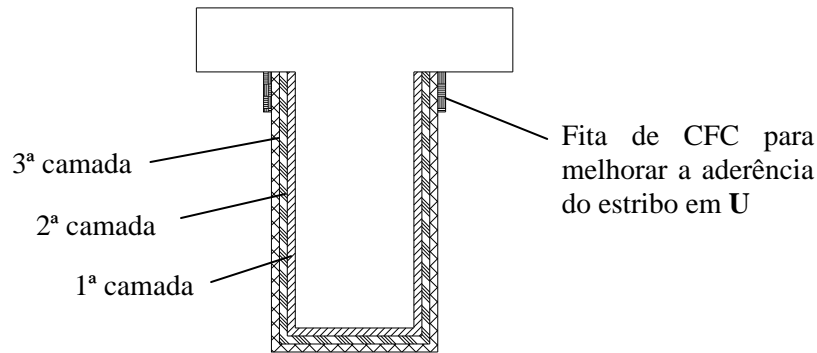


Figura 4.10 – Seção transversal AA' das vigas reforçadas VI-3 e VII-3.

4.3.2. Verificação à Força Cortante das Vigas da Série I

Nesta série foi prevista na região reforçada uma armadura transversal $A_{sw} = 3,93 \text{ cm}^2 / \text{m}$ ou $\phi 5,0 \text{ c}/10$ conforme detalhamento mostrado nas Figuras

4.11 e 4.12, sendo a taxa de armadura transversal $\rho_{sw} = \frac{A_{sw}}{b_w s} = 0,262\%$.

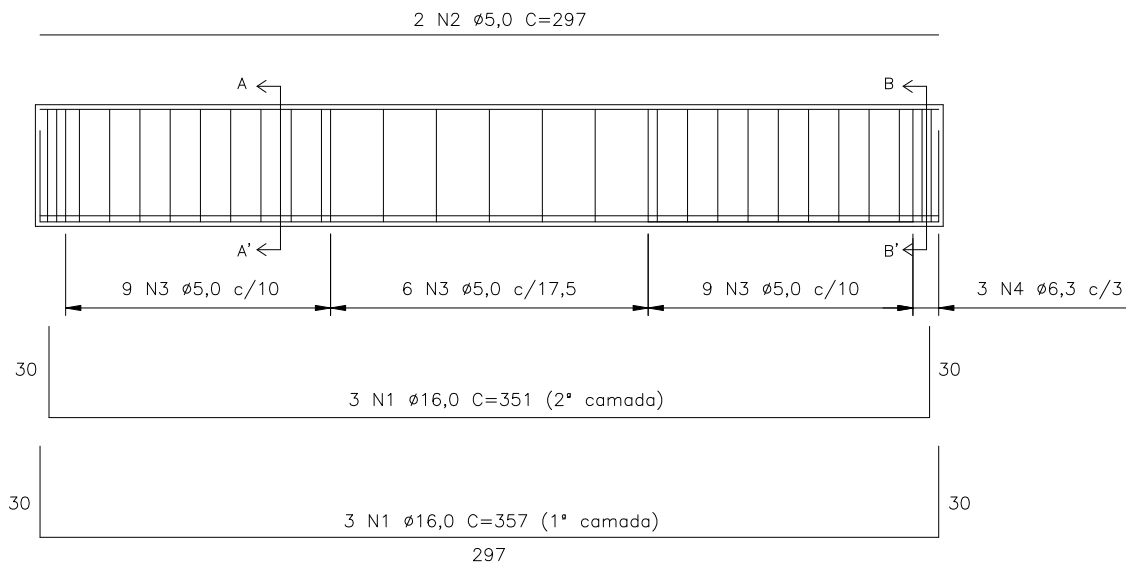


Figura 4.11 – Armadura longitudinal das vigas da Série I.

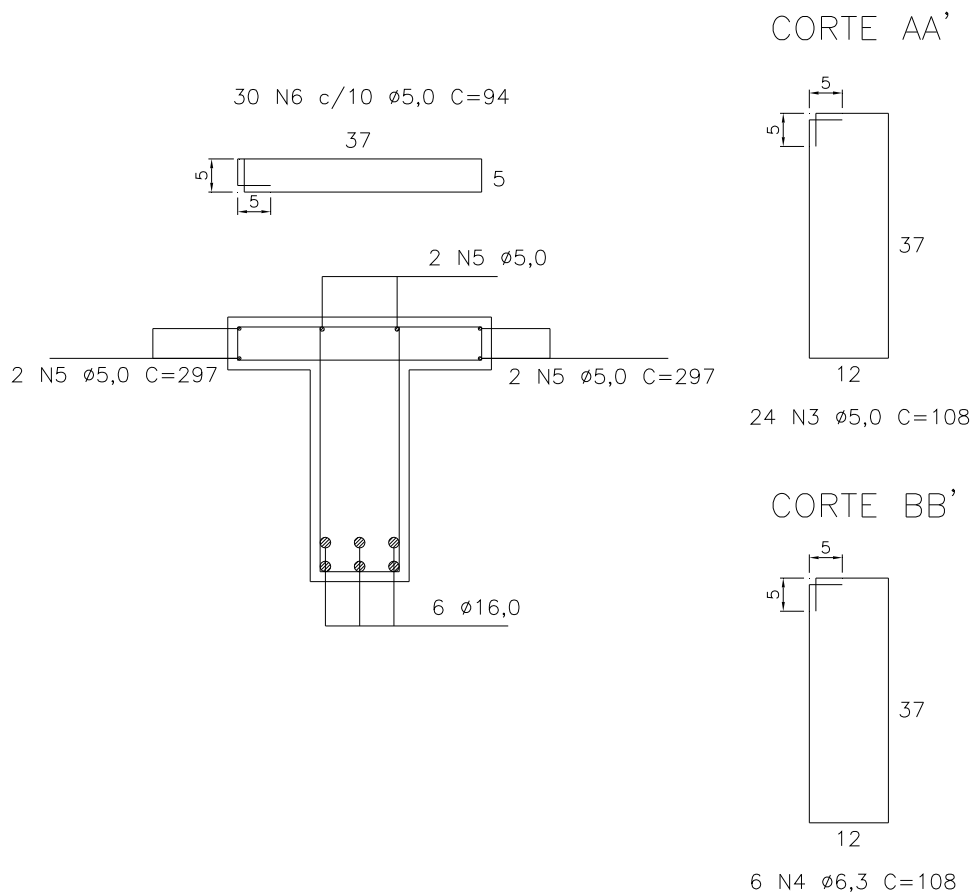


Figura 4.12 – Armaduras transversais das vigas da Série I.

Para uma verificação inicial da resistência à força cortante antes do ensaio, foram utilizadas as sistemáticas das normas NBR-6118 (2003) e o ACI-440 (2001). Os valores teóricos das solicitações nas vigas são mostrados na Tabela 4.8, onde todos os coeficientes de segurança adotados foram iguais a unidade.

Tabela 4.8 – Força cortante teórica e força de ruptura teórica das vigas da Série I.

Viga	NBR-6118				ACI-440	$V_c + V_{sw} + V_f$ (kN)	P_u
	V_c (kN)	V_{sw} (kN)	V_{Rd2} (kN)	$V_c + V_{sw}$ (kN)	V_f (kN)		
VR1	72,8	63,6	438,9	136,4	–	136,4	272,8
VI-1	72,8	63,6	438,9	136,4	27,34	163,8	327,5
VI-2	72,8	63,6	438,9	136,4	42,62	184,0	368,1
VI-3	72,8	63,6	438,9	136,4	58,54	195,0	389,9

No trecho de flexão simples, ou seja, na região central da viga foi colocada uma armadura transversal mínima de $\phi 5,0 c / 17,5$, com a finalidade de se evitar uma eventual ruptura por força cortante nesse trecho.

4.3.3. Verificação à Força Cortante das Vigas da Série II

Para esta série foi adotada uma armadura transversal na região do reforço com área $A_{sw} = 1,96 \text{ cm}^2 / m$ ou $\phi 5,0 c / 20$, conforme detalhamento mostrado nas Figuras 4.13 e 4.14, sendo a taxa de armadura transversal

$$\rho_{sw} = \frac{A_{sw}}{b_w s} = 0,131\% .$$

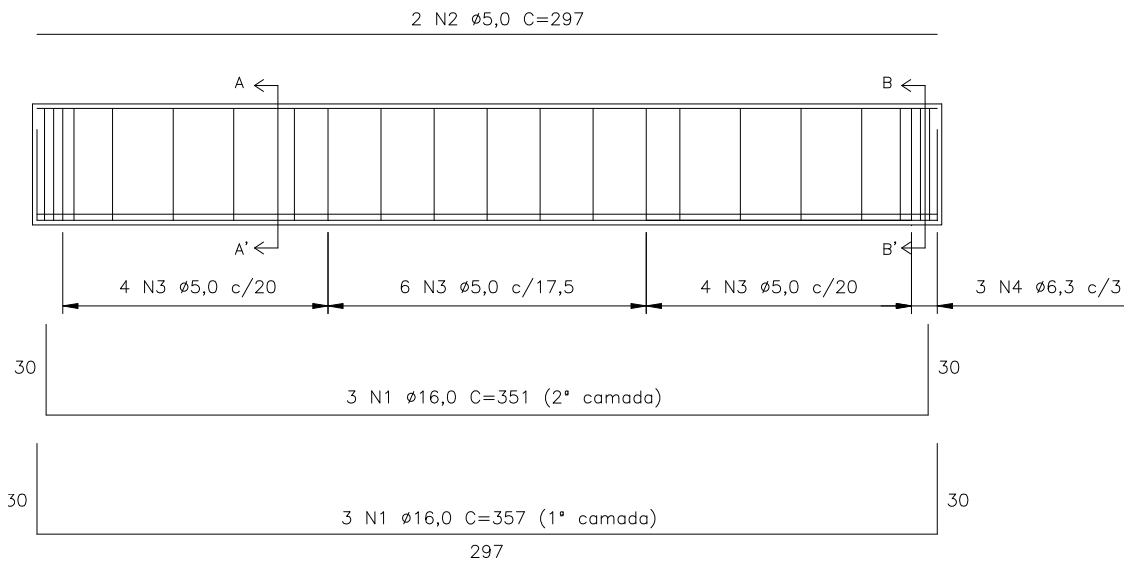


Figura 4.13 – Armadura longitudinal das vigas da Série II.

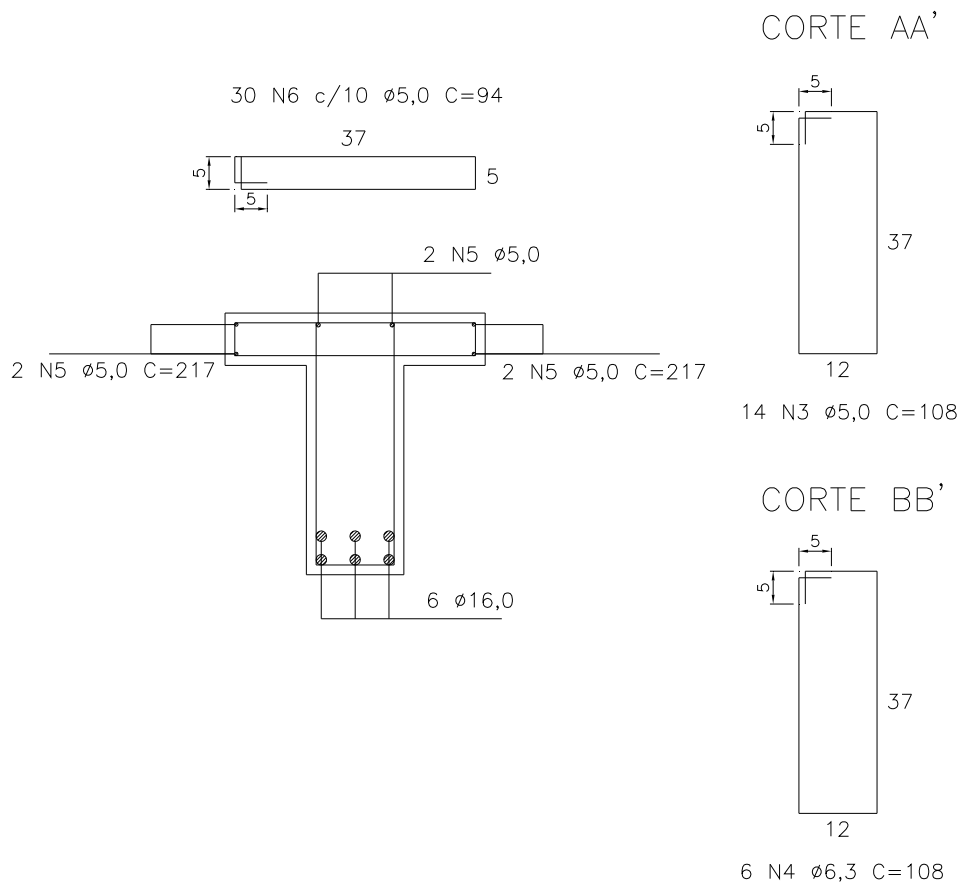


Figura 4.14 – Armaduras transversais das vigas da Série II.

Utilizando-se também a sistemática da NBR-6118 (2003) e o ACI-440 (2001) para a verificação inicial da resistência à força cortante antes do ensaio, tem-se os valores teóricos dos esforços nas vigas mostrados na Tabela 4.9, onde todos os coeficientes de segurança adotados foram iguais a unidade.

Tabela 4.9 – Força Cortante Teórica e Força de Ruptura Teórica das Vigas da Série II.

Viga	NBR-6118				ACI-440	$V_c + V_{sw} + V_f$ (kN)	P_u
	V_c (kN)	V_{sw} (kN)	V_{Rd2} (kN)	$V_c + V_{sw}$ (kN)	V_f (kN)		
VR2	72,8	31,8	438,9	104,6	–	104,6	209,2
VII-1	72,8	31,8	438,9	104,6	27,34	163,8	263,9
VII-2	72,8	31,8	438,9	104,6	42,62	152,2	304,5
VII-3	72,8	31,8	438,9	104,6	58,54	163,2	326,3

Assim como para as vigas da Série I, no trecho de flexão simples, foi colocada uma armadura transversal mínima de $\phi 5,0 \text{ c} / 17,5$ com a finalidade de se evitar uma eventual ruptura por força cortante nessa região.

4.3.4. Verificação à Flexão

Considerando-se para todas as vigas a armadura de flexão composta de seis barras de $16,0 \text{ mm}$ (Figuras 4.11, 4.12, 4.13 e 4.14) e os coeficientes de segurança iguais a unidade, a taxa mecânica dessa armadura é dada por:

$$\omega = A_s \frac{f_y}{bdf_c} = 0,319 \quad (4.7)$$

Adotando-se o procedimento de cálculo de acordo com as tabelas universais (Guimarães, 2006) e usando-se o diagrama parábola-retângulo, tem-se para flexão simples:

$$\mu_d = 0,259 \quad (4.8)$$

Os valores do momento e da força última antes dos ensaios são:

$$M_u = bd^2 f_c \mu_d = 17650 \text{ kNcm} = 176,50 \text{ kNm} \quad (4.9)$$

$$P_u = \frac{M_k}{0,438} = 402,97 \text{ kN} \quad (4.10)$$

4.3.5. Montagem das Formas, Armadura e Concretagem das Vigas

Após o pré-dimensionamento foram executadas as montagens das formas e das armaduras para posterior concretagem conforme descrito no item 4.2.1. Para a montagem das formas foram utilizadas chapas de *madeirit* e sarrafos de $1,2 \text{ cm}$ e $2,5 \text{ cm}$ de espessura, respectivamente. Foi aplicado na superfície interna das formas um agente desmoldante para a proteção, vedação e facilitar a retirada das mesmas. As Figuras 4.15, 4.16 e 4.17 ilustram os detalhes da montagem dessas formas, e as Fotos A.8, A.9 e A.10 do Anexo A apresentam os registros fotográficos das vigas antes e após a concretagem.

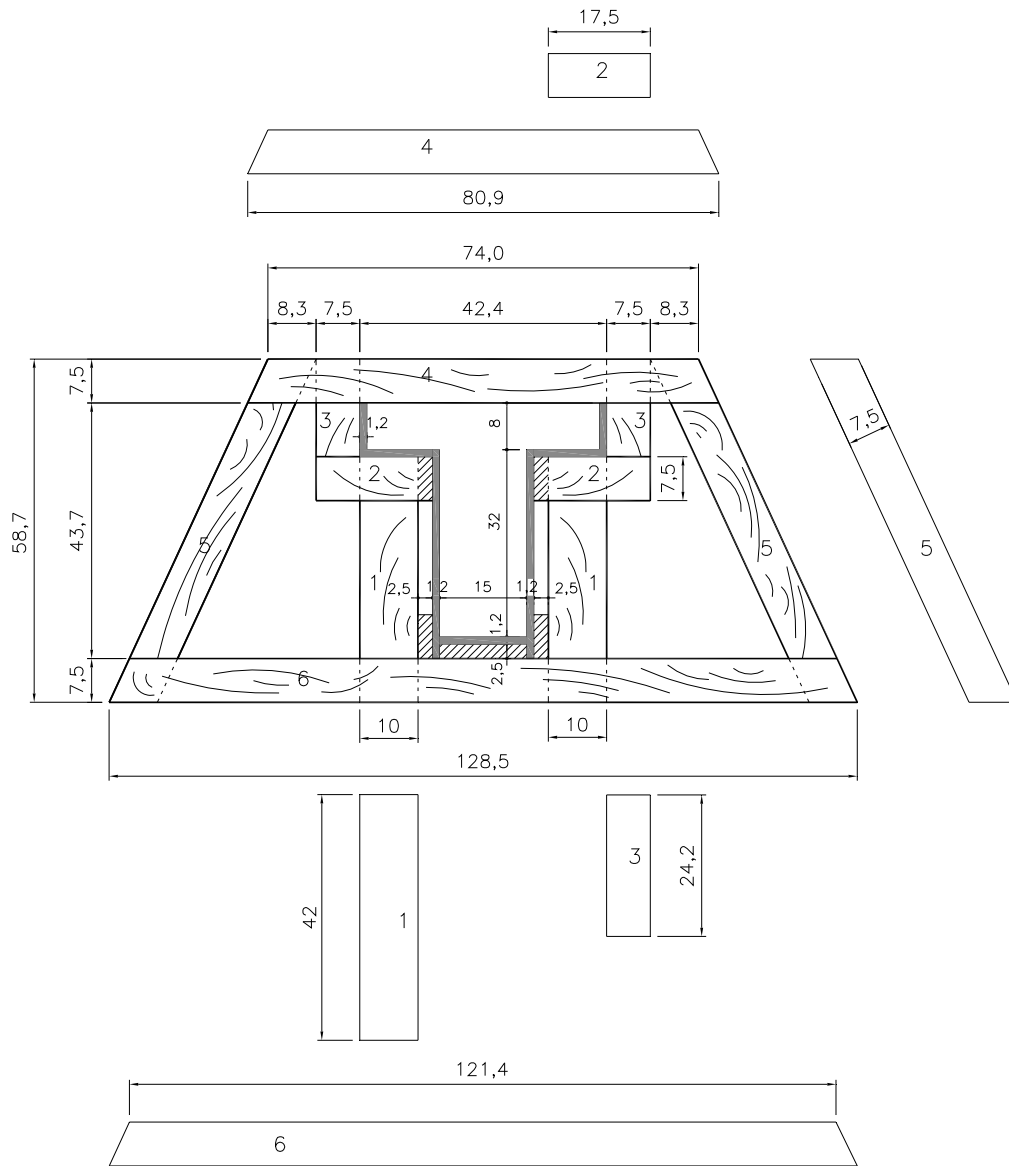


Figura 4.15 – Seção transversal AA' das formas (cotas em cm).

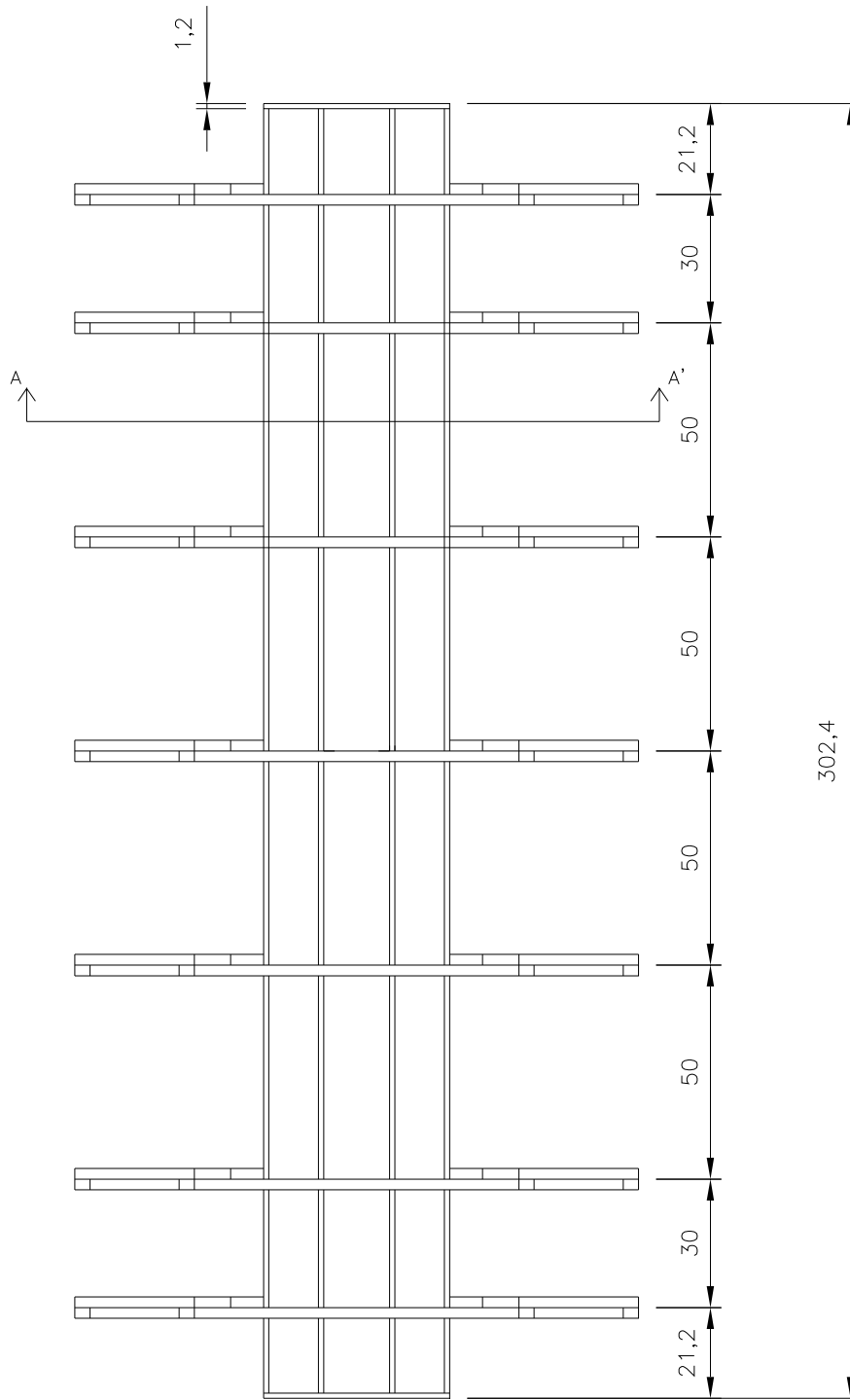


Figura 4.16 – Vista superior das formas (cotas em cm).

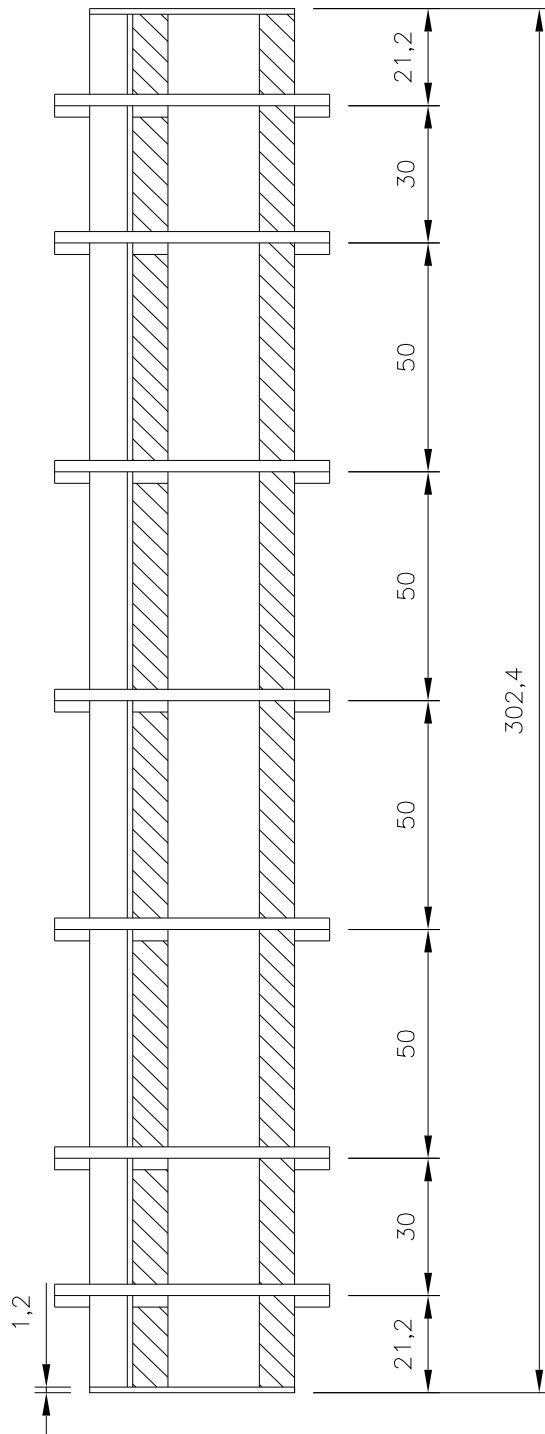


Figura 4.17 – Vista lateral das formas (cotas em cm).

4.3.6. Colagem do Reforço

Antes da colagem do CFC nas vigas de concreto foram realizados alguns preparativos bastante simples. Em alguns pontos onde haviam pequenos buracos

na superfície do concreto, foi feita uma regularização com argamassa de cimento e areia.

Em seguida foi feito o preparo do substrato de concreto para garantia de uma melhor aderência. Esta superfície foi lixada (Foto A.11 do Anexo A) com uma esmerilhadeira para se retirar a nata de cimento e outros resíduos ali existentes. Foi realizado o arredondamento das quinas para se evitar concentração de tensões nesses pontos. Após o lixamento limpou-se a superfície com um aspirador de pó, para então se executar a colagem do CFC.

Foi dosada uma determinada quantidade de resina epoxídica, conforme especificações do fabricante descrito no item 4.2.3, considerando-se 20% a mais nessa dosagem devido às perdas ocorridas durante o manuseio e aplicação deste material. Após esta aplicação as tiras de CFC em U foram coladas ao concreto utilizando-se um rolo “tira-bolha”, com o objetivo de eliminar todo o ar aprisionado. Uma outra camada de resina foi aplicada, com diferente traço da primeira, passando-se novamente o rolo sobre essa camada, finalizando-se então a formação do compósito. Os materiais de apoio utilizados para a aplicação da resina e o registro de uma viga reforçada são mostrados nas Fotos A.12 e A.13 do Anexo A.

A seqüência com a respectiva quantidade de resina aplicada para uma camada ou tira em U de CFC foi a seguinte:

- 1ª camada de resina (impregnação): componentes A + B (840 g / m²);
- 2ª camada de resina (camada de proteção): componentes A + B (600 g / m²).

Nas vigas reforçadas com duas tiras em U, a quantidade foi a seguinte:

- 1ª camada de resina (impregnação): componentes A + B (840 g / m²);
- 2ª camada de resina (impregnação): componentes A + B (840 g / m²);
- 3ª camada de resina (camada de proteção): componentes A + B (600 g / m²).

E para três tiras em U:

- 1ª camada de resina (impregnação): componentes A + B (840 g / m²);
- 2ª camada de resina (impregnação): componentes A + B (840 g / m²);
- 3ª camada de resina (impregnação): componentes A + B (840 g / m²);
- 4ª camada de resina (camada de proteção): componentes A + B (600 g / m²).

4.3.7. Instrumentação

O comportamento estrutural das vigas foi acompanhado durante os ensaios por medições das deformações das armaduras longitudinal e transversal, das deformações do reforço, das deformações do concreto, das flechas na metade do vão da viga e nas duas seções de aplicação de força.

4.3.7.1. Extensômetros Elétricos de Resistência

Para medição das deformações específicas do aço e do reforço em CFC foram utilizados extensômetros elétricos de resistência (EER) do tipo PA-06-250BA-120L da empresa EXCEL SENSORES. Para as leituras das deformações na superfície do concreto utilizou-se o EER do tipo KC-70-120-A1-11, fabricante KYOWA. A Foto A.14 do anexo A mostra os dois modelos de EER utilizados nos ensaios.

Em cada uma das vigas foram colados quatro EER em estribos diferentes. As Figuras 4.18 e 4.19 mostram o posicionamento desses extensômetros, indicados por SG, nas armaduras transversal e longitudinal das vigas das Séries I e II.

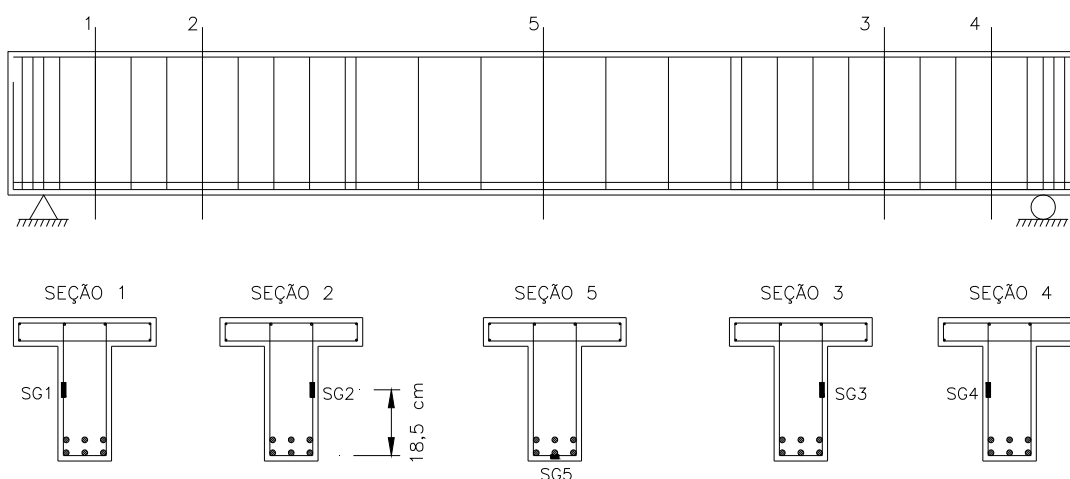


Figura 4.18 – Posicionamento dos EER colados nas armaduras das vigas da Série I.

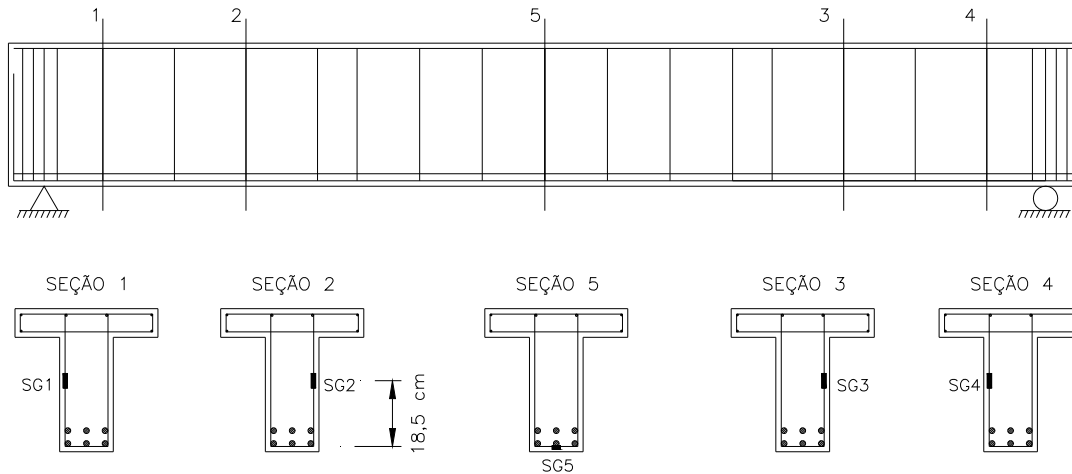
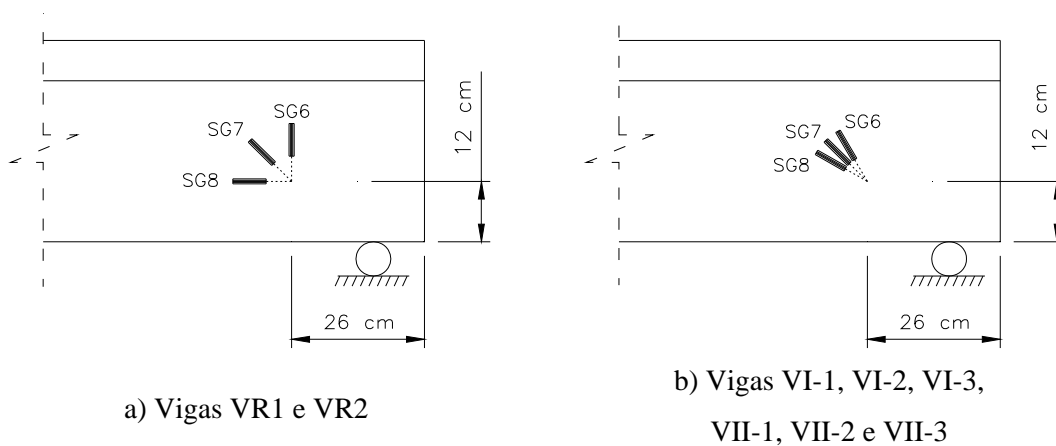


Figura 4.19 – Posicionamento dos EER colados nas armaduras das vigas da Série II.

Em todas as vigas foram colocados seis EER, três assimetricamente em cada lado da viga em forma de roseta tripla na superfície do concreto para medição das deformações na biela. O posicionamento dos EER em um dos lados vigas é mostrado na Figura 4.20, e os ângulos que os mesmos fazem em relação à horizontal são mostrados na Tabela 4.10. A roseta para as vigas com reforço (caso b) foi definida de modo a não dificultar a colagem das tiras de CFC.



a) Vigas VR1 e VR2

b) Vigas VI-1, VI-2, VI-3,
VII-1, VII-2 e VII-3

Figura 4.20 – Esquema do posicionamento dos EER colados na superfície do concreto em um dos lados da viga.

Tabela 4.10 – Posicionamento angular dos EER colados na superfície do concreto.

Vigas	EER	Ângulo em relação a horizontal	Vigas	EER	Ângulo em relação a horizontal
VR1 e VR2	SG6	90°	VI-1, VI-2, VI-3, VII-1, VII-2 e VII-3	SG6	60°
	SG7	45°		SG7	45°
	SG8	0°		SG8	30°
	SG9	90°		SG9	60°
	SG10	45°		SG10	45°
	SG11	0°		SG11	30°

Nas vigas reforçadas com CFC foram colados EER no eixo da tiras em U para medição de sua deformação específica. Os detalhes da colocação dos mesmos são mostrados na Figura 4.21. A Foto A.15 do Anexo A mostra o registro da fixação dos EER nas vigas de concreto.

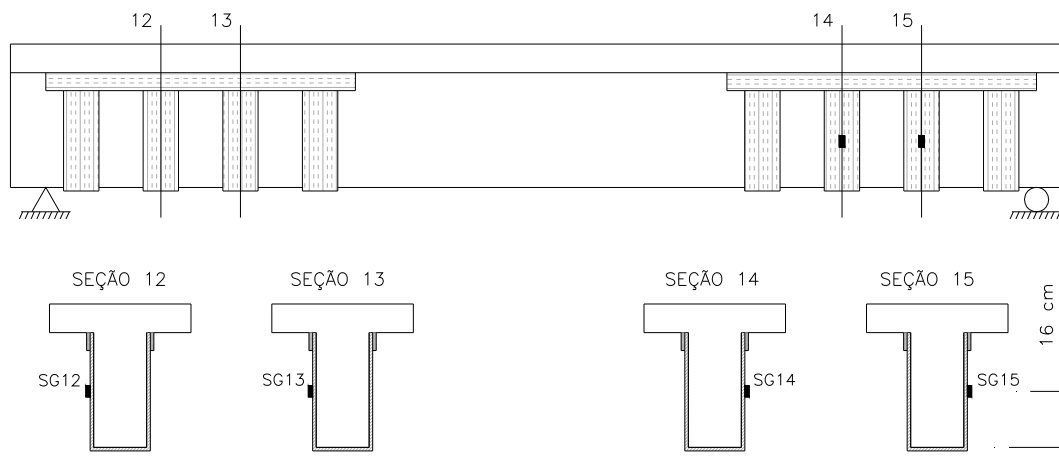


Figura 4.21 – Posicionamento dos EER colados no reforço em CFC.

Para medição das flechas em cada uma das vigas das Séries I e II utilizaram-se três transdutores lineares de posição ou deflectômetros elétricos (LVDT) posicionados conforme mostra a Figura 4.22. O registro fotográfico do posicionamento desses LVDT é apresentado na Foto A.16 do Anexo A.

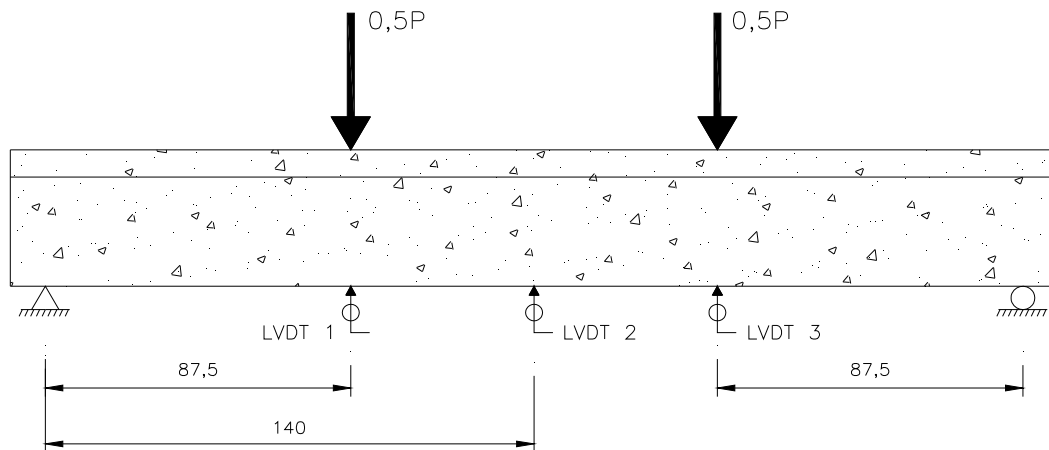


Figura 4.22 – Posicionamento dos LVDT nas vigas das Séries I e II (cotas em cm).

4.4. Descrição e Seqüência dos Ensaiois

As vigas foram ensaiadas no Laboratório de Estruturas e Materiais da PUC-Rio (LEM). As vigas de referência e duas vigas da Série II (VII-1 e VII-2) foram ensaiadas em uma estrutura de sistema aperticado (Foto A.17 do Anexo A) com capacidade para 500 kN, e as outras vigas utilizaram uma estrutura com capacidade de carga do “macaco” para até 1000 kN (Foto A.18 do Anexo A). O esquema ilustrativo da transferência de força para a viga de concreto é mostrado na Figura 4.23.

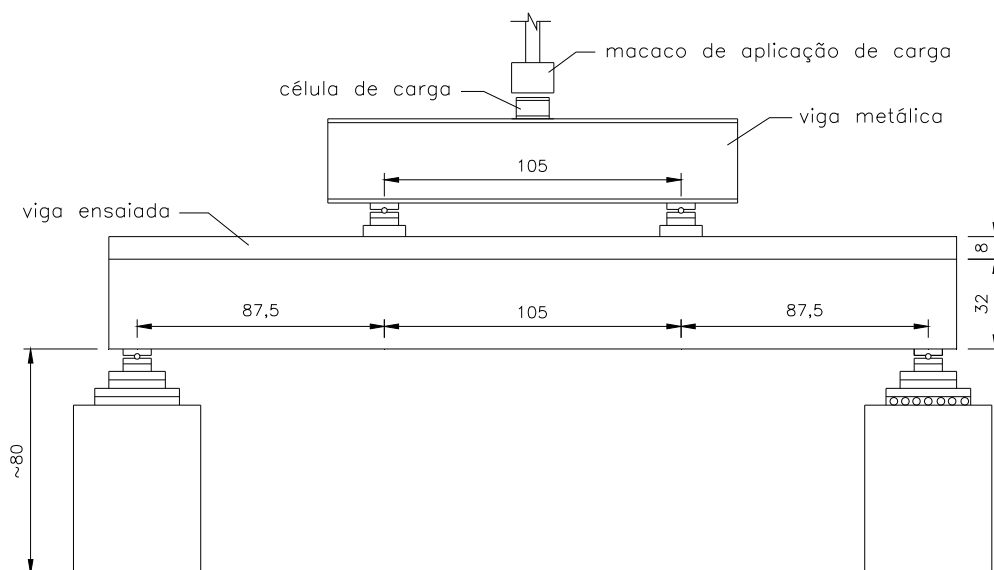


Figura 4.23 – Esquema de aplicação de força nas vigas por meio de macaco hidráulico, célula de carga e viga metálica (cotas em cm).

Primeiramente procedeu-se ao rompimento das duas vigas de referência VR1 e VR2 das Séries I e II, respectivamente, em uma única etapa cada uma.

Na etapa seguinte foram ensaiadas as vigas VII-1 e VII-2 da Série II no mesmo sistema de pórtico das vigas de referência, com capacidade para até 500 kN. O carregamento dessas vigas reforçadas com CFC foi realizado em duas etapas. A primeira com a aplicação de forças até o surgimento das primeiras fissuras diagonais. Após se atingir a força de fissuração a viga de concreto foi “travada” por meio da colocação de chapas encunhadas entre o ponto de aplicação da força e as vigas metálicas de modo a se manter a deformação e o carregamento teoricamente constantes, conforme mostra a Foto A.19 do Anexo A, e os equipamentos de aplicação de carga (“macaco” e sistema de aquisição de dados) foram então desligados. Procedeu-se na seqüência a execução do reforço com CFC por meio da colagem de tiras em U no trecho de cortante e ancoragem na alma da viga conforme mostra a Foto A.13. Após a colagem do reforço aguardou-se por um período mínimo de sete dias a cura do mesmo. A partir deste momento os ensaios foram retomados e as vigas foram então levadas até as suas respectivas rupturas.

As vigas VI-1, VI-2, VII-3 e VI-3 foram ensaiadas nessa seqüência utilizando-se o sistema apórticado com capacidade para até 1000 kN, e o esquema de “travamento” da viga para manutenção da deformação e do carregamento, quando os equipamentos de aplicação de carga fossem desligados, foi realizado por meio da colocação de perfis de aço sobre a viga metálica como mostra a Foto A.20 do Anexo A. De maneira similar às vigas VII-1 e VII-2, procedeu-se a mesma seqüência da colagem do reforço e o posterior rompimento de cada uma das vigas.

Todas as quatro vigas das Séries I e II foram levadas até a sua ruptura, quando foram lidas as deformações específicas nos EER coladas nas armaduras, na superfície do concreto e na superfície do reforço.

A força cortante resistida pelos estribos de aço e pelo concreto para as vigas de referência VR1 e VR2 é dada por:

$$V_{u,exp} = V_{s,exp} + V_{c,exp} \quad (4.11)$$

A parcela da força cortante resistida pelo CFC para as vigas VI-1, VI-2, VI-3, VII-1, VII-2 e VII-3 pode ser dada por:

$$V_{f,exp} = V_{u,exp} - (V_{s,exp} + V_{c,exp}) \quad (4.12)$$

ou pelo modelo da Treliça Generalizada

$$V_{f,exp} = f(A_f, E_f, \varepsilon_{f,exp}, d, s_f, \theta, \alpha) = \frac{0,9dA_f E_f \varepsilon_{f,exp}}{s_f} (\cot g\theta + \cot g\alpha) \operatorname{sen}\alpha \quad (4.13)$$

Os valores determinados por meio dos ensaios foram comparados com os valores teóricos da força cortante última $V_{u,teor}$ resistida por cada viga e parcelas do concreto $V_{c,teor}$, aço $V_{sw,teor}$ e CFC $V_{f,teor}$, os quais foram calculados por meio dos modelos apresentados no Capítulo 2.

5 Apresentação e Análise dos Resultados

5.1. Notas Iniciais

Neste capítulo são mostrados e analisados os resultados obtidos nos ensaios das oito vigas, comparando-os com os valores teóricos das diversas expressões apresentadas na revisão bibliográfica do Capítulo 2. Os valores efetivos das resistências do concreto, aço e CFC são analisados de acordo com os ensaios realizados nesses materiais cujos resultados são mostrados no item 4.2 do Capítulo 4.

5.2. Apresentação dos Resultados

5.2.1. Viga VR1

O ensaio da viga de referência da Série I foi realizado no dia 24/10/2006, sendo iniciado às 10 h: 15 min, e terminando às 13 h: 00 min. O incremento de força inicial foi de 1 kN, depois de 2 kN, passando para 5 kN e então para 10 kN até a sua ruptura. A primeira fissura de flexão surgiu com 70 kN, com abertura aproximada de 0,1 mm. As primeiras fissuras inclinadas na região do trecho de cortante, entre o ponto de aplicação da força e o apoio, apareceram com uma força de 95 kN, também com abertura da ordem de 0,1 mm, onde a maior deformação específica nos estribos foi registrada no SG3 com o valor de 0,067 %.

À medida que foram sendo realizados os incrementos de força, as fissuras inclinadas foram aumentando não somente em quantidade, mas também em abertura. A viga foi levada até a ruína para uma força de 407,22 kN, que ocorreu por tração diagonal no trecho entre a aplicação da força e o apoio.

A máxima deformação específica registrada nos estribos foi lida no extensômetro SG3 com o valor de 5,508 %, ou seja, acima da deformação

específica de escoamento encontrada no ensaio de tração do aço para a barra de 5,0 mm, que foi de 3,0 %. Para a deformação específica última (SG5) da barra de flexão chegou-se a um valor de 2,867 %. A flecha lida no meio do vão pelo LVDT 2 foi de 13,05 mm, e os LVDT 1 e 3 apresentaram problemas durante as suas respectivas leituras, abandonando-se esses valores.

As deformações específicas máximas lidas na superfície do concreto são mostradas na Tabela 5.1. As leituras do extensômetro SG6 foram abandonadas, pois o mesmo apresentou valores inconsistentes.

Tabela 5.1 – Deformações específicas máximas lidas na superfície do concreto da viga VR1.

Extensômetro	Ângulo em relação a horizontal	ϵ_c (%)
SG6	90°	–
SG7	45°	-0,312
SG8	0°	-0,267
SG9	90°	-0,059
SG10	45°	-0,462
SG11	0°	-0,418

As Fotos A.21 e A.22 do Anexo A mostram os detalhes da ruptura desta viga. As leituras e os gráficos das forças, deformações específicas e flechas são mostrados nos Anexos D e E.

5.2.2. Viga VI-1

A primeira etapa de carregamento da viga VI-1 foi realizada no dia 16/06/2007, sendo iniciado às 14 h: 15 min e terminado às 15 h: 15 min. O ensaio foi inicialmente realizado com incrementos de força de 5 kN e depois com 10 kN até a sua interrupção, que ocorreu para uma força de 165,41 kN, para qual já havia a presença de fissuras de flexão e de cortante, com pequenas aberturas entre 0,1 e 0,2 mm, onde a maior deformação específica nos estribos foi registrada no SG1 com o valor de 0,220 %. Durante o carregamento em torno de 165 kN a viga de

concreto foi então “travada” e mantida sob deformação e carregamento teoricamente constantes.

Após a execução do reforço realizou-se a colagem dos EER no CFC e o ensaio foi retomado no dia 25/06/2007, às 11 h: 00 min e terminado às 12 h: 30 min. Os incrementos iniciais de força foram de 10 kN até 200 kN, sendo a partir deste valor aplicada uma força em incrementos de 20 kN até o final do carregamento. Antes da ruptura observaram-se alguns “estalos”, seguidos de pequenos descolamentos em alguns pontos do reforço. O rompimento da viga ocorreu para uma força de 552,79 kN devido a ruptura por tração diagonal na região entre a aplicação da força e o apoio (“trecho de cortante”) e o imediato descolamento do reforço na região da ancoragem (extremidade do estribo em U).

A máxima deformação específica 4,246 ‰ registrada nos estribos foi lida no extensômetro SG2, ou seja, acima da deformação específica de escoamento encontrada no ensaio de tração do aço para a barra de 5,0 mm, que foi de 3,0 ‰. Para a deformação específica última (SG5) da barra de flexão chegou-se a um valor de 4,208 ‰. A flecha lida no meio do vão pelo LVDT 2 foi de 19,19 mm e os LVDT 1 e 3 apresentaram as leituras de 16,95 mm e 16,67 mm, respectivamente. A deformação específica máxima registrada nas tiras em U de CFC foi lida no SG13 com o valor de 7,398 ‰, menor que o valor encontrado no ensaio à tração deste material que foi de 11,636 ‰. Os valores das deformações específicas máximas lidas na superfície do concreto são mostrados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Deformações específicas máximas lidas na superfície do concreto da viga VI-1.

Extensômetro	Ângulo em relação a horizontal	ϵ_c (‰)
SG6	60°	-0,358
SG7	45°	-0,477
SG8	30°	-1,018
SG9	60°	-0,742
SG10	45°	-0,511
SG11	30°	-1,063

As Fotos A.23 e A.24 do Anexo A mostram os detalhes da ruptura desta viga. As leituras e os gráficos das forças, deformações específicas e flechas são mostrados nos Anexos D e E.

5.2.3. Viga VI-2

A primeira etapa de carregamento da viga VI-2 foi realizada no dia 05/07/2007, sendo iniciado às 14 h: 10 min e terminado às 15 h: 20 min. O ensaio foi inicialmente realizado com incrementos de força de 5 kN e depois com 10 kN até a sua interrupção, que ocorreu para uma força de 166,97 kN, para qual já havia a presença de fissuras de flexão e de cortante, com pequenas aberturas entre 0,1 a 0,3 m, onde a maior deformação específica nos estribos foi registrada no SG2 com o valor de 0,319 ‰. Para o carregamento em torno de 166 kN ocorreu o “travamento” dessa viga para manutenção da deformação e do carregamento da mesma quando ocorresse o desligamento dos equipamentos de aplicação de carga.

Executado o reforço em CFC e a colagem dos EER em sua superfície, o ensaio foi retomado no dia 16/07/2007 às 09 h: 55 min, e terminado às 11 h: 30 min. Os incrementos iniciais de força foram de 10 kN até 200 kN, sendo a partir deste valor aplicado incrementos de força de 20 kN até o final do ensaio. Antes da ruptura observaram-se alguns “estalos”, seguidos de pequenos descolamentos em alguns pontos do reforço. A ruptura da viga ocorreu, para uma força de 586,65 kN, por tração diagonal no “trecho de cortante”, com o descolamento do reforço na região da ancoragem.

A máxima deformação específica registrada nos estribos foi lida no extensômetro SG4 com o valor de 6,710 ‰, ou seja, acima da deformação específica de escoamento encontrada no ensaio de tração do aço para a barra de 5,0 mm que foi de 3,0 ‰. Para a deformação específica última (SG5) da barra de flexão chegou-se a um valor de 4,581 ‰. A flecha lida no meio do vão pelo LVDT 2 foi de 17,91 mm e os LVDT 1 e 3 apresentaram as leituras de 16,63 mm e 16,53 mm, respectivamente. A deformação específica máxima registrada nas tiras em U de CFC foi lida no SG13 com o valor de 4,749 ‰, também abaixo do valor encontrado no ensaio à tração deste material. Os valores das deformações

específicas máximas lidas na superfície do concreto são mostradas na Tabela 5.3. As leituras do SG7 foram desprezadas por apresentarem valores inconsistentes.

Tabela 5.3 – Deformações específicas máximas lidas na superfície do concreto da viga VI-2.

Extensômetro	Ângulo em relação a horizontal	ϵ_c (%)
SG6	60°	-0,708
SG7	45°	–
SG8	30°	-1,166
SG9	60°	-0,525
SG10	45°	-0,586
SG11	30°	-0,519

As Fotos A.25 e A.26 do Anexo A mostram os detalhes da ruptura desta viga. As leituras e os gráficos das forças, deformações específicas e flechas são mostrados nos Anexos D e E.

5.2.4. Viga VI-3

A etapa de pré-fissuração da viga VI-3 foi realizada no dia 10/08/2007, sendo iniciado às 13 h: 40 min, e terminado às 14 h: 30 min. O ensaio foi inicialmente realizado com incrementos de força de 5 kN e depois com 10 kN até a sua interrupção, que ocorreu com uma força de 168,55 kN, para qual já havia a presença de fissuras de flexão e de cortante, com pequenas aberturas entre 0,1 a 0,3 mm, onde a maior deformação específica nos estribos foi registrada no SG1 com o valor de 2,486 %. A viga foi devidamente “travada” para o carregamento em torno de 168 kN, mantida sob deformação e carregamento constantes.

Realizou-se a colagem do reforço em CFC e a fixação dos EER neste material, sendo o ensaio reiniciado no dia 20/08/2007, às 14 h: 10 min, e terminado às 15 h: 50 min. Os incrementos iniciais de força foram de 10 kN até 200 kN, sendo a partir deste valor aplicados incrementos de 20 kN até o final do carregamento. Antes da ruptura, observaram-se alguns “estalos”, seguidos de pequenos descolamentos em alguns pontos do reforço. O rompimento da viga

ocorreu por tração diagonal no “trecho de cortante” para uma força de 590,13 kN, com o descolamento do CFC na região da ancoragem.

A máxima deformação específica registrada nos estribos foi lida no extensômetro SG1 com o valor de 7,458 ‰, ou seja, acima da deformação específica de escoamento encontrada no ensaio de tração do aço para a barra de 5,0 mm que foi de 3,0 ‰. Para a deformação específica última (SG5) da barra de flexão chegou-se a um valor de 3,707 ‰. A flecha lida no meio do vão pelo LVDT 2 foi de 17,28 mm e os LVDT 1 e 3 apresentaram as leituras de 15,66 mm e 16,04 mm, respectivamente. A deformação específica máxima registrada nas tiras em U de CFC foi lida no SG15 com o valor de 4,533 ‰, também abaixo do valor encontrado no ensaio à tração deste material. Os valores das deformações máximas lidas na superfície do concreto são mostradas na Tabela 5.4. As leituras do SG6 foram desprezadas por apresentarem valores inconsistentes.

Tabela 5.4 – Deformações específicas máximas lidas na superfície do concreto da viga VI-3.

Extensômetro	Ângulo em relação a horizontal	ϵ_c (‰)
SG6	60°	–
SG7	45°	-0,180
SG8	30°	-0,699
SG9	60°	-0,368
SG10	45°	-1,386
SG11	30°	-1,011

As Fotos A.27 e A.28 do Anexo A mostram detalhes da ruptura desta viga. As leituras e os gráficos das forças, deformações específicas e flechas são mostrados nos Anexos D e E.

5.2.5. Viga VR2

O ensaio da viga de referência da série II VR2 foi realizado no dia 01/11/2006, sendo iniciado às 14 h: 00 min, e terminando às 16 h: 15 min. O incremento de força inicial foi de 5 kN, passando-se para 10 kN até a sua ruptura.

A primeira fissura de flexão surgiu com 65 kN, com abertura aproximada de 0,1 mm. As primeiras fissuras inclinadas na região do trecho de cortante apareceram com uma força em torno de 108 kN, também com abertura da ordem de 0,1 mm, onde a maior deformação específica nos estribos foi registrada no SG3 com o valor de 0,037 %.

À medida que foram sendo realizados os incrementos de força, as fissuras inclinadas foram aumentando não somente em quantidade, mas também em abertura. A viga foi levada até a ruína para uma força de 302,50 kN, que ocorreu por tração diagonal no trecho entre a aplicação da força e o apoio.

A máxima deformação específica registrada nos estribos foi lida no extensômetro SG4 com o valor de 0,86 %, sendo este menor que a deformação específica de escoamento encontrada no ensaio de tração do aço para a barra de 5,0 mm que foi de 3,0 %. Para a deformação específica última (SG5) da barra de flexão chegou-se a um valor de 2,24 %. A flecha lida no meio do vão pelo LVDT 2 foi de 12,89 mm, o LVDT 1 registrou o valor de 6,93 mm e o LVDT 3 apresentou problemas em suas leituras, sendo, portanto desprezados esses valores. Os valores das deformações específicas máximas lidas na superfície do concreto são mostradas na Tabela 5.5. As leituras dos extensômetros SG6, SG9 e SG11 foram desprezadas, pois os mesmos apresentaram valores inconsistentes.

Tabela 5.5 – Deformações específicas máximas lidas na superfície do concreto da viga VR2.

Extensômetro	Ângulo em relação a horizontal	ϵ_c (%)
SG6	90°	–
SG7	45°	-0,375
SG8	0°	-0,715
SG9	90°	–
SG10	45°	-0,432
SG11	0°	–

As Fotos A.29 e A.30 do Anexo A mostram os detalhes da ruptura desta viga. As leituras e os gráficos das forças, deformações específicas e flechas são mostrados nos Anexos D e E.

5.2.6. Viga VII-1

A etapa de pré-fissuração da viga VII-1 foi realizada no dia 09/02/2007, sendo iniciado às 13 h: 30 min, e terminado às 15 h: 00 min. O ensaio foi realizado com incrementos de força de 5 kN até a sua interrupção, que ocorreu com uma força de 111,68 kN, no qual já havia a presença de fissuras de flexão e de cortante, com pequenas aberturas da ordem de 0,1 mm, onde a maior deformação específica nos estribos foi registrada no SG1 com o valor de 0,012 ‰. O “travamento” da viga foi realizado para a força em torno de 110 kN, onde a mesma foi mantida sob deformação e carregamento constantes.

Na seqüência efetuou-se o reforço em CFC e a respectiva colagem dos EER neste material, sendo o ensaio reiniciado no dia 23/02/2007, às 14 h: 00 min, e terminado às 15 h: 45 min. Os incrementos iniciais de força foram de 10 kN até a força de 170 kN, adotando-se a partir deste valor, o incremento de força de 20 kN até o final do ensaio. Antes da ruptura observaram-se alguns “estalos”, seguidos de pequenos descolamentos em alguns pontos do reforço. O rompimento da viga ocorreu para uma força de 433,34 kN, por tração diagonal na região do cortante e o imediato descolamento do reforço na região da ancoragem.

A máxima deformação específica registrada nos estribos foi lida no extensômetro SG3 com o valor de 1,552 ‰, estando este abaixo da deformação específica de escoamento encontrada no ensaio de tração do aço para a barra de 5,0 mm que foi de 3,0 ‰. Para a deformação específica última (SG5) da barra de flexão chegou-se a um valor de 2,062 ‰. A flecha lida no meio do vão pelo LVDT 2 foi de 12,52 mm e os LVDT 1 e 3 apresentaram problemas durante as suas respectivas leituras, sendo, portanto desprezados esses valores. A deformação específica máxima registrada nas tiras em U de CFC foi lida no SG12 com o valor de 2,080 ‰, menor que o valor encontrado no ensaio à tração deste material que foi de 11,636 ‰. Os valores das deformações específicas máximas lidas na superfície do concreto são mostrados na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Deformações específicas máximas lidas na superfície do concreto da viga VII-1.

Extensômetro	Ângulo em relação a horizontal	ϵ_c (%)
SG6	60°	-0,276
SG7	45°	-0,428
SG8	30°	-0,277
SG9	60°	-0,534
SG10	45°	-0,332
SG11	30°	-0,120

As Fotos A.31 e A.32 do Anexo A mostram os detalhes da ruptura desta viga. As leituras e os gráficos das forças, deformações específicas e flechas são mostrados nos Anexos D e E.

5.2.7. Viga VII-2

A primeira etapa de carregamento da viga VII-2 foi realizada no dia 27/03/2007, sendo iniciado às 14 h: 15 min, e terminado às 15 h: 30 min. O ensaio foi realizado com incrementos de força de 5 kN até a sua interrupção, que ocorreu com uma força de 135,37 kN, para a qual já se observava a presença de fissuras de no meio do vão, e também no trecho de cortante (fissuras inclinadas), onde a maior deformação específica nos estribos foi registrada no SG2 com o valor de 0,090 %. Para a força em torno de 135 kN, a viga foi então “travada” e mantida sob deformação e carregamento teoricamente constantes, após o desligamento dos equipamentos de aplicação de carga.

Efetuuou-se a execução do reforço em CFC e depois foram fixados os EER no reforço, sendo o ensaio retomado no dia 12/04/2007, às 14 h: 30 min. Porém, no instante de aplicação da força de 385,46 kN ocorreu uma pequena torção na viga metálica que transmitia as forças lidas por meio da célula de carga para a viga de concreto, o que comprometia o andamento do ensaio. Logo se tentou por meio de um “enrijecimento” da alma da viga metálica, dar prosseguimento ao carregamento, porém, essa viga continuou apresentando deformação devido à torção. Optou-se por interromper o ensaio com a força em torno de 250 kN e

substituir a viga metálica por outra com maior resistência a torção, mantendo-se também a deformação e carregamento constantes.

Os incrementos iniciais de força foram de 10 kN até 150 kN, sendo a partir deste valor, aplicado o incremento de força igual a 20 kN até o final do carregamento. Pouco antes da ruptura observaram-se alguns “estalos”, seguidos de pequenos descolamentos em alguns pontos do reforço. O rompimento da viga ocorreu para uma força igual a 466,57 kN, por tração diagonal na região do cortante, com o descolamento do CFC na região da ancoragem.

A máxima deformação específica registrada nos estribos foi lida no extensômetro SG4 com o valor de 1,632 ‰, estando este abaixo da deformação de escoamento encontrada no ensaio de tração do aço para a barra de 5,0 mm que foi de 3,0 ‰. Para a deformação específica última (SG5) da barra de flexão chegou-se a um valor de 2,721 ‰. A flecha lida no meio do vão pelo LVDT 2 foi de 12,60 mm, o LVDT 1 registrou o valor de 10,36 mm e LVDT 3 apresentou problemas em suas leituras, sendo, portanto desprezado esses valores. A deformação específica máxima registrada nas tiras em U de CFC foi lida no SG15 com o valor de 5,463 ‰, sendo este também menor que o valor encontrado no ensaio à tração deste material. Os valores das deformações específicas máximas lidas na superfície do concreto são mostrados na Tabela 5.7. As leituras do SG8 foram desprezadas por apresentarem valores inconsistentes.

Tabela 5.7 – Deformações específicas máximas lidas na superfície do concreto da viga VII-2.

Extensômetro	Ângulo em relação a horizontal	ϵ_c (‰)
SG6	60°	-0,725
SG7	45°	-1,076
SG8	30°	–
SG9	60°	-0,625
SG10	45°	-0,756
SG11	30°	-0,700

As Fotos A.33 e A.34 do Anexo A mostram detalhes da ruptura desta viga. As leituras e os gráficos das forças, deformações específicas e flechas são mostrados nos Anexos D e E.

5.2.8. Viga VII-3

A primeira etapa de carregamento da viga VII-3 foi realizada no dia 24/07/2007, sendo iniciado às 10 h: 10 min, e terminado às 11 h: 30 min. O ensaio foi inicialmente realizado com incrementos de força de 5 kN até a sua interrupção, que ocorreu com uma carga de 140,34 kN, no qual já havia a presença de fissuras de flexão e de cortante, com pequenas aberturas entre 0,1 a 0,3 mm, onde a maior deformação específica nos estribos foi registrada no SG4 com o valor de 0,319 ‰. Durante o carregamento em torno de 140 kN a viga de concreto foi “travada” e mantida sob deformação e carregamento constantes.

Após a execução da colagem reforço e dos EER neste material, o ensaio foi retomado no dia 02/08/2007, às 14 h: 35 min, e terminado às 16 h: 10 min. Os incrementos iniciais de força foram de 10 kN até 180 kN, sendo a partir deste valor, aplicados incrementos de 20 kN até o final do ensaio. Antes da ruptura, observou-se um pequeno descolamento em uma faixa de CFC para uma carga próxima a 400 kN, seguido de alguns “estalos” no reforço. A ruptura da viga ocorreu para uma carga de 416,30 kN, por tração diagonal na região do cortante, com imediata descolamento do reforço na região da ancoragem.

A máxima deformação específica registrada nos estribos foi lida no extensômetro SG1 com o valor de 0,745 ‰, estando também abaixo da deformação específica de escoamento encontrada no ensaio de tração do aço para a barra de 5,0 mm que foi de 3,0 ‰. Para a deformação específica última (SG5) da barra de flexão chegou-se a um valor de 2,603 ‰. A flecha lida no meio do vão pelo LVDT 2 foi de 13,31 mm e os LVDT 1 e 3 apresentaram as leituras de 11,76 mm e 12,97 mm, respectivamente. A deformação específica máxima registrada nas tiras em U de CFC foi lida no SG12 com o valor de 4,428 ‰, sendo este também menor que o valor encontrado no ensaio à tração deste material. Os valores das deformações específicas máximas lidas na superfície do concreto são mostrados na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 – Deformações específicas máximas lidas na superfície do concreto da viga VII-3.

Extensômetro	Ângulo em relação a horizontal	ϵ_c (%)
SG6	60°	-0,237
SG7	45°	-0,318
SG8	30°	-0,366
SG9	60°	-0,404
SG10	45°	-0,556
SG11	30°	-0,656

As Fotos A.35 e A.36 do Anexo A mostram detalhes da ruptura desta viga. As leituras e os gráficos das forças, deformações específicas e flechas são mostrados nos Anexos D e E.

5.3. Análise dos Resultados

As Tabelas 5.9 e 5.10 mostram resumidamente os resultados das forças últimas alcançadas, as deformações específicas máximas registradas nas armaduras de flexão, nos estribos de aço e de CFC, os deslocamentos máximos verticais lidos no LVDT 2 (meio do vão), e os parâmetros registrados nos ensaios das vigas e dos materiais. Alguns valores dos ensaios dos corpos-de-prova dos materiais mostrados no item 4.2 são os seguintes: $E_{sw} = 198,51 \text{ MPa}$, $E_f = 255,18 \text{ MPa}$ e $\epsilon_{f,u} = 11,636 \%$.

Tabela 5.9 – Forças, deformações específicas, flechas últimas e modo de ruptura das vigas.

Viga	Camadas de CFC	Deformação específica máxima ε_{exp} (‰)			Flecha máxima (mm) LVDT 2	$P_{u,exp}$ (kN)	Tipo de Ruptura
		Flexão (SG5)	Estribo de aço	Estribo de CFC			
VR1	–	2,87	5,51 (SG3)	–	13,05	407,22	tração diagonal
VI-1	1	4,21	4,25 (SG2)	7,40 (SG13)	19,19	552,79	tração diagonal com descolamento imediato do CFC
VI-2	2	4,58	6,71 (SG4)	4,75 (SG13)	17,91	586,65	tração diagonal com descolamento imediato do CFC
VI-3	3	3,71	7,46 (SG1)	4,53 (SG15)	17,28	590,13	tração diagonal com descolamento imediato do CFC
VR2	–	2,24	0,86 (SG4)	–	12,89	302,50	tração diagonal
VII-1	1	2,06	1,55 (SG3)	2,08 (SG12)	12,52	433,34	tração diagonal com descolamento imediato do CFC
VII-2	2	2,72	1,63 (SG4)	5,46 (SG15)	12,60	466,57	tração diagonal com descolamento imediato do CFC
VII-3	3	2,60	0,75 (SG1)	4,43 (SG12)	13,31	416,30	tração diagonal com descolamento imediato do CFC

Para as vigas da Série I (VR1, VI-1, VI-2 e VI-3) observou-se uma boa consistência nos resultados conforme mostram os dados apresentados na Tabela 5.9, com deformações específicas máximas registradas na armadura transversal para o aço da mesma ordem da observadas para o CFC. Consta-se também que para esta Série todos os estribos de aço escoaram.

Na Série II (VR2, VII-1, VII-2 e VII-3), as deformações específicas nos estribos de aço não atingiram o escoamento e apresentaram valores bem inferiores que as das tiras de CFC, com exceção da deformação específica máxima do

reforço da viga VII-1 lido pelo SG12 que apresentou um valor bem inferior em relação às outras vigas.

Pela Tabela 5.9 observou-se que as deformações específicas últimas da armadura de flexão em todas as vigas ficaram acima da deformação específica de escoamento registrada nos ensaios de tração da barra de 16,0 mm, que foi de 1,99%. Nas vigas VI-1 e VI-2, apesar das deformações específicas últimas apresentaram valores um pouco acima da deformação de ruptura encontrada no mesmo ensaio de tração dessa barra de aço, que foi de 4,14%, as suas rupturas não ocorreram por flexão e sim por tração diagonal.

Tabela 5.10 – Força cortante última e parâmetros das vigas.

Viga	$V_{u,exp}$ (kN)	f_c (kN)	ρ_{sw} (%)	t_f (mm)	ρ_f (%)	$\frac{V_{u,exp}}{V_{u,ref}}$
VR1	203,61	48,44	0,262	–	–	–
VI-1	276,40	51,73	0,262	0,122	0,072	1,36
VI-2	293,33	51,73	0,262	0,244	0,145	1,44
VI-3	295,07	52,30	0,262	0,366	0,217	1,45
VR2	151,25	49,92	0,131	–	–	–
VII-1	216,67	50,94	0,131	0,122	0,072	1,43
VII-2	233,29	51,73	0,131	0,244	0,145	1,54
VII-3	208,15	52,30	0,131	0,366	0,217	1,38
Média						1,43
Desvio padrão						0,07
Coef. de var. (%)						4,55

Por meio dos dados da Tabela 5.10 observa-se que houve um ganho considerável de resistência à força cortante para as vigas reforçadas com CFC em relação a sua respectiva viga de referência, cuja média de acréscimo foi de 43%. Porém, a viga VII-3 com três camadas de tiras em U, registrou uma força última inferior às vigas VII-1 e VII-2. Este fato provavelmente ocorreu devido a uma deficiência na colagem da terceira camada de algumas tiras de CFC para esta viga.

Nas Figuras 5.1 e 5.2 são mostrados os gráficos comparativos entre as forças cortantes últimas das Séries I e II.

Os valores da resistência do concreto mostrados na Tabela 5.11 apresentaram uma pequena variação de 7,97 % entre o menor (48,44 MPa) e o maior valor (52,30 MPa) registrados durante o ensaio de cada viga.

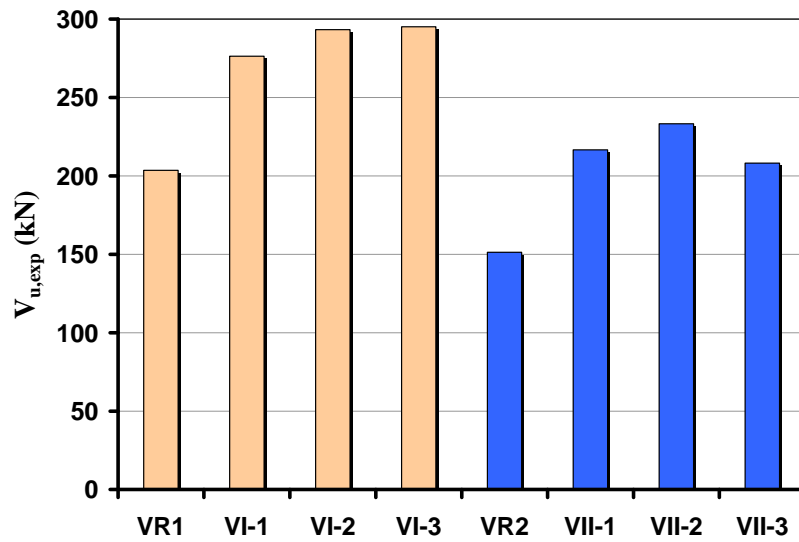


Figura 5.1 – Forças cortantes últimas registradas nos ensaios das vigas.

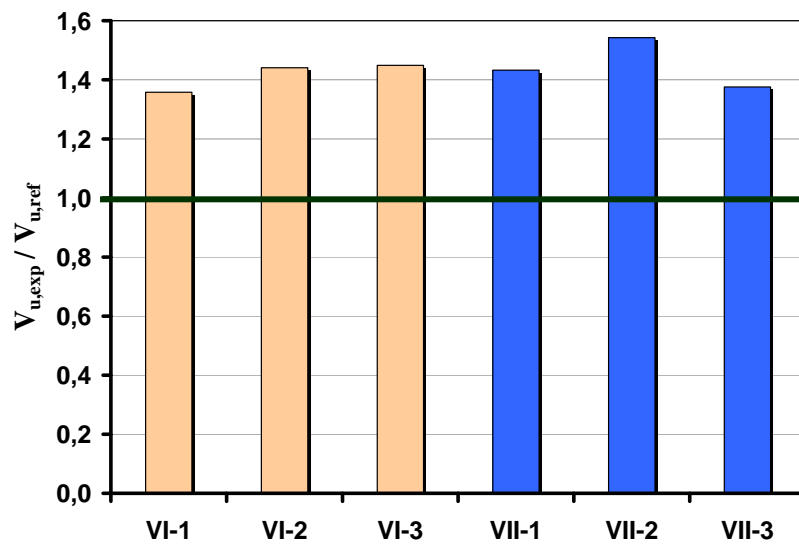


Figura 5.2 – Razão entre a força cortante última da viga reforçada e da viga de referência.

5.3.1. Parcelas Resistidas pelo Aço, Concreto e CFC

Para a determinação das parcelas da força cortante última relativas ao concreto, aço e CFC foi realizada a análise considerando-se dois ângulos para a inclinação da biela: o ângulo das fissuras θ_{CR} e o ângulo da deformação específica principal θ_ε obtido por medições do estado de deformação da viga.

O ângulo médio de fissuração θ_{CR} no “trecho de cortante” foi determinado digitalmente com a utilização de uma foto digital para cada uma das vigas ensaiadas e o software *Autocad 2007*, na qual interpolou-se graficamente uma reta sobre a fissura inclinada principal (Figura 5.3). Os valores dos ângulos obtidos para cada viga são mostrados na Tabela 5.11.

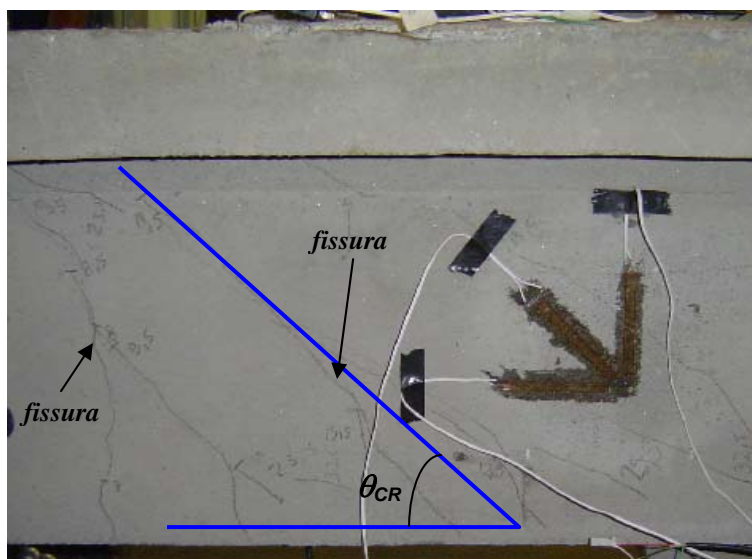


Figura 5.3 – Ângulo médio de fissuração no “trecho de cortante” da viga VR1 medido por meio digital.

O ângulo de inclinação da deformação específica principal de compressão no concreto θ_ε para cada lado da viga foi determinado em função das deformações lidas pelos EER (roseta tripla), e foi calculado por meio das seguintes expressões da resistência dos materiais:

a) Vigas VR1 e VR2

$$\theta_\varepsilon = \frac{1}{2} \arctg \left(\frac{\varepsilon_0 - 2\varepsilon_{45} + \varepsilon_{90}}{\varepsilon_0 - \varepsilon_{90}} \right) \quad (5.1)$$

b) Vigas VI-1, VI-2, VI-3, VII-1, VII-2 e VII-3

$$\varepsilon_{30} = \varepsilon_x \cos^2 \theta_{30} + \varepsilon_y \sin^2 \theta_{30} + \gamma_{xy} \sin \theta_{30} \cos \theta_{30} \quad (5.2)$$

$$\varepsilon_{45} = \varepsilon_x \cos^2 \theta_{45} + \varepsilon_y \sin^2 \theta_{45} + \gamma_{xy} \sin \theta_{45} \cos \theta_{45} \quad (5.3)$$

$$\varepsilon_{60} = \varepsilon_x \cos^2 \theta_{60} + \varepsilon_y \sin^2 \theta_{60} + \gamma_{xy} \sin \theta_{60} \cos \theta_{60} \quad (5.4)$$

Resolvendo-se este sistema linear com três equações e três incógnitas, tem-se:

$$\theta_\varepsilon = \frac{1}{2} \arctg \left(\frac{\gamma_{xy}}{\varepsilon_x - \varepsilon_y} \right) \quad (5.5)$$

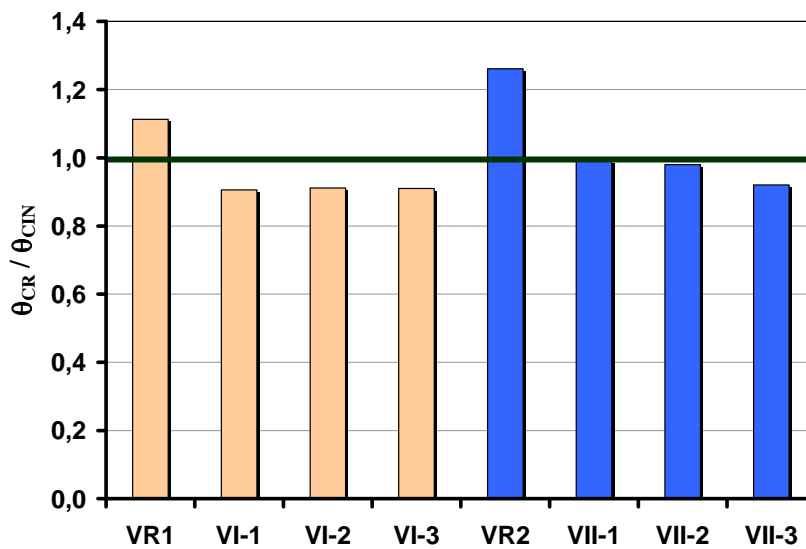
Para uma análise comparativa com o ângulo θ_{CR} determinou-se o ângulo teórico da fissura diagonal (fissura deslizante) θ_{CIN} por meio do modelo cinemático apresentado no item 3.3.9 (expressão 3.124). A comparação entre θ_{CR} e θ_{CIN} tem como objetivo avaliar a precisão da hipótese assumida no modelo cinemático, onde a linha de ruptura por força cortante é a fissura diagonal.

A Tabela 5.11 apresenta os valores dos ângulos θ_{CR} , θ_ε e θ_{CIN} , e a razão entre θ_{CR} e θ_{CIN} . O resultado do ângulo θ_ε para a viga VR2 foi desprezado em função dos EER SG6, SG9 e SG11 apresentarem leituras inconsistentes. A Figura 5.4 mostra graficamente a relação entre os ângulos θ_{CR} e θ_{CIN} .

Tabela 5.11 – Ângulos θ_{CR} , θ_ε e θ_{CIN} , e a razão $\frac{\theta_{CR}}{\theta_{CIN}}$.

Viga	θ_{CR} (°)	θ_ε (°)	θ_{CIN} (°)	$\frac{\theta_{CR}}{\theta_{CIN}}$	$\frac{\theta_{CR}}{\theta_{CIN}}^{(1)}$
VR1	40	30,37	35,94	1,11	–
VI-1	39	33,63	43,06	0,91	0,91
VI-2	41	40,04	45,00	0,91	0,91
VI-3	42	41,38	46,16	0,91	0,91
VR2	34	–	26,96	1,26	–
VII-1	38	44,97	38,30	0,99	0,99
VII-2	40	41,93	40,82	0,98	0,98
VII-3	39	43,75	42,36	0,92	0,92
Média	39,13	39,44	39,82	1,05	0,94
Desvio padrão	2,42	5,41	6,18	0,13	0,04
Coef. de var. (%)	6,18	13,71	15,53	12,69	4,15

⁽¹⁾ Desprezados os valores das vigas VR1 e VR2 nos cálculos da média, desvio padrão e C.V.

Figura 5.4 – Razão entre os ângulos θ_{CR} e θ_{CIN} .

Com os valores dos ângulos θ_{CR} e θ_ε determinado em cada ensaio, calculou-se o valor experimental da parcela resistida pelo reforço de CFC $V_{f,exp}$ por meio da expressão 4.13, que é baseada na **Treliça Generalizada**. Tomando-se

como base essa teoria, a parcela referente ao aço (estribos) $V_{sw,exp}$ é determinada pela expressão 3.4, considerando-se $f_y = 595,5$ MPa e:

$$z = 0,9d \quad (5.6)$$

A parcela resistida pelo concreto é determinada pela seguinte expressão:

$$V_{c,exp} = V_{u,exp} - V_{f,exp} - V_{sw,exp} \quad (5.7)$$

A Tabela 5.12 e os gráficos das Figuras 5.5, 5.7 e 5.8 mostram os valores das parcelas $V_{c,exp}$, $V_{sw,exp}$, e $V_{f,exp}$ em relação aos ângulos θ_{CR} e θ_ϵ .

Tabela 5.12 – Parcelas experimentais da força cortante última (CFC, aço e concreto) considerando-se os ângulos θ_{CR} e θ_ϵ .

Viga	θ_{CR}			θ_ϵ		
	$V_{f,exp}$ (kN)	$V_{sw,exp}$ (kN)	$V_{c,exp}$ (kN)	$V_{f,exp}$ (kN)	$V_{sw,exp}$ (kN)	$V_{c,exp}$ (kN)
VR1	–	88,79	114,82	–	127,14	76,47
VI-1	80,55	92,01	103,84	98,06	112,01	66,32
VI-2	96,33	85,71	111,28	99,66	88,67	105,00
VI-3	133,16	82,75	79,16	136,09	84,57	74,40
VR2	–	55,23	96,02	–	–	–
VII-1	23,47	47,68	145,52	18,36	37,29	161,02
VII-2	114,80	44,40	74,09	107,25	41,48	84,56
VII-3	144,63	46,00	17,52	122,34	38,91	46,89

Para o ângulo θ_{CR} a parcela $V_{f,exp}$ apresentou um aumento de resistência de uma viga para outra dentro da mesma série, conforme mostram os dados da Tabela 5.12 e a Figura 5.5, exceto para a viga VII-1 que em função do baixo valor da deformação específica última do CFC apresentou um valor inferior se comparado às demais. Este fato pode ter ocorrido devido a um descolamento prematuro não somente na região da ancoragem do CFC, mas também ao longo de uma tira (estribo) do mesmo. A Figura 5.6 mostra a região de descolamento do reforço quando da ruptura da viga por tração diagonal.

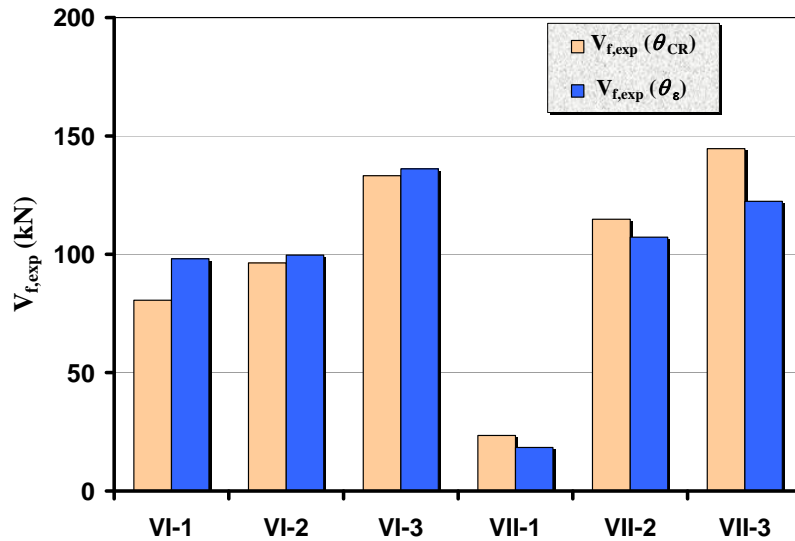


Figura 5.5 – Parcelas da força cortante última resistida pelo CFC considerando-se os ângulos θ_{CR} e θ_{ϵ} .

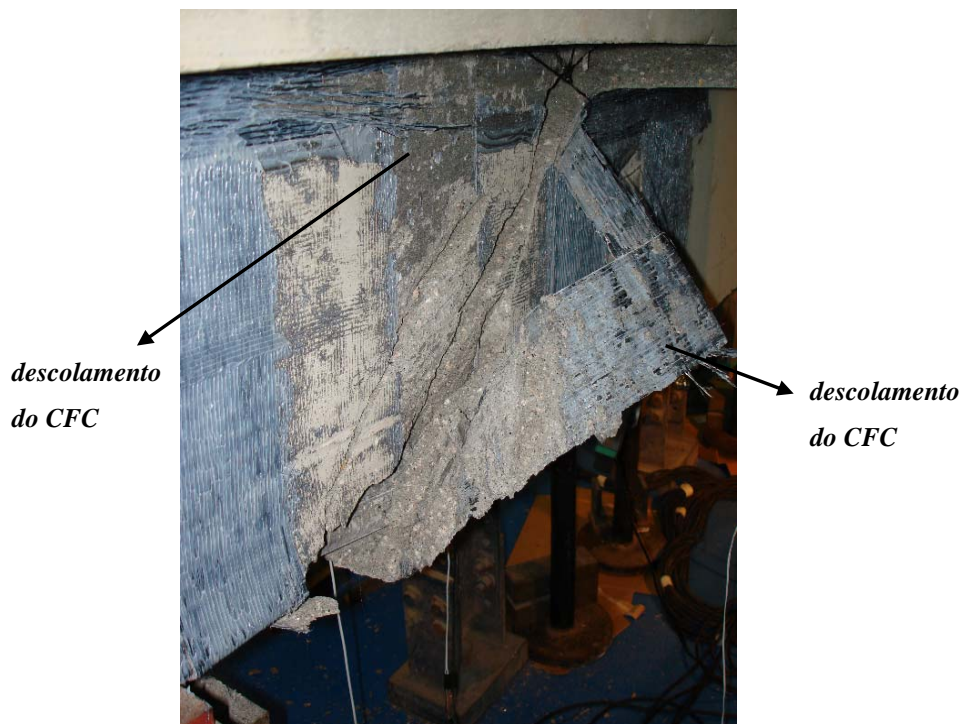


Figura 5.6 – Região de descolamento do CFC da superfície de concreto da viga VII-1.

A Figura 5.7 mostra que parcela resistida pelo aço $V_{sw,exp}$ apresentou certa constância em seus valores para as vigas dentro da mesma série, sendo os valores da Série I bem superiores aos da Série II para ambos os ângulos θ_{ϵ} e θ_{CR} .

Na parcela referente ao concreto $V_{c,exp}$ constata-se para a Série I considerando-se ambos os ângulos θ_ε e θ_{CR} , que o houve um decréscimo dessa parcela em relação à viga de referência. Na Série II a parcela $V_{c,exp}$ apresenta um decréscimo desse valor para as vigas VII-2 e VII-3 quando comparados à viga VII-1 conforme mostrado na Figura 5.8.

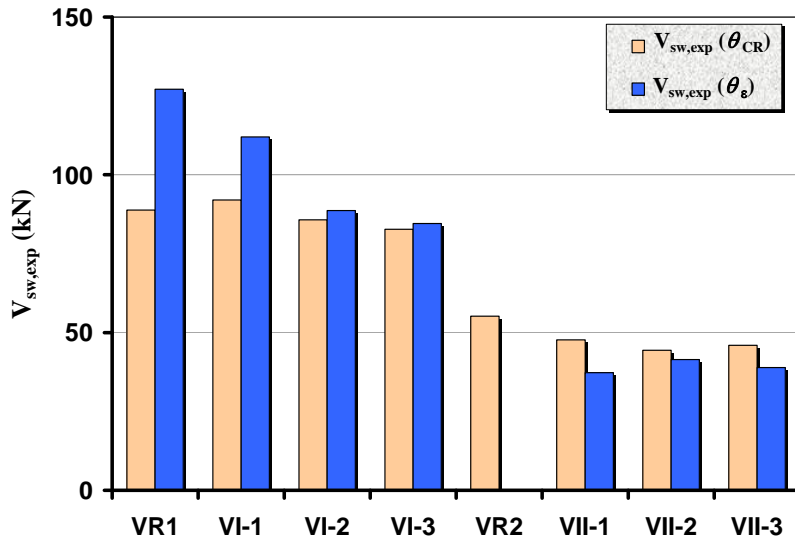


Figura 5.7 – Parcelas da força cortante última resistida pelo aço considerando-se os ângulos θ_{CR} e θ_ε .

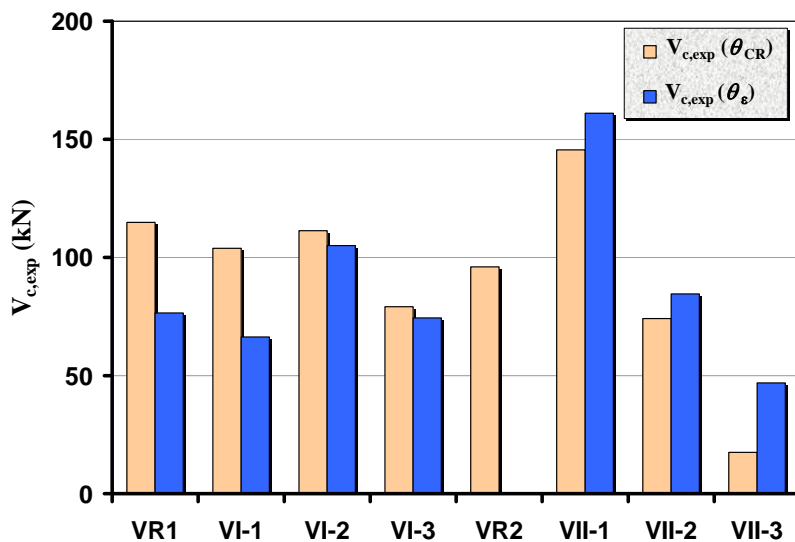


Figura 5.8 – Parcelas da força cortante última resistida pelo concreto considerando-se os ângulos θ_{CR} e θ_ε .

Para a determinação dos valores teóricos da força cortante foram adotados os resultados das sistemáticas de cálculo do modelo cinemático, o ACI-318 (1999) e ACI-440 (2001), e o de Colloti *et al.* (2004), no qual se observou pela Tabela 5.13 que o modelo cinemático apresentou um coeficiente de variação, C.V. = 7,31%, sendo este inferior ao modelo do ACI, C.V. = 9,94%, e o de Colloti, C.V. = 13,81%. As rotinas de cálculo desses modelos são descritas no Anexo F.

A Figura 5.9 mostra que os valores do cinemático estão bem próximos dos resultados experimentais, onde a média que relaciona esses resultados foi de 1,09, seguido do modelo do ACI-440 (2001) e o de Colloti *et al.* (2004). Nesta figura observa-se que para as vigas com menor taxa de armadura transversal interna (Série II) os valores do modelo de Colloti *et al.* (2004) são menos conservativos do que os valores calculados para as vigas da Série I.

Tabela 5.13 – Força cortante teórica segundo o modelo cinemático, o modelo do ACI-318 (1999) e ACI-440 (2001), e modelo de Colloti *et al.* (2004).

Viga	$V_{u,exp}$ (kN)	Modelo Cinemático		ACI-318 (1999) ACI-440 (2001)		Colloti <i>et al.</i> (2004)	
		$V_{u,teor}$ (kN)	$\frac{V_{u,exp}}{V_{u,teor}}$	$V_{u,teor}$ (kN)	$\frac{V_{u,exp}}{V_{u,teor}}$	$V_{u,teor}$ (kN)	$\frac{V_{u,exp}}{V_{u,teor}}$
VR1	203,61	207,64	0,98	189,96	1,07	–	–
VI-1	276,40	250,07	1,11	223,87	1,23	215,62	1,28
VI-2	293,33	259,83	1,13	254,20	1,15	225,49	1,30
VI-3	295,07	266,85	1,11	274,70	1,07	225,62	1,31
VR2	151,25	141,98	1,07	150,19	1,01	–	–
VII-1	216,67	201,00	1,08	181,63	1,19	207,41	1,04
VII-2	233,29	215,43	1,08	212,81	1,10	220,58	1,06
VII-3	208,15	224,49	0,93	233,31	0,89	220,75	0,94
Média		1,06	–	1,09	–	1,16	–
Desvio padrão		0,07	–	0,11	–	0,16	–
Coef. de var. (%)		6,55	–	9,94	–	13,81	–

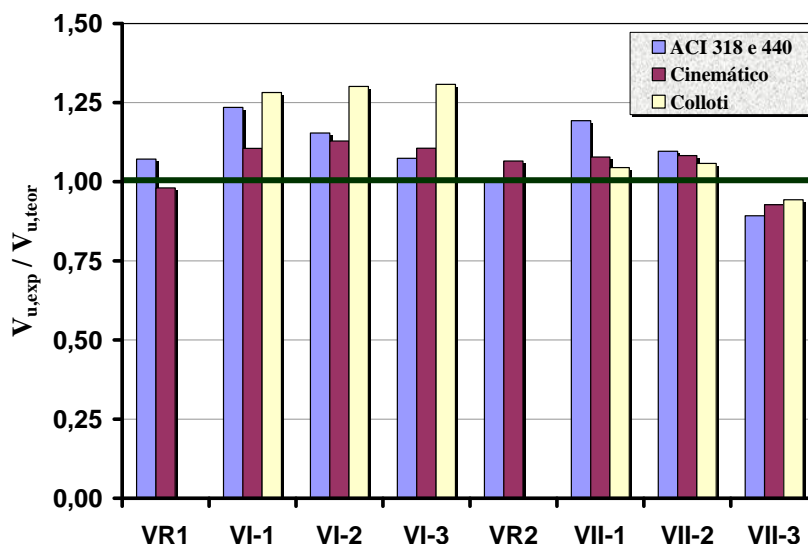


Figura 5.9 – Razão entre os valores da força cortante última *versus* os valores da força cortante teórica segundo o ACI-318 (1999) e o ACI-440 (2001), o modelo cinemático e o modelo de Colloti *et al.* (2004).

Os valores teóricos segundo o ACI-318 (1999) e o ACI-440 (2001) para as parcelas da força cortante resistidas pelo concreto, aço e CFC, e as suas respectivas razões com os valores experimentais, para os ângulos θ_{CR} e θ_{ε} , são mostrados nas Tabelas 5.14 e 5.15, e nas Figuras 5.10 e 5.11. Conforme descrito nos itens 3.4 e 3.7, as parcelas de $V_{sw,theor}$ e $V_{f,theor}$ desse modelo foram calculadas considerando-se o ângulo θ igual à 45° .

Constata-se, para ambos os ângulos θ_{CR} e θ_{ε} , que as razões entre os valores últimos e teóricos da parcela da força cortante referente ao aço V_{sw} apresentam coeficientes de variação (C.V.) de regulares a bom, ou seja, abaixo de 25%, o que mostra a boa consistência da sistemática do ACI para a determinação dessa parcela.

Também segundo o ACI para as razões entre as parcelas das forças últimas e teóricas relativas ao concreto V_c e ao CFC V_f , os valores mostrados nas Tabelas 5.14 e 5.15 são bastante dispersos, com coeficientes de variação acima de 30%.

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} .

Viga	$V_{c,teór}$ (kN)	$V_{sw,teór}$ (kN)	$V_{f,teór}$ (kN)	$\frac{V_{c,exp}}{V_{c,teór}}$	$\frac{V_{sw,exp}}{V_{sw,teór}}$	$\frac{V_{f,exp}}{V_{f,teór}}$
VR1	107,18	82,78	–	1,07	1,07	–
VI-1	110,76	82,78	30,33	0,94	1,11	2,66
VI-2	110,76	82,78	60,66	1,00	1,04	1,59
VI-3	111,36	82,78	80,55	0,71	1,00	1,65
VR2	108,80	41,39	–	0,88	1,33	–
VII-1	109,91	41,39	30,33	1,32	1,15	0,77
VII-2	110,76	41,39	60,66	0,67	1,07	1,89
VII-3	111,36	41,39	80,55	0,16	1,11	1,80
Média				0,84	1,11	1,73
Desvio padrão				0,35	0,10	0,60
Coef. de var. (%)				40,97	9,17	35,02

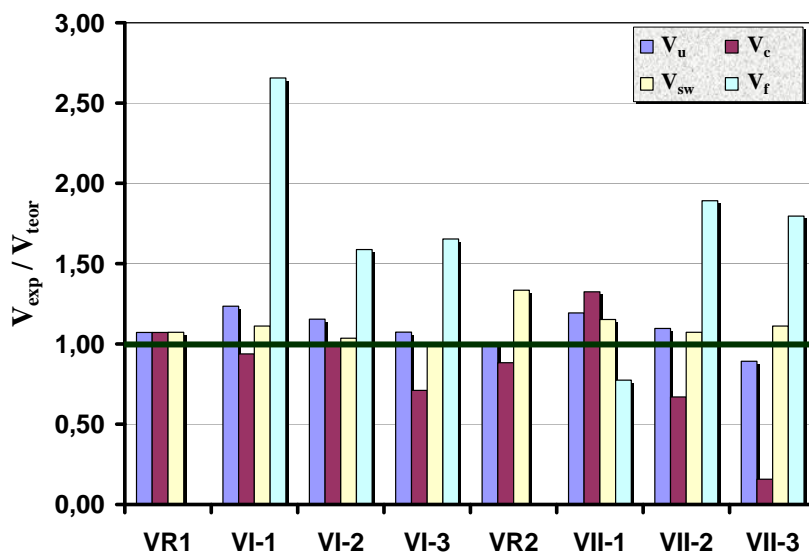
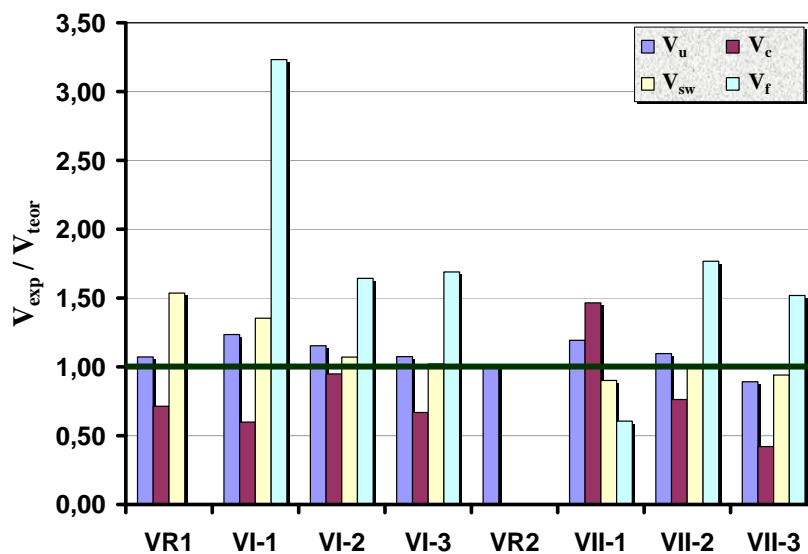
Figura 5.10 – Razão entre os valores da força cortante última versus os valores da força cortante teórica segundo o ACI-318 (1999) e o ACI-440 (2001) considerando-se o ângulo θ_{CR} .

Tabela 5.15 – Parcelas teóricas da força cortante última segundo o ACI-318 (1999) e o ACI-440 (2001) considerando-se o ângulo θ_c .

Viga	$V_{c,teor}$ (kN)	$V_{sw,teor}$ (kN)	$V_{f,teor}$ (kN)	$\frac{V_{c,exp}}{V_{c,teor}}$	$\frac{V_{sw,exp}}{V_{sw,teor}}$	$\frac{V_{f,exp}}{V_{f,teor}}$
VR1	107,18	82,78	–	0,71	1,54	–
VI-1	110,76	82,78	35,42	0,60	1,35	3,23
VI-2	110,76	82,78	70,84	0,95	1,07	1,64
VI-3	111,36	82,78	106,26	0,67	1,02	1,69
VR2	108,80	41,39	–	–	–	–
VII-1	109,91	41,39	35,42	1,47	0,90	0,61
VII-2	110,76	41,39	70,84	0,76	1,00	1,77
VII-3	111,36	41,39	106,26	0,42	0,94	1,52
Média				0,80	1,12	1,74
Desvio padrão				0,34	0,24	0,85
Coef. de var. (%)				42,07	21,09	48,54

Figura 5.11 – Razão entre os valores da força cortante última versus os valores da força cortante teórica segundo o ACI-318 (1999) e o ACI-440 (2001) considerando-se o ângulo θ_c .

Além da sistemática do ACI-440 (2001), a parcela da força cortante teórica resistida pelo CFC foi analisada segundo os modelos da FIB-Bulletin 14 (2001), Khalifa e Nanni (2002) e Chen e Teng (2002), e os resultados dessas análises em

relação à parcela experimental $V_{f,exp}$ considerando-se os ângulos medidos nos ensaios θ_{CR} e θ_ε são mostrados nas Tabelas 5.16 e 5.17. Nessas tabelas o valor de $V_{f,teor}$ das sistemáticas da FIB–Bulletin 14 (2001) e de Chen e Teng (2002) foi determinado utilizando-se os ângulos θ_{CR} e θ_ε , enquanto para o modelo de Khalifa e Nanni (2002) o ângulo é de 45°. As rotinas de cálculo desses modelos são descritas no Anexo F.

Para uma melhor análise comparativa os gráficos das Figuras 5.12 e 5.13 são acrescidos dos resultados do modelo do ACI-440 (2001) apresentados nas Tabelas 5.14 e 5.15.

Constatam-se para a maioria dos modelos que os valores da parcela teórica resistida pelo CFC $V_{f,teor}$ são maiores que os resultados experimentais, onde também ocorre uma grande dispersão na relação $\frac{V_{f,exp}}{V_{f,teor}}$ considerando-se os ângulos θ_{CR} e θ_ε , sendo que o coeficiente de variação mínimo encontrado foi de 34,70% para o modelo da FIB-Bulletin 14 (2001).

Os dados das Tabelas 5.16 e 5.17 mostram que os resultados fornecidos pelos modelos da FIB–Bulletin 14 (2001) e de Chen e Teng (2002) usando-se os ângulos θ_{CR} e θ_ε fornecem, para uma mesma viga, a razões entre o valor teórico e experimental sempre iguais. Isto ocorre, pois as fórmulas para o cálculo de $V_{f,exp}$ e $V_{f,teor}$ são baseadas no modelo da Treliça Generalizada, e o ângulo θ não é fixo. Nas sistemáticas do ACI-440 (2001) e Khalifa e Nanni (2002), onde o ângulo θ é igual à 45° para o cálculo de $V_{f,teor}$, as razões $\frac{V_{f,exp}}{V_{f,teor}}$ são diferentes para uma mesma viga.

Para ambos os ângulos considerados os gráficos das Figuras 5.12 e 5.13 mostram que todos os modelos apresentaram resultados conservativos, exceto para a viga VII-1, que devido ao baixo valor de sua deformação específica registrada no ensaio, apresentou a relação $\frac{V_{f,exp}}{V_{f,teor}}$ menor que a unidade.

Tabela 5.16 – Valores teóricos da parcela resistida pelo CFC segundo diversos modelos considerando-se o ângulo θ_{CR} .

Viga	$V_{f,teor}$	$V_{f,teor}$	$V_{f,teor}$	$\frac{V_{f,exp}}{V_{f,teor}}$	$\frac{V_{f,exp}}{V_{f,teor}}$	$\frac{V_{f,exp}}{V_{f,teor}}$
	(kN) FIB	(kN) Khalifa	(kN) Teng	FIB	Khalifa	Teng
VI-1	62,98	45,49	49,41	1,28	1,77	1,63
VI-2	80,44	71,30	62,10	1,20	1,35	1,55
VI-3	93,20	72,61	70,93	1,43	1,83	1,88
VII-1	65,08	45,49	51,00	0,36	0,52	0,46
VII-2	83,33	71,30	64,33	1,38	1,61	1,78
VII-3	103,63	72,61	78,87	1,40	1,99	1,83
Média				1,17	1,51	1,52
Desvio padrão				0,41	0,53	0,54
Coef. de var. (%)				34,70	35,35	35,14

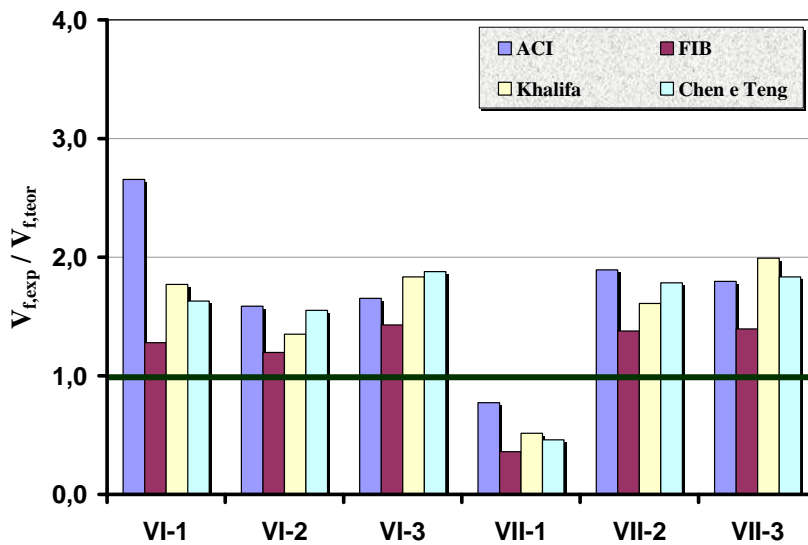


Figura 5.12 – Razão entre a parcela experimental resistida pelo CFC versus o seu valor teórico segundo diversos modelos considerando-se o ângulo θ_{CR} .

Tabela 5.17 – Valores teóricos da parcela resistida pelo CFC segundo diversos modelos considerando-se o ângulo θ_c .

Viga	$V_{f,teor}$	$V_{f,teor}$	$V_{f,teor}$	$\frac{V_{f,exp}}{V_{f,teor}}$	$\frac{V_{f,exp}}{V_{f,teor}}$	$\frac{V_{f,exp}}{V_{f,teor}}$
	(kN) FIB	(kN) Khalifa	(kN) Teng	FIB	Khalifa	Teng
VI-1	76,68	45,49	60,16	1,28	2,16	1,63
VI-2	83,21	71,30	64,24	1,20	1,40	1,55
VI-3	95,26	72,61	72,50	1,43	1,87	1,88
VII-1	50,90	45,49	39,89	0,36	0,40	0,46
VII-2	77,85	71,30	60,10	1,38	1,50	1,78
VII-3	87,67	72,61	66,72	1,40	1,69	1,83
Média				1,17	1,50	1,52
Desvio padrão				0,41	0,60	0,54
Coef. de var. (%)				34,70	40,10	35,14

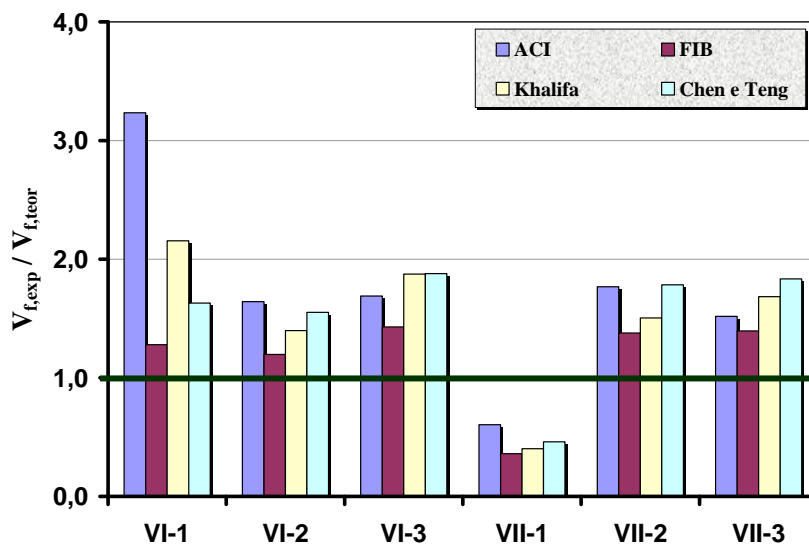


Figura 5.13 – Razão entre a parcela experimental resistida pelo CFC versus o seu valor teórico segundo diversos modelos considerando-se o ângulo θ_c .

Excluindo-se a viga VII-1 das análises da parcela resistida pelo CFC tem-se que as médias, os desvios padrões e os coeficientes de variação da razão $\frac{V_{f,exp}}{V_{f,teor}}$ apresentam resultados menos dispersos para as demais vigas, conforme mostram os dados da Tabela 5.18. Observa-se nessa tabela que para o ângulo θ_{CR} a

sistemática da FIB apresenta uma menor dispersão (C.V = 7,13%), e a do ACI uma maior variação em seus resultados (C.V = 22,42%). Para o ângulo θ_ε ambos os modelos, da FIB e do ACI, apresentam o menor e o maior coeficientes de variação, respectivamente.

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 .

Viga	θ_{CR}				θ_ε			
	ACI	FIB	Khalifa	Teng	ACI	FIB	Khalifa	Teng
VI-1	2,66	1,28	1,77	1,63	3,23	1,28	2,16	1,63
VI-2	1,59	1,20	1,35	1,55	1,64	1,20	1,40	1,55
VI-3	1,65	1,43	1,83	1,88	1,69	1,43	1,87	1,88
VII-1 ⁽¹⁾	–	–	–	–	–	–	–	–
VII-2	1,89	1,38	1,61	1,78	1,77	1,38	1,50	1,78
VII-3	1,80	1,40	1,99	1,83	1,52	1,40	1,69	1,83
Média	1,92	1,34	1,71	1,74	1,97	1,34	1,72	1,74
Desvio padrão	0,43	0,10	0,24	0,14	0,71	0,10	0,30	0,14
C.V. (%)	22,42	7,13	14,23	8,00	36,11	7,13	17,53	8,00

⁽¹⁾ Viga desprezada nos cálculos da média, desvio padrão e C.V.

5.3.2.

Parâmetros que Influenciam na Resistência do CFC

Conforme citado por Pellegrino e Modena (2002) e estudado por Bousseham e Challal (2004) várias são as influências de alguns parâmetros na resistência à força cortante de vigas de concreto armado reforçadas com CFC. Na Tabela 5.19 são mostrados alguns valores desses parâmetros que se basearam nos resultados apresentados no item 5.3.1. Nas Figuras 5.14, 5.15, 5.16, 5.17, 5.18 e 5.19 são mostrados os gráficos que relacionam esses parâmetros.

Para uma melhor análise dessas curvas são explicitadas as suas equações (reta de regressão) e o coeficiente de determinação R^2 . O coeficiente de determinação pode ser definido como o grau de ajuste da reta estimada ao

conjunto de dados, podendo variar de 0 a 1. Sendo a dispersão em torno da reta de regressão pequena em relação à variação total dos valores de y em torno de sua média, significa que a variação explicada responde por uma grande percentagem da variação total, e R^2 estará muito próximo de 1. Inversamente, quando a dispersão em torno da reta é grande, r-quadrado será pequeno, ou seja, estará próximo de 0.

Nos cálculos considerou-se: $E_{sw} = 198,51 \text{ GPa}$, $E_f = 255,18 \text{ GPa}$ e $\varepsilon_{f,u} = 11,636\%$.

Tabela 5.19 – Parâmetros que influenciam a deformação específica última do reforço em CFC.

Viga	$\frac{\varepsilon_{f,exp}}{\varepsilon_{f,u}}$	$E_f \rho_f$	$\frac{E_{sw} \rho_{sw}}{E_f \rho_f}$	$\frac{E_f \rho_f}{f_c^{2/3}}$	$E_{sw} \rho_{sw} + E_f \rho_f$	$\frac{E_{sw} \rho_{sw} + E_f \rho_f}{f_c^{2/3}}$
VI-1	0,64	0,18	2,82	0,013	0,704	0,051
VI-2	0,41	0,37	1,41	0,027	0,889	0,064
VI-3	0,39	0,55	0,94	0,040	1,073	0,077
VII-1	0,18	0,18	1,41	0,013	0,444	0,032
VII-2	0,37	0,37	0,70	0,027	0,629	0,045
VII-3	0,55	0,55	0,47	0,040	0,813	0,058

Observa-se na Tabela 5.19 que a razão $\frac{\varepsilon_{f,exp}}{\varepsilon_{f,u}}$, denominada de coeficiente de efetividade do reforço ν_f , que correlaciona a deformação específica última e deformação específica registrada no ensaio à tração do CFC, apresentou um valor inconsistente para a viga VII-1 em relação às demais vigas, sendo o mesmo desprezado nas análises seguintes. A média dos valores de ν_f , exceto para a viga VII-1, foi de 0,46.

Na Figura 5.14 o gráfico $\nu_f \times E_f \rho_f$ mostra que para $E_f \rho_f$ variando entre 0,18 e 0,55 a relação $\frac{\varepsilon_{f,exp}}{\varepsilon_{f,u}}$ varia de 0,64 a 0,38, ou seja, 68,4%, verificando-se que com aumento da rigidez $E_f \rho_f$ há um decréscimo da deformação específica última do CFC $\varepsilon_{f,exp}$.

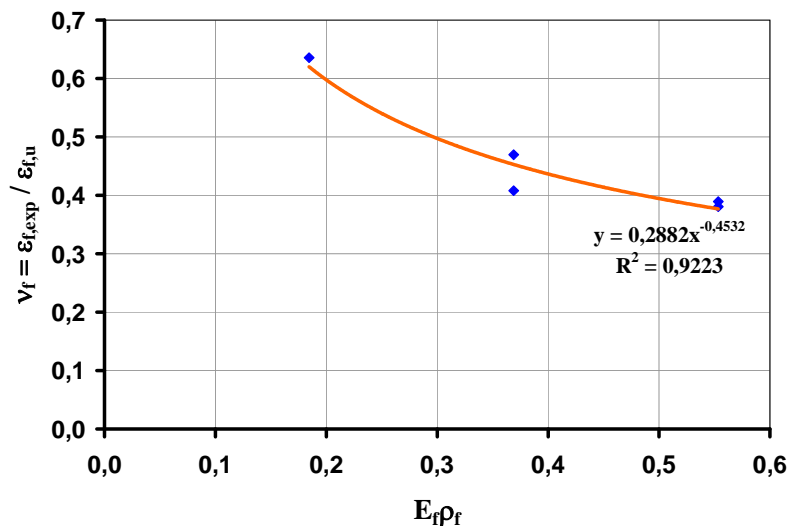


Figura 5.14 – Gráfico $v_f \times E_f \rho_f$.

O comportamento do gráfico $v_f \times \frac{E_{sw} \rho_{sw}}{E_f \rho_f}$ (Figura 5.15) mostra que para $\frac{E_{sw} \rho_{sw}}{E_f \rho_f}$ variando entre 0,47 e 2,82 tem-se v_f variando de 0,38 a 0,64, ou seja, 68,4%. Verifica-se que para o acréscimo da razão $\frac{E_{sw} \rho_{sw}}{E_f \rho_f}$, a deformação específica última $\epsilon_{f,exp}$ aumenta.

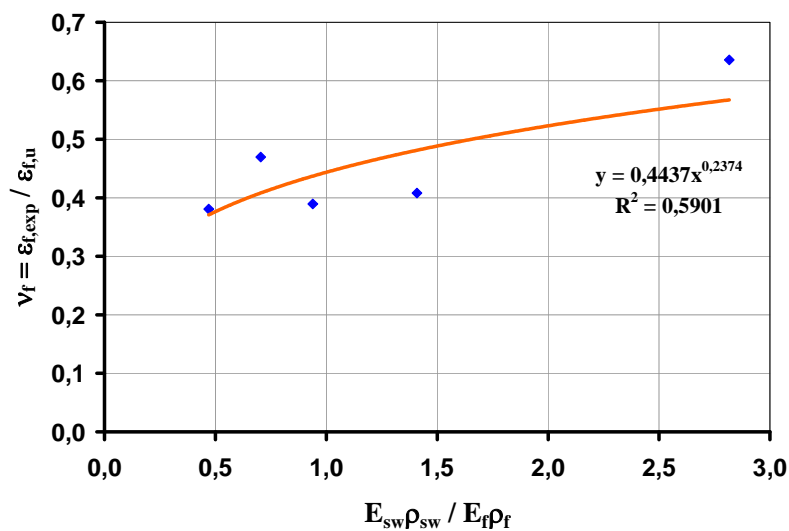


Figura 5.15 – Gráfico $\nu_f \times \frac{E_{sw}\rho_{sw}}{E_f\rho_f}$.

Na Figura 5.16 tem-se o parâmetro $\frac{E_f\rho_f}{f_c^{2/3}}$ variando entre 0,013 e 0,040, e ν_f variando de 0,64 a 0,38, ou seja, 68,4%. Constata-se um decréscimo na deformação específica última $\varepsilon_{f,exp}$ com o aumento dessa razão.

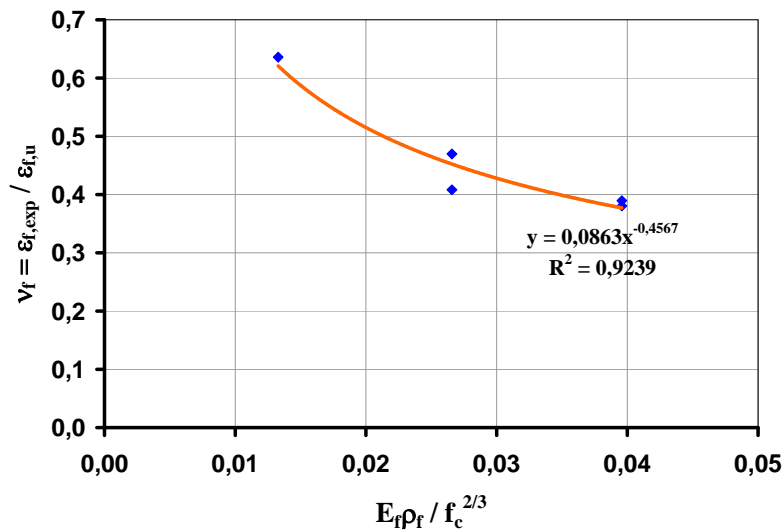


Figura 5.16 – Gráfico $\nu_f \times \frac{E_f\rho_f}{f_c^{2/3}}$.

O análise do gráfico $\nu_f \times (E_{sw}\rho_{sw} + E_f\rho_f)$ mostra que para o parâmetro $E_{sw}\rho_{sw} + E_f\rho_f$ variando entre 0,629 e 1,043 tem-se ν_f variando de 0,64 a 0,38, ou seja, 68,4%, o que representa um decréscimo da deformação específica última $\varepsilon_{f,exp}$ em relação a esse parâmetro.

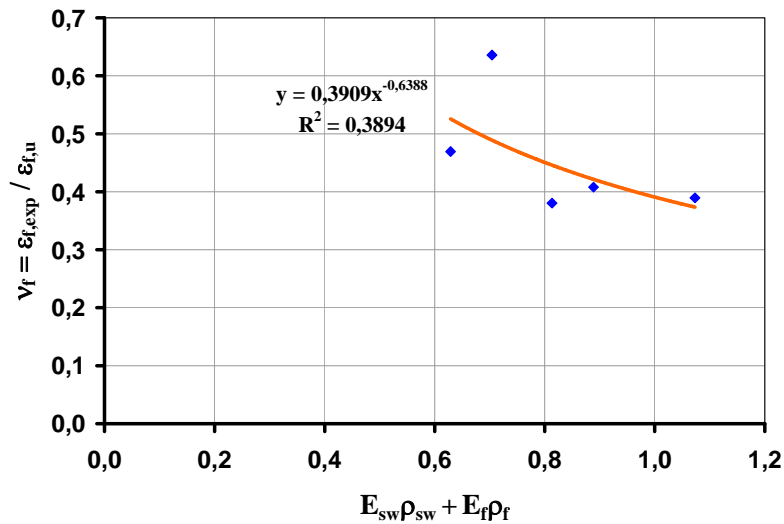


Figura 5.17 – Gráfico $\nu_f \times (E_{sw}\rho_{sw} + E_f\rho_f)$.

Da mesma forma o comportamento do gráfico $\nu_f \times \frac{E_{sw}\rho_{sw} + E_f\rho_f}{f_c^{2/3}}$ mostra que para $\frac{E_{sw}\rho_{sw} + E_f\rho_f}{f_c^{2/3}}$ variando entre 0,045 e 0,077 tem-se ν_f variando de 0,64 a 0,38, ou seja, 68,4%, onde verifica-se que para o aumento do parâmetro $\frac{E_{sw}\rho_{sw} + E_f\rho_f}{f_c^{2/3}}$ a deformação específica última $\epsilon_{f,exp}$ diminui.

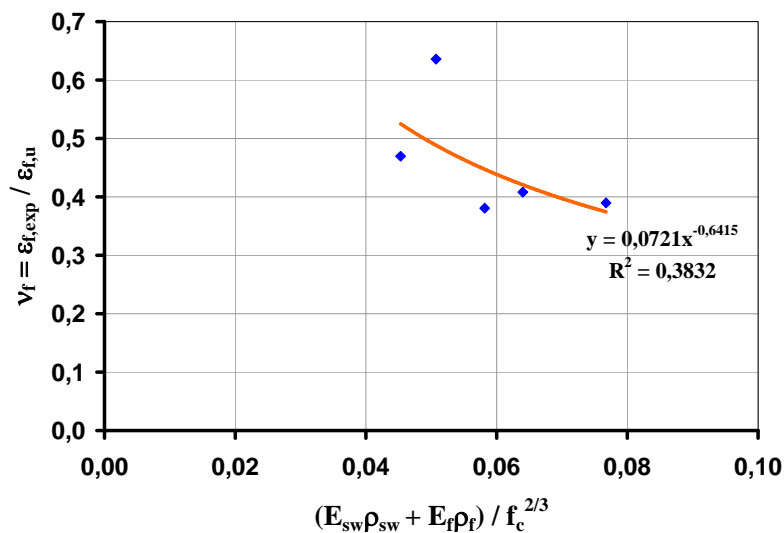


Figura 5.18 – Gráfico $\nu_f \times \frac{E_{sw}\rho_{sw} + E_f\rho_f}{f_c^{2/3}}$.

Para os diferentes ângulos de inclinação da biela observa-se na Figura 5.19 uma maior dispersão dos ângulos θ_ε ($\Delta=13,68^\circ$), seguido do ângulo θ_{CIN} ($\Delta=5,98^\circ$) e por último θ_{CR} ($\Delta=3,0^\circ$), para uma variação de 0,26 para o fator de efetividade do reforço em CFC ν_f .

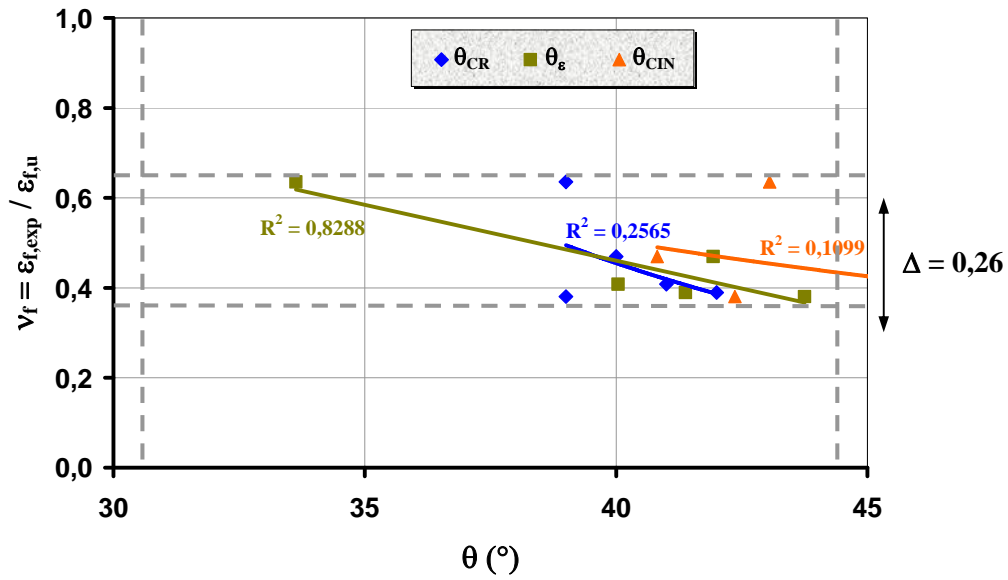


Figura 5.19 – Gráfico $\nu_f \times \theta$.

6

Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

São apresentadas as conclusões obtidas neste estudo experimental de vigas de concreto armado reforçadas à força cortante com compósitos de fibras de carbono (CFC) por meio de estribos em U. A partir das análises dos resultados experimentais e teóricos pode-se concluir que:

- para as vigas com reforço não foi constatado a ruptura por tração do CFC e sim o colapso da viga por força cortante (ruptura brusca) e o imediato descolamento do reforço na região da ancoragem, ou seja, por tração diagonal na região entre o apoio e o ponto de aplicação de força;
- O sistema de ancoragem adotado (tira de CFC colada na extremidade dos estribos em U) mostrou-se efetivo, pois não ocorreu ruptura prévia por descolamento do reforço;
- o acréscimo da força cortante nas vigas reforçadas das Séries I e II variou de 36% a 54% em relação às vigas de referência, o que mostra a eficácia do compósito de fibras de carbono para esse tipo de reforço estrutural no ganho resistência final da viga. Constata-se também que a pré-fissuração pouco influenciou a resistência das vigas com reforço;
- pela Tabela 5.11, os ângulos das fissuras medidos por meio digital θ_{CR} mostraram-se menos dispersos (C.V. = 6,18%) do que os calculados com as deformações específicas lidas pelos EER colados na superfície do concreto θ_ϵ . Com base nos valores de θ_{CR} , o valor médio do ângulo de inclinação da fissura que pode ser usado em análises para determinação da força cortante é de 39,13°;
- a hipótese básica do modelo cinemático que assume que o ângulo de fissuração é igual ao ângulo de inclinação da linha de plastificação é comprovada pelos resultados experimentais, pois a razão $\frac{\theta_{CR}}{\theta_{CIN}}$ apresenta uma média de 1,05 e um C.V. = 12,69%, considerando-se as

vigas de referência VR1 e VR2. Sem essas vigas os resultados melhoram, sendo a média igual a 0,94 e o C.V. = 4,15%;

- para a determinação da força cortante teórica para cada uma das vigas, o modelo cinemático apresentou resultados menos dispersos (C.V. = 6,55%) quando comparados com os modelos do ACI-318 (1999) e ACI-440 (2001) que fornecem C.V. = 9,94% para a razão $\frac{V_{f,exp}}{V_{f,teor}}$, conforme

Tabela 5.13. O modelo de Colloti *et al.* (2004) registrou C.V. = 13,81% para os seus resultados teóricos em relação aos valores experimentais. Conclui-se que para esses três modelos, além de apresentarem resultados a favor da segurança, as suas metodologias de cálculo são bastante consistentes para a determinação de $V_{u,teór}$;

- as razões entre as parcelas últimas (experimentais) e as teóricas da força cortante segundo o método do ACI-440 (2001) têm uma dispersão aceitável para a parcela V_{sw} para o ângulo de inclinação da biela, considerando-se θ_{CR} e θ_ϵ , com C.V. igual a 9,17% e 21,09% respectivamente, conforme Tabelas 5.14 e 5.15. A parcela $V_{c,exp}$ referente ao concreto apresentou um alto coeficiente de variação, que variou de 40,97% a 74,96% quando da consideração dos ângulos θ_{CR} e θ_ϵ respectivamente, em relação à parcela teórica;
- segundo as Tabelas 5.14 e 5.15, os valores de $V_{f,exp}$ calculados com os ângulos θ_{CR} e θ_ϵ são, em geral, bem superiores aos valores $V_{f,teór}$ calculados de acordo com o ACI-440 (2001), com média de 73% e 74% acima da parcela teórica, ou seja, esses valores obtidos são conservativos. Para o ângulo θ_{CR} ocorreu uma menor dispersão nos resultados da razão $\frac{V_{f,exp}}{V_{f,teór}}$ quando comparados com os valores obtidos considerando-se o ângulo θ_ϵ ;
- os valores da contribuição da parcela teórica do CFC $V_{f,teór}$, conforme Tabela 5.18, obtidos por meio dos demais modelos, FIB-Bulletin 14 (2001), Khalifa e Nanni (2002) e Chen e Teng (2002), mostram que

para a maioria das vigas com reforço os resultados desses modelos são inferiores aos resultados da parcela experimental $V_{f,exp}$;

- na hipótese aditiva $V_{u,exp} = V_{c,exp} + V_{sw,exp} + V_{f,exp}$, $V_{c,exp}$ foi calculada determinando-se $V_{f,exp}$ a partir dos ângulos experimentais θ_{CR} e θ_c obtidos nos ensaios, porém ressalta-se que os ângulos para alguns modelos teóricos, como o do ACI-440 (2001) e Khalifa e Nanni (2002), admitem um $\theta = 45^\circ$, que é uma maneira simplista de se calcular $V_{f,teór}$;
- as razões entre os valores experimentais e teóricos mostrados na Tabela 5.18 são superiores à unidade, o que permite concluir que a expressão para o cálculo de V_f baseada no modelo da Treliça Generalizada fornece valores conservativos. Nessa tabela os dados referentes ao modelo da FIB-Bulletin 14 (2001) e ao modelo de Chen e Teng (2002) apresentaram pequenas dispersões para a razão $\frac{V_{f,exp}}{V_{f,teór}}$, com C.V igual 7,13% e 8,00% respectivamente, o que mostra a boa consistência dessas sistemáticas para a determinação de $V_{f,teór}$. Para as sistemáticas do ACI-440 (2001) e Khalifa e Nanni (2002) a variação da razão $\frac{V_{f,exp}}{V_{f,teór}}$ para cada um desses modelos se mostrou apenas regular, mostrando que alguns de seus parâmetros deveriam ser reavaliados;
- na Tabela 5.19 os valores de efetividade do reforço ν_f mostram que o valor médio para esse parâmetro a ser utilizado no dimensionamento da parcela resistida pelo CFC pode ser adotado como sendo de 46%;
- o ajuste da curva $\nu_f \times E_f \rho_f$ é bom, com $R^2 = 0,922$, e mostra que o aumento da rigidez $E_f \rho_f$ diminui a deformação específica última $\varepsilon_{f,exp}$ do CFC;
- o ajuste da curva $\nu_f \times \frac{E_{sw} \rho_{sw}}{E_f \rho_f}$ é apenas regular, com $R^2 = 0,590$, e mostra que o aumento da razão $\frac{E_{sw} \rho_{sw}}{E_f \rho_f}$ leva ao aumento de ν_f , o que

pode levar a altos valores para $\varepsilon_{f,exp}$, e gerar problemas de aderência CFC-concreto;

- o ajuste da curva $\nu_f \times \frac{E_f \rho_f}{f_c^{2/3}}$ é bom, com $R^2 = 0,924$. Essa curva mostra que se f_c diminui a deformação específica $\varepsilon_{f,exp}$ também diminui, indicando que um tipo de ruptura indesejável pode ocorrer, ou descolamento ou arrancamento do substrato de concreto, pois o parâmetro $f_c^{2/3}$ está vinculado à resistência à tração desse substrato;
- os ajustes das curvas $\nu_f \times (E_{sw} \rho_{sw} + E_f \rho_f)$ e $\nu_f \times \frac{E_{sw} \rho_{sw} + E_f \rho_f}{f_c^{2/3}}$ não são bons, com $R^2 = 0,390$ e $R^2 = 0,383$ respectivamente. Isto mostra que a iteração entre essas duas armaduras deve ser pesquisada com mais acuidade;
- os ajustes das curvas $\nu_f \times \theta$ para o ângulo teórico θ_{CIN} e experimentais θ_{CR} e θ_ε não são bons. O aumento desses ângulos mostra um decréscimo da efetividade do reforço ν_f , ou seja, ocorre uma diminuição da deformação específica $\varepsilon_{f,exp}$.

6.1. Sugestões para Trabalhos Futuros

Com o intuito de dar continuidade a esta dissertação são apresentadas a seguir diversas sugestões para futuros trabalhos:

- o estudo de vigas reforçadas com CFC com diferentes resistências à compressão do concreto;
- análises de alternativas para o melhoramento da ancoragem do reforço à força cortante para evitar a ruptura brusca e aumentar a efetividade do CFC;
- o estudo de vigas reforçadas com CFC com diferentes taxas de armadura longitudinal;

- o estudo de vigas reforçadas com CFC com diferentes ângulos de inclinação do reforço, e diferentes taxas de armaduras transversal interna e externa para a elaboração de um banco de dados;
- o desenvolvimento de um estudo teórico-experimental de vigas reforçadas com CFC à flexão e à força cortante simultaneamente;
- estudar o reforço de vigas de concreto armado para diferentes dimensões de seção **T** e vigas de seções retangular, com envolvimento completo da seção com CFC e com estribos em **U**;
- desenvolver análises de vigas reforçadas com CFC variando-se a relação $\frac{a}{d}$, onde a é a distância do ponto de aplicação de força até o apoio mais próximo e d é a altura útil da viga;
- elaborar, segundo os diversos resultados de pesquisas desenvolvidas no Brasil, um manual de procedimentos e técnicas que apresentem uma sistemática normativa de cálculo e execução de vigas reforçadas à força cortante com compósitos de fibras de carbono.

Referências Bibliográficas

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI – 318. **Building Code Requirements for Structural Concrete**. USA. 1999.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI – 440. **Guide for the Design and Construction of the Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures**. USA. 2001.

AMERICAN SOCIETY for TESTING and MATERIALS – ASTM – D3039/D3039. – **Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials**. USA. 2000.

ARAÚJO, A. C. N. **Estudo Experimental do Reforço à Flexão de Vigas de Concreto Armado Utilizando Compósitos com Tecido de Fibras de Carbono**. Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, 2002.

ARAÚJO, A. S. **Reforço ao Cisalhamento de Vigas de T de Concreto Armado com Fibra de Carbono com Dois Tipos de Ancoragem**. Dissertação de Mestrado, UnB, Brasília, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) – NBR-5738. **Concreto – Procedimento para Moldagem e Cura de Corpos-de-prova**, Brasil, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) – NBR-5739. **Concreto – Ensaio de Compressão de Corpos-de-prova Cilíndricos – Método de Ensaio**, Brasil, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) – NBR-6118. **Projeto de Estruturas de Concreto**, Brasil, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) – NBR-ISO - 6892. **Materiais Metálicos – Ensaio de Tração à Temperatura Ambiente**, Brasil, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) – NBR-7222. **Argamassa e Concreto – Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral de Corpos-de-prova Cilíndricos – Método de Ensaio**, Brasil, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) - NBR-8522 **Concreto – Determinação dos Módulos Estáticos de Elasticidade e de Deformação e da Curva Tensão-Deformação**, Brasil, 2003.

BEBER, A. J. **Comportamento Estrutural de Vigas de Concreto Armado Reforçadas com Compósitos de Fibra de Carbono**; Tese de Doutorado, UFRGS, Porto Alegre, 2003.

BOUSSELHAM, A.; CHALLAL, O. **Shear Strengthening Reinforced Concrete Beams with Fiber-Reinforced Polymer: Assessment of Influencing Parameters and Required Research**. ACI Structural Journal, v.101, n°2, p.219-227, 2004.

COLOTTI V.; SPADEA, G.; SWAMY, R. N. **Analytical Model to Evaluate Failure Behavior of Plated Reinforced Concrete Beams Strengthened for Shear**. ACI Structural Journal, v.101, n°6, p. 755-764, 2004.

FIB (CEB-FIP). **Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures**. Bulletin 14, Lausanne, 2001.

FUSCO, P. B. **Construções de Concreto – Solicitações Tangenciais**. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1981.

GARCIA, S. L. G. **Taxa de Armadura Transversal Mínima em Vigas de Concreto Armado**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

GUIMARÃES, G. B. **Notas de Aula da Disciplina de Comportamento e Projeto de Estruturas de Concreto Armado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil**. Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2006.

HOANG. L. C.; NIELSEN. M. P. **Plasticity Approach to Shear Design**. Cement and Concrete Composites 20. p. 437-453, 1998.

KANI, G. N. J. **The Riddle of Shear Failure and its Solution**. Journal of The American Concrete Institute, p. 441-467, 1964.

KHALIFA, A.; ALKHRDAJI T.; NANNI A.; LANSBURG S. **Anchorage of Surface Mounted FRP Reinforcement**. Concrete International: Design and Construction, v.21, nº10, p. 49-54, 1999.

KHALIFA, A.; GOLD, W.; NANNI, A.; ABDEL-AZIZ, M. I. **Contribution of Externally Bonded FRP to the Shear Capacity of RC Flexural Members**. ASCE - Journal of Composites for Construction, v.2, nº4, p. 195-202, 1998.

KHALIFA, A.; NANNI A. **Rehabilitation of Rectangular Simply Supported RC Beams with Shear Deficiencies Using CFRO Composites**. Construction and Building Materials 16, p. 135-146, 2002.

LOPES, M. T. **Reforço à Força Cortante em Vigas de Concreto Estrutural através da Colagem de Compósitos de Fibra de Carbono**, Dissertação de Mestrado, UFF, 2002.

MBT, Master Builders Technologies – **Catálogo Eletrônico dos Produtos**, www.masterbuilders.com.br, visitado em 2006.

MACHADO, M. G. **Estudo Experimental da Ductilidade de Vigas em Concreto Armado Reforçadas à Flexão Utilizando Compósitos com Tecido de Fibras de Carbono**. Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, 2004.

MILLER, B. D. **Bond between Carbon Fiber Reinforced Polymer Sheets and Concrete**. M.Sc. Thesis, The University of Missouri, Rolla, 1999.

NIELSEN, M. P. **Limit Analysis and Concrete Plasticity**. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1984.

PELLEGRINO, C.; MODENA C. **Fiber Reinforced Polymer Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams with Transverse Steel Reinforcement**. Journal of Composites for Construction, ASCE, v.6, nº 2, 2002.

RHEOTEC – **Catálogo Eletrônico dos Produtos**; www.rheotec.com.br, visitado em 2006.

SALLES, M. N. **Comportamento ao Cisalhamento de Vigas T de Concreto Armado Reforçadas com Compósitos de Fibra de Carbono**. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Tecnologia, UnB, 2000.

SÁNCHEZ, E. **Nova Normalização Brasileira para o Concreto Estrutural**. Rio de Janeiro, Ed. Interciência, 1999.

SÁNCHEZ, E.; SILVA FILHO, J. J. H.; BARBOSA, M. T. G.; VELASCO, M. S. L. **Modelo Cinemático para Vigas de Concreto Armado Reforçadas à Força Cortante com Compósitos de Fibra de Carbono**. Anais do 48º Congresso Brasileiro do Concreto, Rio de Janeiro, 2006.

SATO, Y.; UEDA, T.; KAKUTA, Y.; ONO, S. **Ultimate Shear Capacity of Reinforced Concrete Beams with Carbon Fiber Sheet**. Proceeding of the Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Japan Concrete Institute, Sapporo, v.1, 1997a.

SIKA – **Catálogo Eletrônico de Produtos**, www.sika.com.br, visitado em 2006.

SILVA FILHO, J. N. **Vigas T em Concreto Armado Reforçadas ao Cisalhamento com Compósito de Fibra de Carbono**. Dissertação de Mestrado, UnB, Brasília, 2001.

SWAMY, R. N.; JONES, R.; CHARIF, A. **Shear Adhesion Properties of Epoxy Resin Adhesive**. Proceedings of the International Symposium, p. 741-755, Aix-en-Provence, France, 1986.

TÄLJSTEN, B. **Förstärkning av Befintliga Betongkonstruktioner med Kolfiberväv eller Laminat, Dimensionering, Material och Utförande**. Technical Report, University of Technology, Lulea, 1999a.

TENG, J. G.; CHEN, J. F.; SMITH, S. T.; LAM, L. **FRP Strengthened RC Structures**. John Wiley & Sons, Great Britain, 2002.

TRIAANTAFILLOU, T. C. **Shear Strengthened of Reinforced Concrete Beams Using Epoxy-Bonded FRP Composites**. ACI Structural Journal, 95(2), p. 107-115, 1998.

TRIAANTAFILLOU, T. C; ANTONOPOULOS, C. P. **Design of Concrete Flexural Members Strengthened in Shear with FRP**. Journal of Composites for Construction, ASCE, 4(4), 2000.

Anexo A

Registros Fotográficos



Foto A.1 – Ensaio de resistência à compressão simples dos corpos-de-prova de concreto.



Foto A.2 – Sistema de aplicação de força em corpo-de-prova para determinação do módulo de elasticidade do concreto.

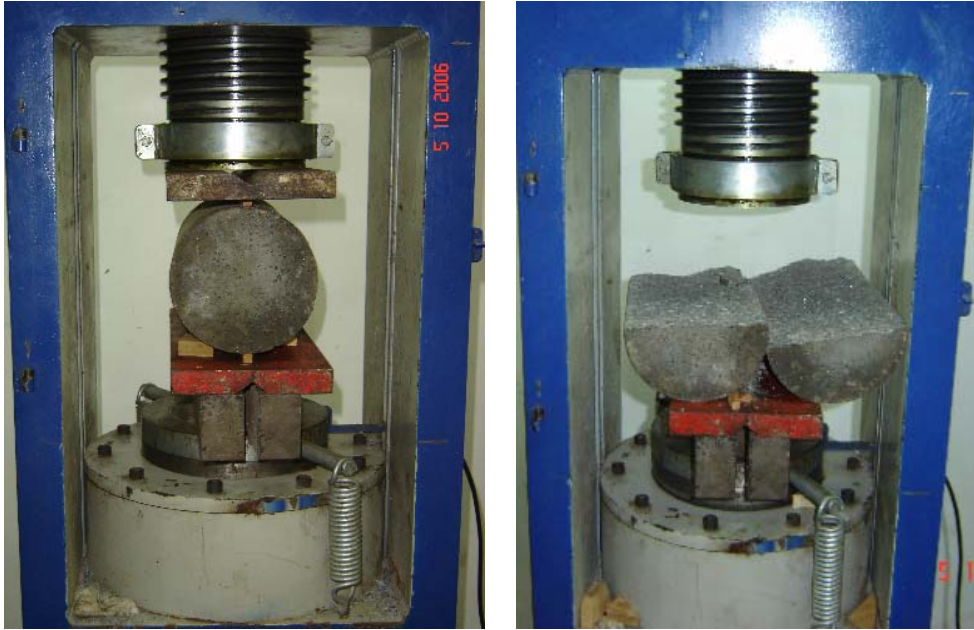


Foto A.3 – Ensaio de compressão diametral dos corpos-de-prova de concreto.



Foto A.4 – Amostras das barras de aço de 5,0 e 16,0 mm para os ensaios de resistência tração.

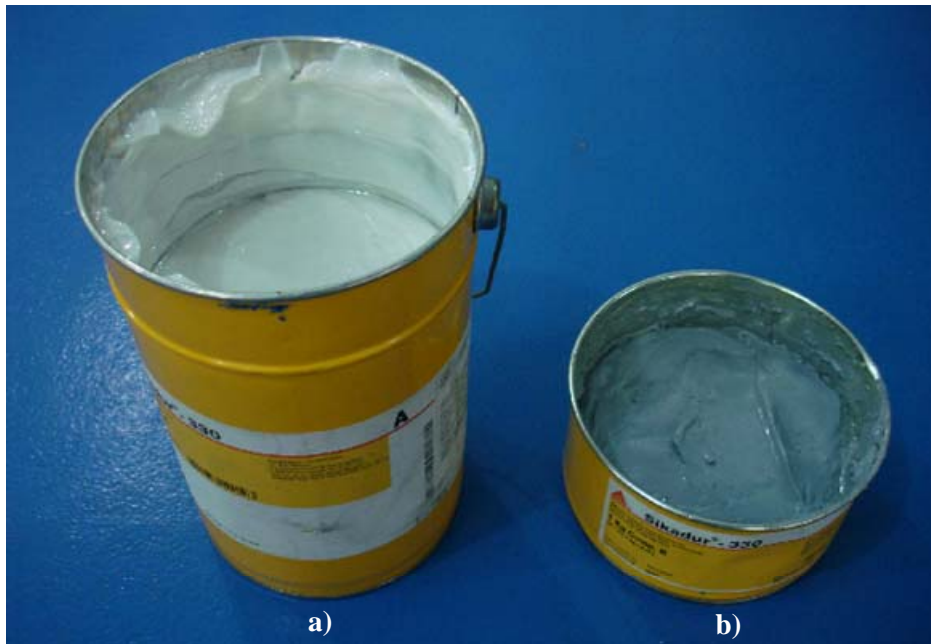


Foto A.5 – Componentes **A** (a) e **B** (b) utilizados no preparo da resina epoxídica.

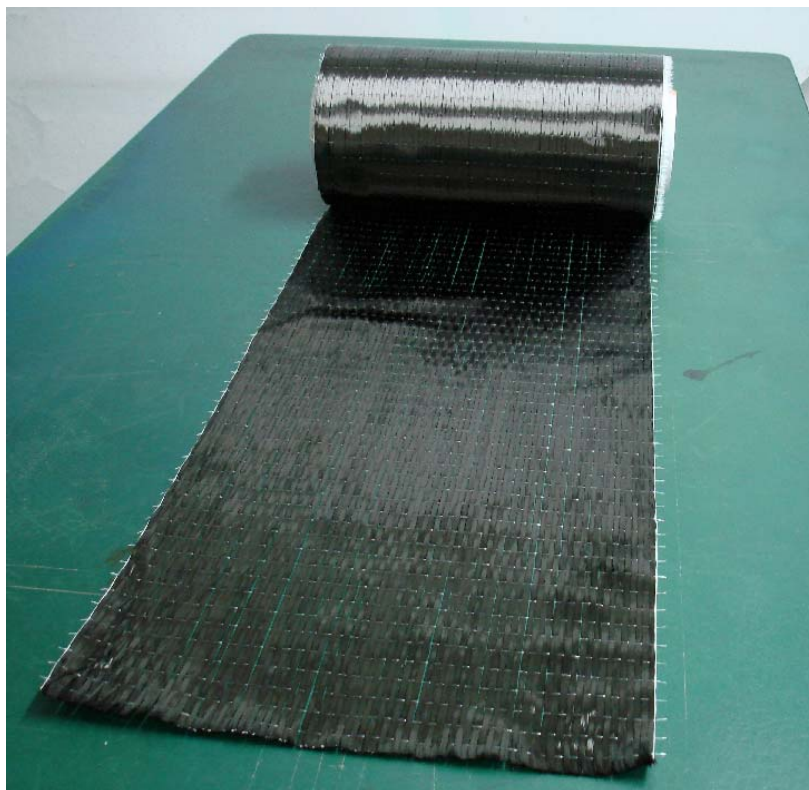


Foto A.6 – Rolo de tecido de fibras de carbono.

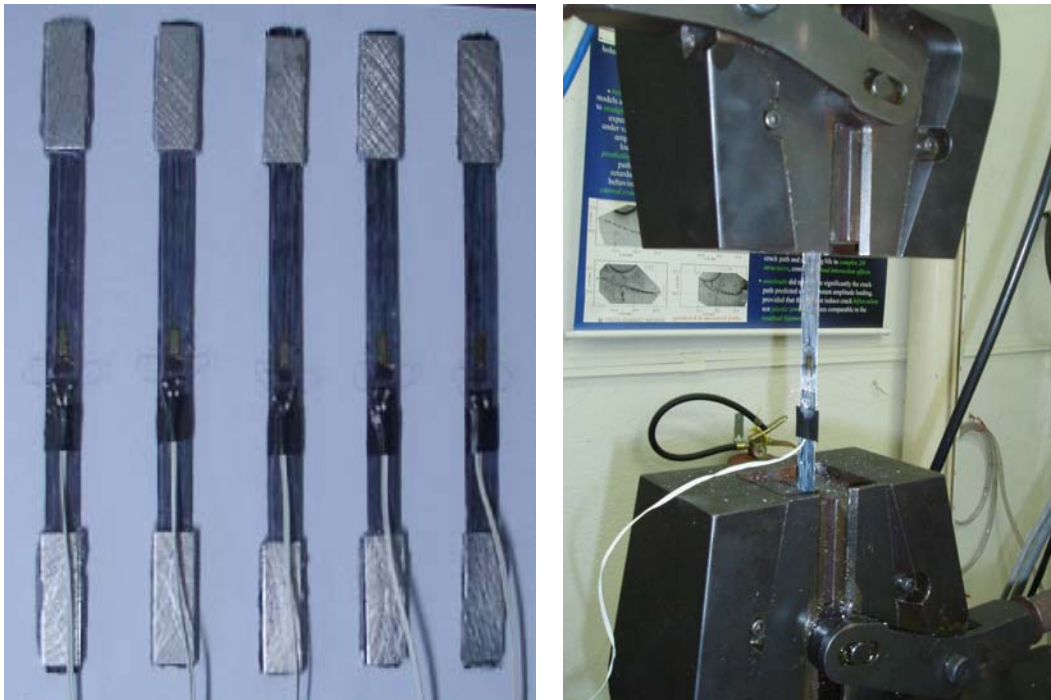


Foto A.7 – Corpos-de-prova de CFC e sistema de aplicação de força de tração.



Foto A.8 – Formas e armaduras.



Foto A.9 – Detalhes das montagens das vigas antes do recebimento do concreto.



Foto A.10 – Vigas após as desformas.

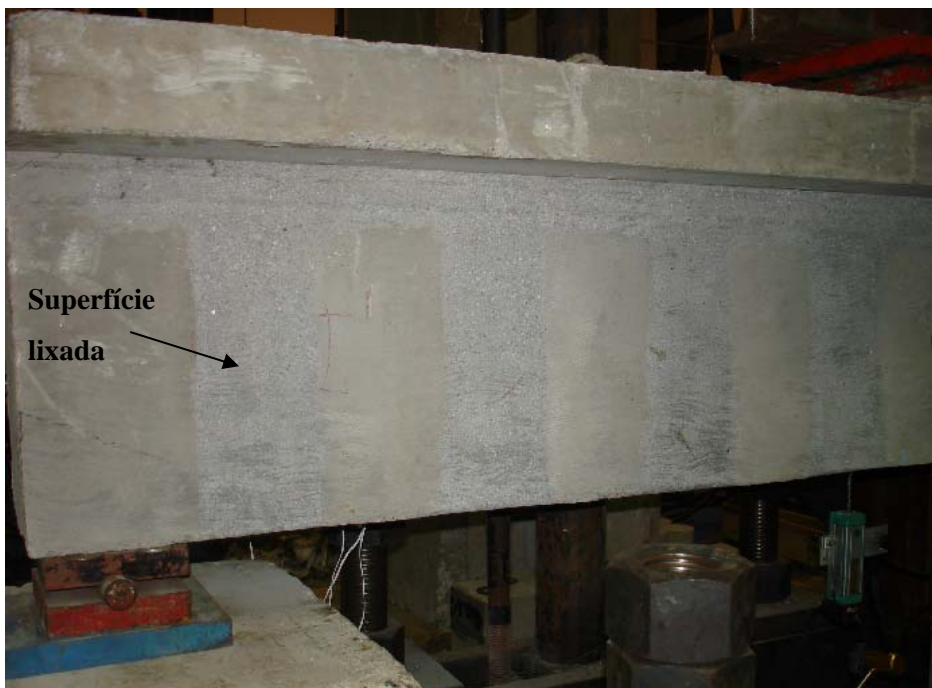


Foto A.11 – Superfície do concreto após lixamento.



Foto A.12 – Equipamentos diversos (espátulas e rolo "tira-bolha") utilizados na aplicação da resina epoxídica.



Foto A.13 – Viga reforçada à força cortante com CFC.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0510727/CA

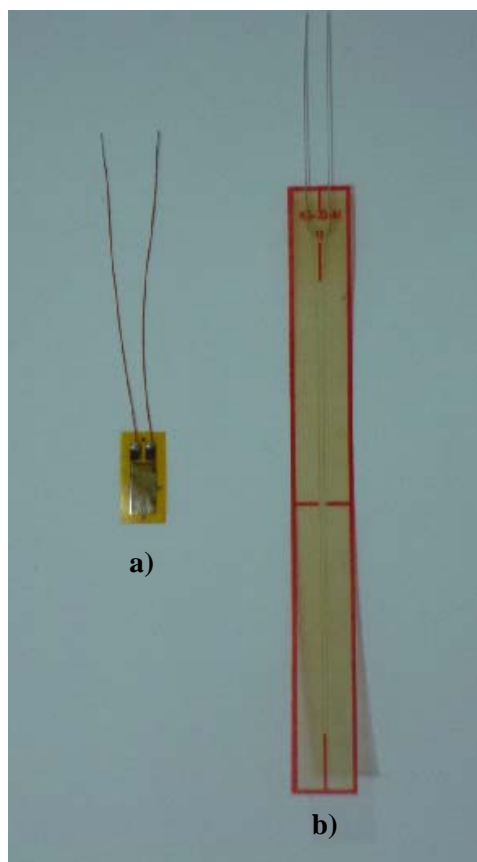


Foto A.14 – Extensômetro elétrico de resistência utilizado no aço e no CFC (a) e no concreto (b).

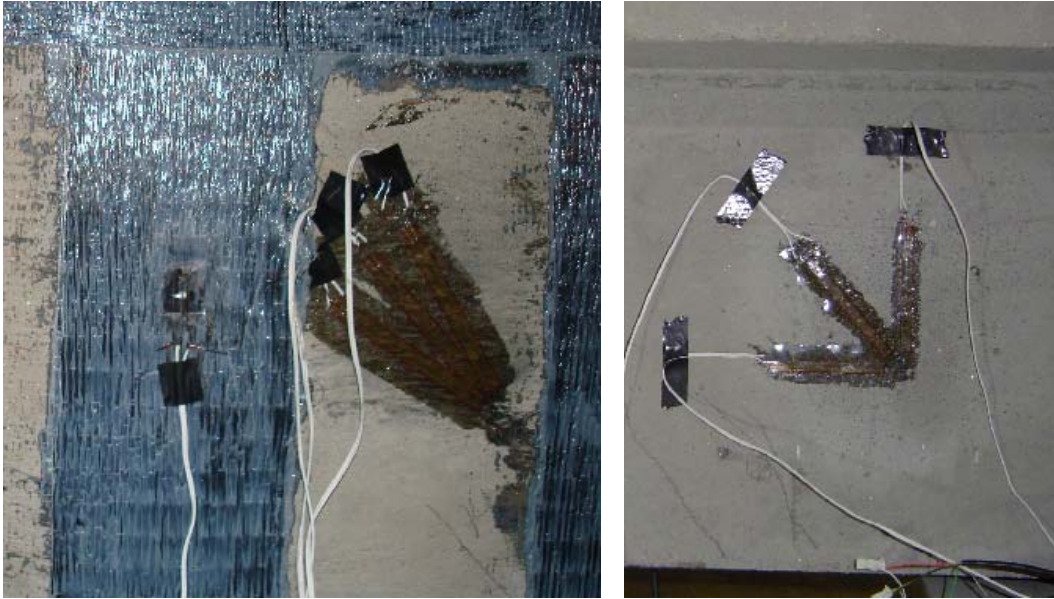


Foto A.15 – Detalhes da fixação dos EER nas superfícies do CFC e do concreto.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0510727/CA

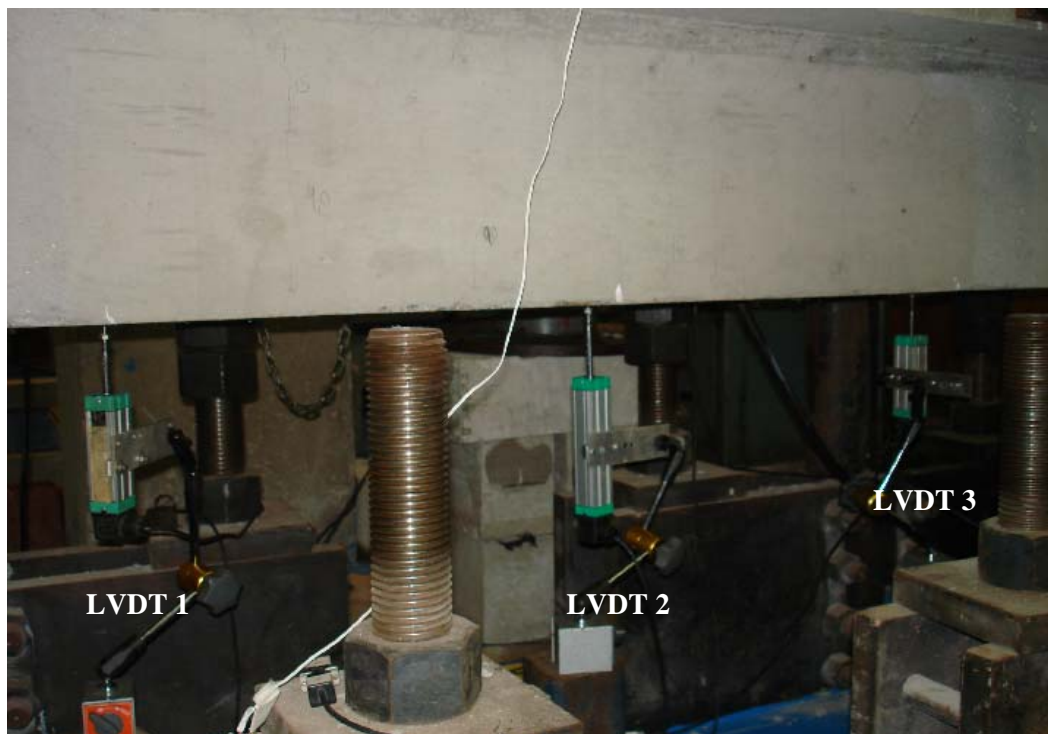


Foto A.16 – Posicionamento dos LVDT para medição das flechas.



Foto A.17 – Sistema aporcado para aplicação de força até 500 kN.



Foto A.18 – Sistema aporcado para aplicação de força até 1000 kN.



Foto A.19 – Perfil de aço e chapa utilizados no travamento da viga de concreto no sistema aporticado para força até 500 kN.



Foto A.20 – Perfil de aço utilizado no travamento da viga de concreto no sistema aporticado para força até 1000 kN.



Foto A.21 – Detalhe da ruptura da viga VR1 (1).



Foto A.22 – Detalhe da ruptura da viga VR1 (2).



Foto A.23 – Detalhe da ruptura da viga VI-1 (1).



Foto A.24 – Detalhe da ruptura da viga VI-1 (2).



Foto A.25 – Detalhe da ruptura da viga VI-2 (1).



Foto A.26 – Detalhe da ruptura da viga VI-2 (2).



Foto A.27 – Detalhe da ruptura da viga VI-3 (1).



Foto A.28 – Detalhe da ruptura da viga VI-3 (2).



Foto A.29 – Detalhe da ruptura da viga VR2 (1).

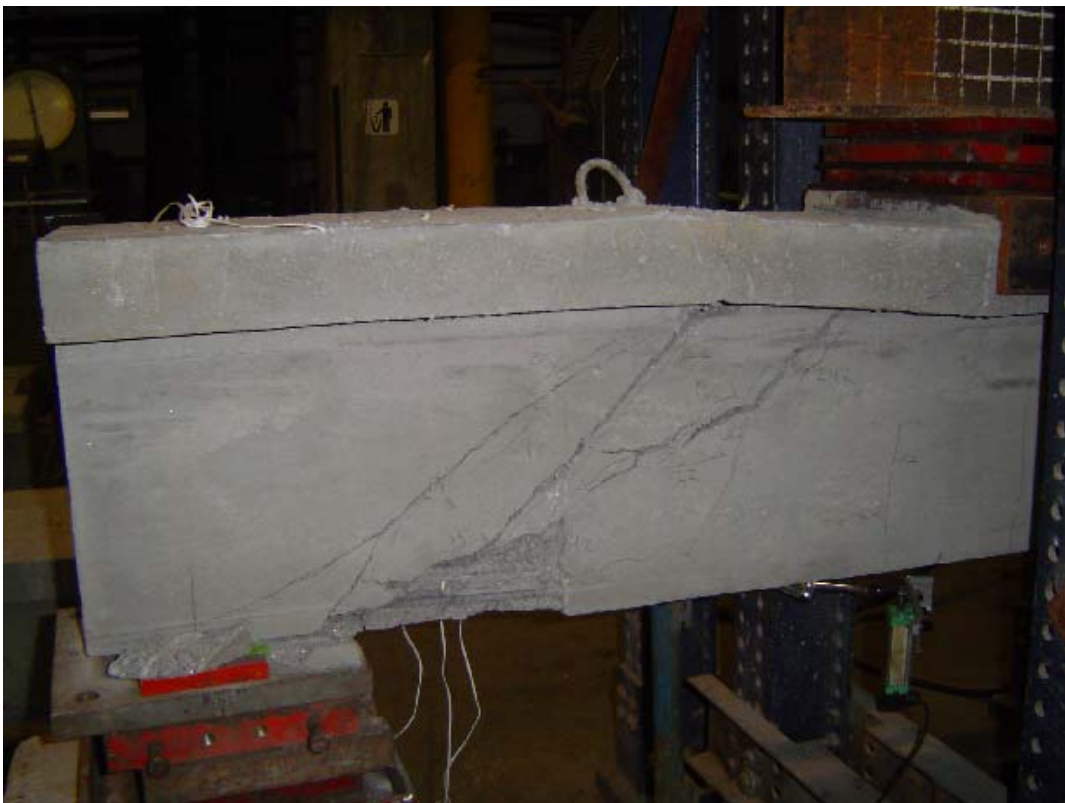


Foto A.30 – Detalhe da ruptura da viga VR2 (2).

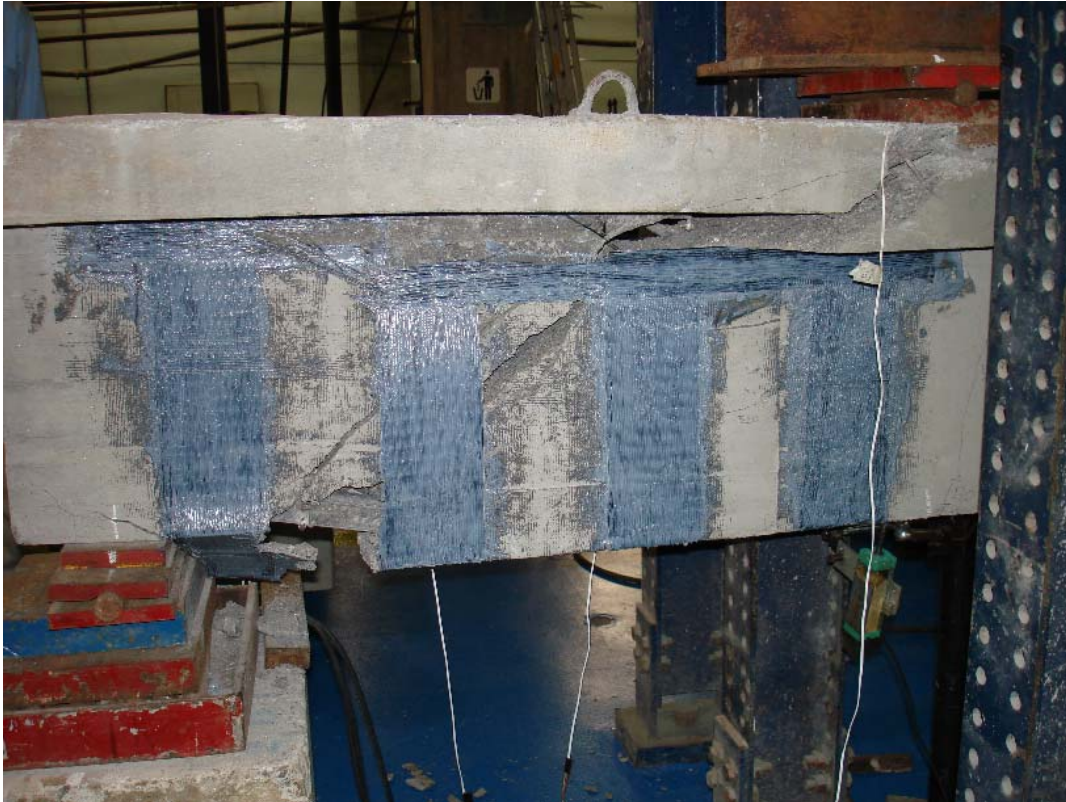


Foto A.31 – Detalhe da ruptura da viga VII-1 (1).

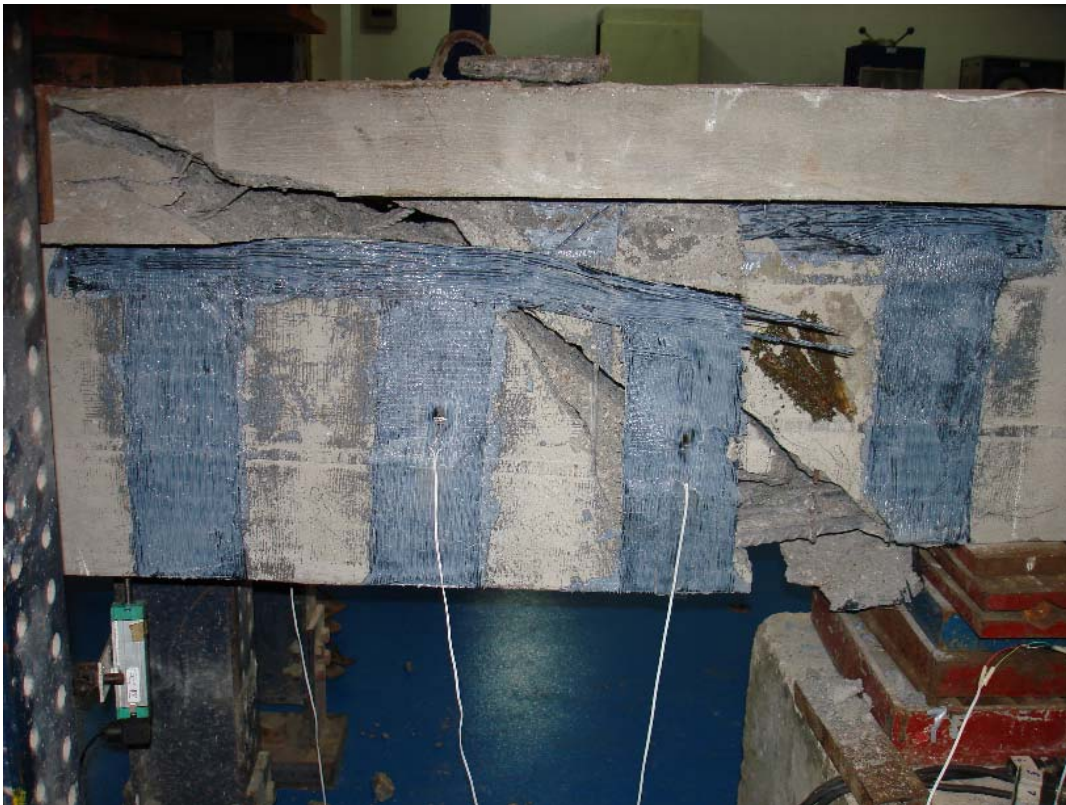


Foto A.32 – Detalhe da ruptura da viga VII-1 (2).



Foto A.33 – Detalhe da ruptura da viga VII-2 (1).

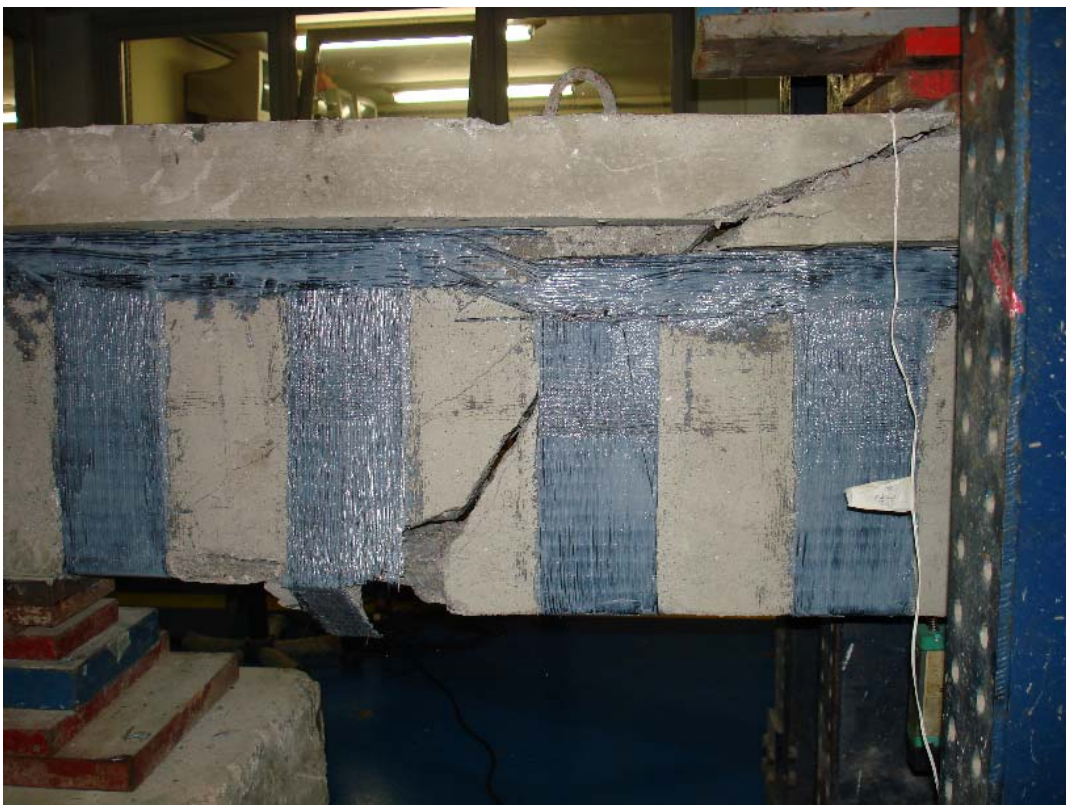


Foto A.34 – Detalhe da ruptura da viga VII-2 (2).



Foto A.35 – Detalhe da ruptura da viga VII-3 (1).



Foto A.36 – Detalhe da ruptura da viga VII-3 (2).

Anexo B

Resultados dos Ensaios à Tração das Barras de Aço

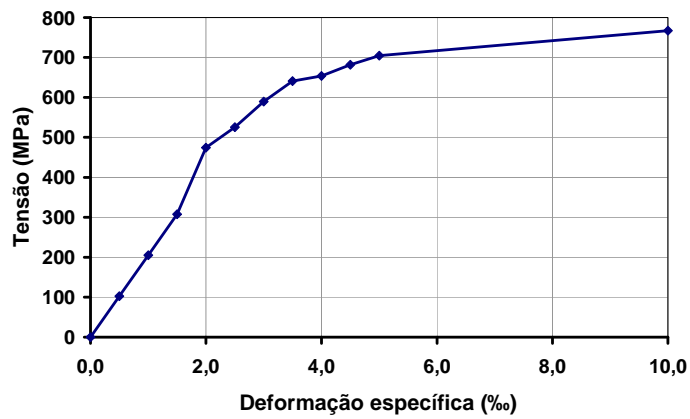


Figura B.1 – Diagrama tensão x deformação específica da primeira barra de aço ensaiada com diâmetro de 5,0 mm.

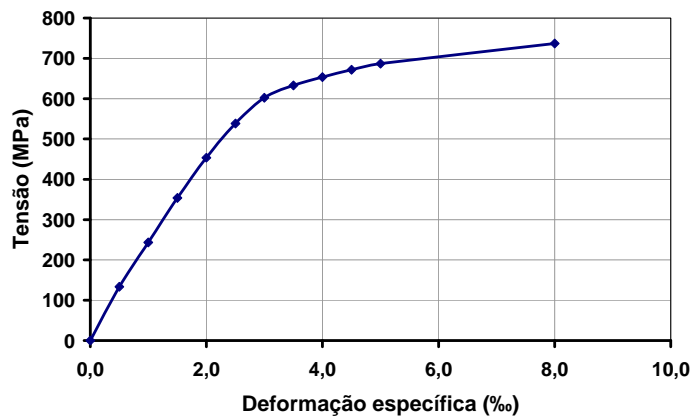


Figura B.2 – Diagrama tensão x deformação específica da segunda barra de aço ensaiada com diâmetro de 5,0 mm.

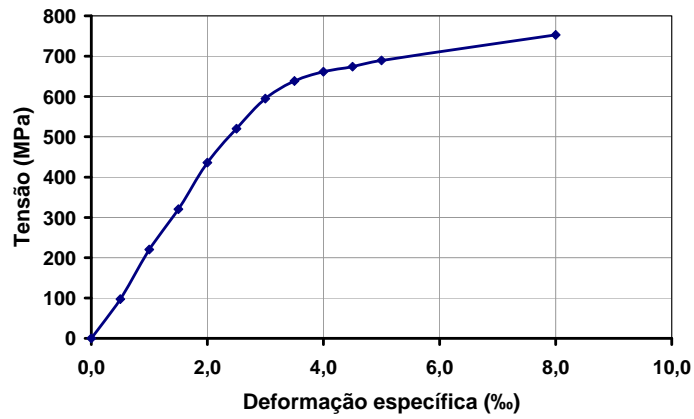


Figura B.3 – Diagrama tensão x deformação específica da terceira barra de aço ensaiada com diâmetro de 5,0 mm.

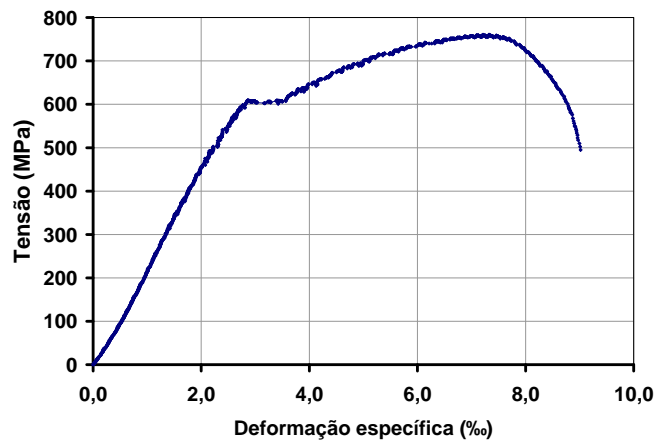


Figura B.4 – Diagrama tensão x deformação específica da primeira barra de aço ensaiada com diâmetro de 16,0 mm.

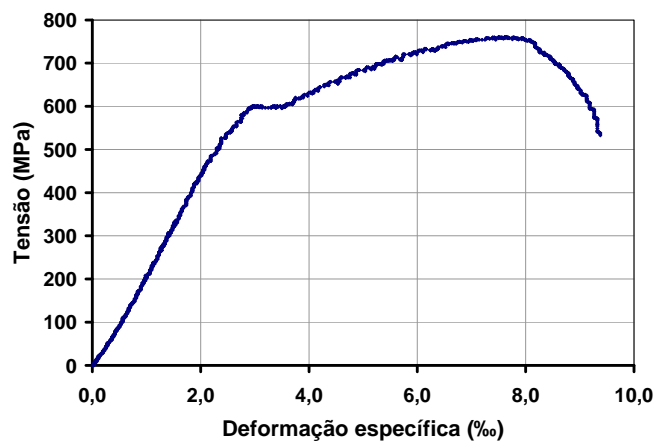


Figura B.5 – Diagrama tensão x deformação específica da segunda barra de aço ensaiada com diâmetro de 16,0 mm.

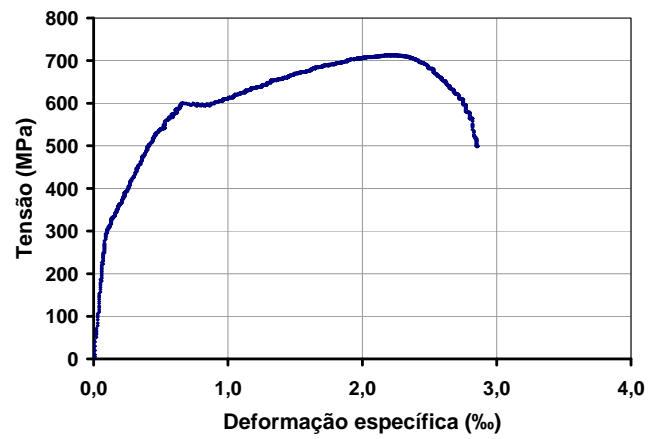


Figura B.6 – Diagrama tensão x deformação específica da terceira barra de aço ensaiada com diâmetro de 16,0 mm.

Anexo C

Resultados dos Ensaio à Tração dos Corpos-de-Prova de CFC

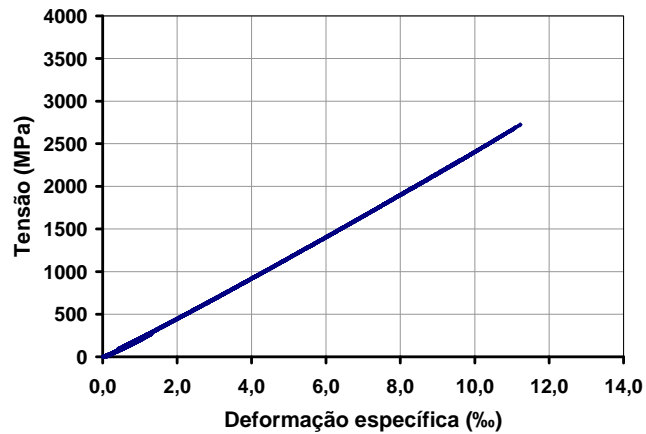


Figura C.1 – Diagrama tensão x deformação específica do primeiro corpo-de-prova ensaiado de CFC.

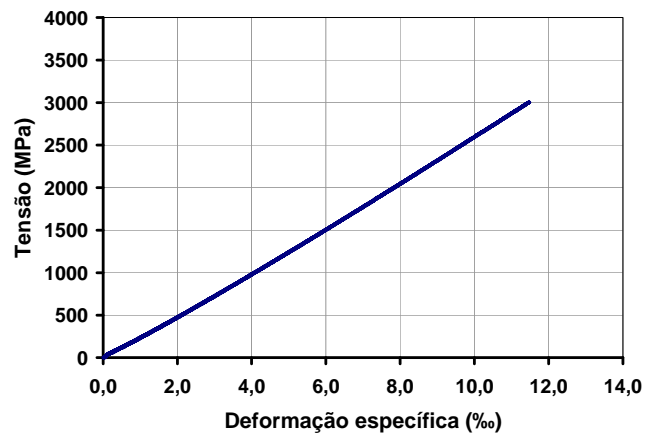


Figura C.2 – Diagrama tensão x deformação específica do segundo corpo-de-prova ensaiado de CFC.

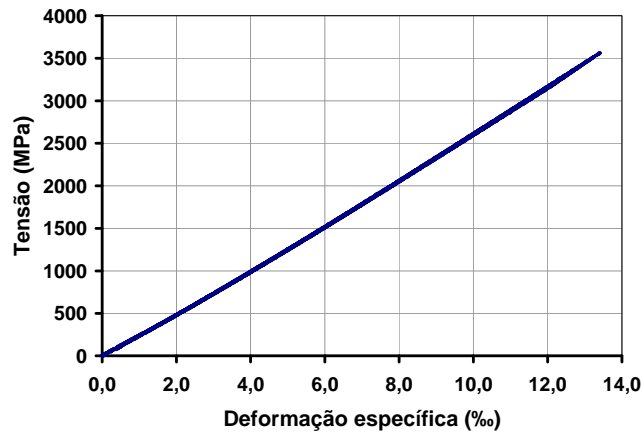


Figura C.3 – Diagrama tensão x deformação específica do terceiro corpo-de-prova ensaiado de CFC.

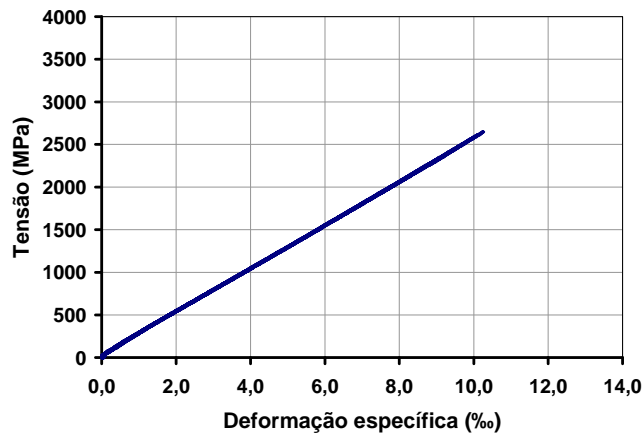


Figura C.4 – Diagrama tensão x deformação específica do quarto corpo-de-prova ensaiado de CFC.

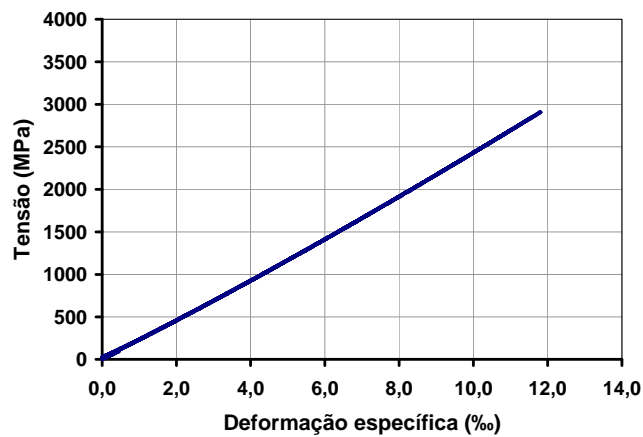


Figura C.5 – Diagrama tensão x deformação específica do quinto corpo-de-prova ensaiado de CFC.

Anexo D

Resultados dos Ensaio das Vigas

Tabela D.1 – Leituras dos LVDT e extensômetros colados no aço da viga VR1.

Força (kN)	LVDT 1 (mm)	LVDT 2 (mm)	LVDT 3 (mm)	SG1 (‰)	SG2 (‰)	SG3 (‰)	SG4 (‰)	SG5 (‰)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1,22	0,00	0,00	0,07	0,009	-0,006	0,004	0,001	0,001
2,10	0,00	0,00	0,08	-0,009	-0,004	0,003	0,004	0,002
2,70	0,00	0,00	0,08	-0,009	-0,003	0,004	0,003	0,005
3,48	0,00	0,01	0,08	-0,011	-0,004	0,004	0,003	0,008
4,87	0,00	0,04	0,07	-0,011	-0,004	0,005	0,004	0,012
5,71	0,00	0,06	0,07	-0,010	-0,003	0,004	0,003	0,013
7,49	0,00	0,10	0,07	-0,011	-0,003	0,005	0,004	0,019
7,66	0,00	0,11	0,06	-0,007	-0,004	0,006	0,004	0,020
9,59	0,00	0,16	0,06	-0,009	-0,005	0,005	0,005	0,025
11,59	0,00	0,20	0,05	-0,010	-0,005	0,005	0,005	0,031
13,97	0,00	0,26	0,04	-0,009	-0,004	0,006	0,006	0,038
15,67	0,00	0,31	0,04	-0,007	-0,005	0,006	0,006	0,044
17,44	0,00	0,36	0,03	-0,005	-0,004	0,008	0,006	0,050
19,88	0,00	0,42	0,02	-0,006	-0,005	0,007	0,006	0,058
21,79	0,00	0,47	0,01	-0,007	-0,005	0,007	0,007	0,064
23,74	0,00	0,52	0,00	-0,006	-0,005	0,007	0,008	0,072
25,53	0,00	0,57	-0,01	-0,002	-0,005	0,010	0,009	0,079
27,66	0,00	0,62	-0,02	-0,003	-0,005	0,009	0,009	0,088
29,96	0,00	0,67	-0,04	-0,005	-0,005	0,008	0,010	0,099
30,85	0,00	0,69	-0,04	-0,004	-0,004	0,009	0,009	0,105
31,80	0,00	0,72	-0,06	-0,003	-0,004	0,010	0,010	0,116
33,49	0,00	0,76	-0,06	-0,005	-0,007	0,010	0,011	0,126
35,60	0,00	0,81	-0,07	0,000	-0,005	0,012	0,010	0,140
40,64	0,01	0,93	-0,08	-0,004	-0,007	0,013	0,012	0,183
51,31	0,01	1,31	0,04	-0,004	-0,006	0,012	0,012	0,348
56,02	0,01	1,42	0,03	0,001	-0,007	0,016	0,012	0,391
60,15	0,01	1,59	0,04	0,000	-0,009	0,019	0,014	0,438
65,90	0,01	1,74	0,03	0,002	-0,005	0,023	0,014	0,481
70,67	0,01	1,91	0,03	0,003	-0,005	0,024	0,015	0,529
70,92	0,01	2,03	0,03	0,006	-0,005	0,031	0,018	0,553
75,54	0,01	2,15	0,03	0,005	-0,008	0,031	0,019	0,583
81,00	0,01	2,48	-0,01	0,000	-0,008	0,041	0,025	0,618
80,50	0,01	2,52	-0,01	0,002	-0,012	0,046	0,031	0,630
85,66	0,01	2,64	-0,01	0,000	-0,011	0,047	0,029	0,660
85,43	0,01	2,65	-0,01	0,002	-0,013	0,050	0,031	0,666

Tabela D.1 – Continuação.

Força (kN)	LVDT 1 (mm)	LVDT 2 (mm)	LVDT 3 (mm)	SG1 (‰)	SG2 (‰)	SG3 (‰)	SG4 (‰)	SG5 (‰)
96,79	0,02	3,05	-0,03	0,011	0,018	0,066	0,037	0,759
95,90	0,02	3,05	-0,03	0,011	0,018	0,067	0,042	0,757
105,89	0,02	3,33	-0,01	0,012	0,005	0,067	0,050	0,827
115,86	0,02	3,64	-0,01	0,010	-0,117	0,072	0,057	0,908
116,09	0,02	3,83	-0,03	0,014	-0,381	0,158	0,060	0,919
125,41	0,02	4,08	-0,05	0,014	-0,401	0,186	0,063	0,985
135,53	0,02	4,42	-0,17	0,012	-0,428	0,257	0,051	1,065
136,33	0,02	4,49	-0,21	0,019	-0,402	0,331	0,043	1,078
146,61	0,02	4,81	-0,03	0,016	-0,358	0,391	0,042	1,146
156,41	0,02	5,13	0,04	0,024	-0,335	0,469	0,047	1,226
164,88	0,02	5,45	0,07	0,305	-0,173	0,569	0,073	1,295
166,77	0,02	5,53	0,07	0,359	-0,140	0,660	0,062	1,310
175,65	0,02	5,75	0,07	0,399	-0,107	0,709	0,057	1,373
186,30	0,02	6,12	0,07	0,473	-0,038	1,478	0,102	1,451
196,02	0,02	6,44	0,05	1,271	-0,070	2,111	0,116	1,520
205,91	0,02	6,70	0,02	1,435	-0,108	2,296	0,146	1,589
216,32	0,02	7,01	-0,01	1,565	-0,139	2,633	0,224	1,666
225,97	0,02	7,29	0,00	1,660	-0,104	2,970	0,288	1,739
236,37	0,02	7,59	-0,02	1,748	-0,090	3,285	0,356	1,810
246,69	0,02	7,87	-0,08	1,831	-0,049	3,603	0,414	1,883
257,26	0,02	8,17	-0,11	1,915	0,086	3,964	0,508	1,955
266,09	0,02	8,42	-0,11	1,988	0,181	4,204	0,570	2,013
276,02	0,02	8,69	-0,16	2,061	0,256	4,403	0,654	2,078
296,79	0,02	9,25	-0,16	2,156	0,221	4,805	0,812	2,207
305,62	0,02	9,49	-0,14	2,208	0,183	4,949	0,889	2,259
316,04	0,02	9,80	-0,15	2,163	0,254	5,110	0,994	2,321
326,17	0,03	10,11	-0,15	2,048	0,652	5,211	1,078	2,379
335,85	0,02	10,56	-0,18	2,078	0,702	5,304	1,164	2,436
346,69	0,03	10,88	-0,19	2,101	0,805	5,345	1,207	2,496
356,10	0,03	11,16	-0,21	2,126	1,028	5,392	1,268	2,547
366,16	0,03	11,47	-0,24	2,164	1,132	5,435	1,323	2,602
375,52	0,03	11,77	-0,22	2,193	1,145	5,464	1,361	2,655
387,08	0,03	12,16	-0,25	2,234	1,320	5,504	1,410	2,682
396,55	0,03	12,59	-0,23	2,271	1,830	5,516	1,451	2,708
407,22	0,03	13,05	-0,22	2,302	2,078	5,508	1,489	2,867

Tabela D.2 – Leituras dos extensômetros colados na superfície do concreto da viga VR1.

Força (kN)	SG6 (‰)	SG7 (‰)	SG8 (‰)	SG9 (‰)	SG10 (‰)	SG11 (‰)
0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1,22	0,001	0,001	0,001	0,002	0,000	0,000
2,10	0,001	0,004	0,002	0,000	0,000	0,000
2,70	0,000	0,004	0,001	0,000	0,000	0,001
3,48	0,000	0,004	0,001	0,001	-0,001	0,001
4,87	0,000	0,004	0,002	0,001	-0,001	0,002
5,71	0,000	0,004	0,003	0,000	-0,003	0,002
7,49	0,000	0,004	0,004	-0,001	-0,003	0,002
7,66	0,000	0,004	0,002	0,000	-0,002	0,003
9,59	-0,001	0,003	0,005	0,000	-0,006	0,003
11,59	-0,001	0,003	0,006	0,000	-0,007	0,004
13,97	-0,001	0,003	0,006	-0,001	-0,008	0,005
15,67	-0,001	0,003	0,008	-0,001	-0,011	0,006
17,44	-0,001	0,003	0,007	-0,002	-0,010	0,006
19,88	-0,001	0,002	0,009	-0,002	-0,013	0,007
21,79	-0,002	0,002	0,011	-0,002	-0,015	0,008
23,74	-0,002	0,001	0,012	-0,002	-0,017	0,009
25,53	-0,002	0,001	0,010	-0,003	-0,015	0,010
27,66	-0,003	0,001	0,012	-0,003	-0,017	0,010
29,96	-0,003	0,000	0,013	-0,004	-0,020	0,012
30,85	-0,004	0,000	0,013	-0,004	-0,021	0,012
31,80	-0,004	0,000	0,014	-0,005	-0,022	0,013
33,49	-0,004	-0,001	0,014	-0,003	-0,024	0,013
35,60	-0,005	-0,001	0,016	-0,006	-0,024	0,014
40,64	-0,006	-0,002	0,017	-0,004	-0,030	0,016
51,31	-0,010	-0,008	0,023	-0,010	-0,041	0,023
56,02	-0,010	-0,010	0,023	-0,011	-0,043	0,027
60,15	-0,010	-0,011	0,027	-0,010	-0,047	0,032
65,90	-0,012	-0,013	0,028	-0,013	-0,050	0,037
70,67	-0,014	-0,015	0,034	-0,013	-0,055	0,044
70,92	-0,011	-0,003	0,007	-0,013	-0,049	0,055
75,54	-0,011	-0,003	0,005	-0,010	-0,051	0,057
81,00	0,002	0,024	0,004	-0,001	-0,029	0,059
80,50	0,005	0,026	0,003	-0,001	-0,028	0,059
85,66	0,004	0,023	0,004	0,000	-0,030	0,060
85,43	0,005	0,024	0,003	0,001	-0,029	0,061

Tabela D.2 – Continuação.

Força (kN)	SG6 (‰)	SG7 (‰)	SG8 (‰)	SG9 (‰)	SG10 (‰)	SG11 (‰)
96,79	0,017	0,028	-0,018	0,003	-0,030	0,054
95,90	0,017	0,029	-0,019	0,005	-0,029	0,052
105,89	0,020	0,027	-0,020	0,011	-0,036	0,038
115,86	0,028	0,026	-0,031	0,018	-0,035	0,038
116,09	0,025	0,027	-0,062	0,033	-0,046	-0,050
125,41	0,024	0,019	-0,069	0,036	-0,054	-0,057
135,53	0,017	0,006	-0,079	0,014	-0,069	-0,067
136,33	0,014	0,005	-0,079	0,007	-0,080	-0,093
146,61	0,010	-0,003	-0,086	0,005	-0,094	-0,114
156,41	0,005	-0,006	-0,088	0,014	-0,098	-0,122
164,88	0,276	-0,004	-0,150	-0,028	-0,122	-0,181
166,77	0,339	0,000	-0,157	-0,035	-0,127	-0,198
175,65	0,408	-0,006	-0,166	-0,036	-0,135	-0,208
186,30	0,580	-0,024	-0,177	-0,038	-0,194	-0,200
196,02	–	-0,120	-0,184	-0,045	-0,215	-0,205
205,91	–	-0,131	-0,187	-0,042	-0,224	-0,210
216,32	–	-0,135	-0,190	-0,042	-0,234	-0,216
225,97	–	-0,139	-0,193	-0,042	-0,243	-0,221
236,37	–	-0,144	-0,200	-0,042	-0,253	-0,227
246,69	–	-0,151	-0,204	-0,040	-0,263	-0,232
257,26	–	-0,157	-0,210	-0,043	-0,272	-0,240
266,09	–	-0,166	-0,215	-0,043	-0,281	-0,246
276,02	–	-0,170	-0,219	-0,041	-0,290	-0,253
296,79	–	-0,190	-0,231	-0,043	-0,311	-0,269
305,62	–	-0,197	-0,234	-0,048	-0,320	-0,277
316,04	–	-0,205	-0,267	-0,049	-0,336	-0,285
326,17	–	-0,220	–	-0,049	-0,349	-0,291
335,85	–	-0,227	–	-0,052	-0,362	-0,301
346,69	–	-0,236	–	-0,050	-0,375	-0,309
356,10	–	-0,245	–	-0,054	-0,390	-0,320
366,16	–	-0,256	–	-0,056	-0,404	-0,333
375,52	–	-0,268	–	-0,057	-0,419	-0,347
387,08	–	-0,283	–	-0,059	-0,436	-0,368
396,55	–	-0,298	–	-0,061	-0,451	-0,394
407,22	–	-0,312	–	-0,059	-0,462	-0,418

Tabela D.3 – Leituras dos LVDT e extensômetros colados no aço da viga VI-1.

Força (kN)	LVDT 1 (mm)	LVDT 2 (mm)	LVDT 3 (mm)	SG1 (‰)	SG2 (‰)	SG3 (‰)	SG4 (‰)	SG5 (‰)
0,71	0,00	0,00	0,00	0,014	-0,003	0,009	-0,004	0,001
1,19	0,00	0,00	-0,01	0,014	-0,003	0,008	-0,005	0,002
5,01	0,00	0,02	-0,01	0,014	-0,002	0,008	-0,005	0,010
10,22	0,00	0,08	0,00	0,014	-0,001	0,007	-0,005	0,020
15,00	0,00	0,20	0,00	0,014	0,000	0,007	-0,005	0,031
20,03	0,00	0,28	-0,01	0,014	0,001	0,006	-0,006	0,044
30,29	0,00	0,47	0,10	0,015	0,003	0,005	-0,005	0,067
40,27	0,19	0,68	0,32	0,015	0,005	0,004	-0,006	0,092
50,29	0,54	1,05	0,65	0,021	0,006	0,003	-0,006	0,243
60,45	0,93	1,44	1,01	0,025	0,008	0,002	-0,001	0,370
70,38	1,24	1,77	1,31	0,026	0,009	0,001	-0,002	0,475
80,17	1,62	2,15	1,67	0,052	0,001	0,004	-0,010	0,569
90,06	1,94	2,48	1,98	0,050	0,000	0,017	0,017	0,639
100,11	2,22	2,78	2,25	0,050	-0,001	0,017	0,011	0,706
110,10	2,49	3,06	2,50	0,051	-0,002	0,017	0,009	0,770
120,04	2,76	3,35	2,75	0,054	-0,002	0,021	0,010	0,838
130,06	3,08	3,67	3,03	0,077	-0,010	0,024	0,017	0,904
140,15	3,41	4,02	3,34	0,150	-0,004	0,018	0,038	0,971
149,95	3,73	4,38	3,68	0,172	-0,002	-0,008	0,086	1,035
160,19	4,01	4,68	3,95	0,188	0,000	-0,011	0,116	1,100
165,17	4,18	4,86	4,12	0,199	0,003	-0,011	0,145	1,148
165,41	4,35	5,02	4,26	0,220	0,005	-0,009	0,167	1,166
164,97	4,53	5,23	4,43	0,229	0,007	-0,008	0,192	1,205
160,39	4,75	5,66	4,62	0,239	0,014	-0,005	0,320	1,172
170,27	4,93	5,87	4,82	0,245	0,017	-0,002	0,324	1,229
180,31	5,15	6,11	5,01	0,251	0,022	-0,006	0,329	1,287
190,20	5,38	6,35	5,24	0,257	0,026	-0,009	0,336	1,349
200,70	5,62	6,62	5,45	0,265	0,033	-0,013	0,342	1,413
220,20	6,12	7,14	5,92	0,280	0,088	-0,023	0,363	1,537
240,20	6,63	7,69	6,41	0,301	0,135	-0,028	0,401	1,662
260,07	7,22	8,31	6,95	0,493	0,225	-0,025	0,403	1,793
280,09	7,87	8,95	7,51	1,486	0,485	-0,023	0,420	1,909
300,30	8,45	9,55	8,03	1,762	0,698	-0,019	0,467	2,038
320,57	9,03	10,14	8,56	1,993	0,939	-0,011	0,529	2,164
340,72	9,60	10,73	9,08	2,010	1,212	0,005	0,600	2,285
360,14	10,16	11,33	9,62	2,010	1,564	0,190	0,715	2,404
380,18	10,71	11,95	10,16	2,010	1,874	0,301	0,868	2,526
400,21	11,29	12,57	10,72	2,010	2,239	0,402	1,115	2,650
420,00	11,97	13,33	11,40	2,010	2,728	0,573	1,407	2,783
437,58	12,72	14,22	12,09	2,010	3,297	0,735	1,737	2,918

Tabela D.3 – Continuação.

Força (kN)	LVDT 1 (mm)	LVDT 2 (mm)	LVDT 3 (mm)	SG1 (‰)	SG2 (‰)	SG3 (‰)	SG4 (‰)	SG5 (‰)
440,39	12,72	14,22	12,10	2,010	3,355	0,744	1,746	2,926
460,42	13,02	14,53	12,45	2,010	3,472	0,778	1,824	3,021
461,70	13,14	14,65	12,57	2,010	3,624	0,825	1,906	3,107
470,28	13,33	14,86	12,75	2,010	3,652	0,840	1,957	3,167
475,93	13,48	15,04	12,91	2,010	3,686	0,861	2,024	3,227
480,23	13,63	15,19	13,04	2,010	3,721	0,880	2,087	3,272
489,41	13,95	15,57	13,37	2,010	3,827	0,933	2,246	3,307
490,89	14,01	15,62	13,42	2,010	3,844	0,941	2,269	3,313
497,51	14,25	15,89	13,66	2,010	3,917	0,980	2,378	3,421
500,16	14,35	16,00	13,75	2,010	3,947	0,997	2,424	3,449
503,37	14,48	16,14	13,87	2,010	3,979	1,017	2,488	3,481
505,61	14,57	16,24	13,96	2,010	4,001	1,031	2,532	3,491
510,08	14,73	16,42	14,13	2,010	4,036	1,059	2,612	3,517
516,62	15,00	16,70	14,38	2,010	4,084	1,110	2,703	3,655
517,18	15,01	16,73	14,40	2,010	4,088	1,114	2,710	3,660
520,27	15,14	16,86	14,52	2,010	4,115	1,135	2,756	3,697
518,85	15,21	16,97	14,65	2,010	4,128	1,158	2,923	3,699
520,31	15,27	17,07	14,73	2,010	4,143	1,199	2,992	3,709
522,16	15,34	17,15	14,81	2,010	4,154	1,225	3,026	3,719
523,60	15,40	17,22	14,88	2,010	4,162	1,241	3,052	3,731
525,03	15,47	17,30	14,94	2,010	4,170	1,253	3,074	3,746
525,11	15,48	17,31	14,95	2,010	4,170	1,255	3,076	3,748
530,17	15,68	17,55	15,16	2,010	4,189	1,280	3,131	3,798
531,39	15,73	17,64	15,24	2,010	4,194	1,288	3,148	3,811
532,69	15,80	17,74	15,33	2,010	4,200	1,295	3,171	3,830
533,33	15,84	17,77	15,37	2,010	4,203	1,298	3,184	3,837
535,22	15,93	17,88	15,47	2,010	4,209	1,305	3,211	3,858
540,05	16,16	18,17	15,73	2,010	4,224	1,323	3,270	3,941
540,30	16,17	18,19	15,74	2,010	4,225	1,324	3,273	3,946
541,52	16,24	18,27	15,82	2,010	4,229	1,327	3,290	3,975
541,84	16,26	18,30	15,85	2,010	4,230	1,328	3,296	3,985
543,26	16,33	18,38	15,92	2,010	4,233	1,331	3,311	4,008
545,24	16,41	18,49	16,02	2,010	4,236	1,334	3,332	4,045
545,96	16,46	18,55	16,08	2,010	4,237	1,334	3,346	4,060
546,27	16,48	18,57	16,11	2,010	4,238	1,333	3,352	4,065
547,18	16,53	18,64	16,16	2,010	4,240	1,333	3,365	4,083
547,83	16,61	18,73	16,24	2,010	4,239	1,329	3,382	4,108
548,58	16,66	18,79	16,30	2,010	4,240	1,327	3,394	4,123
550,10	16,75	18,90	16,40	2,010	4,242	1,326	3,418	4,147
550,87	16,79	18,96	16,45	2,010	4,243	1,325	3,431	4,157
551,84	16,87	19,06	16,54	2,010	4,244	1,324	3,455	4,175
552,79	16,95	19,19	16,67	2,010	4,246	1,323	3,487	4,208

Tabela D.4 – Leituras dos extensômetros colados na superfície do concreto e do CFC da viga VI-1.

Força (kN)	SG6 (‰)	SG7 (‰)	SG8 (‰)	SG9 (‰)	SG10 (‰)	SG11 (‰)	SG12 (‰)	SG13 (‰)	SG14 (‰)	SG15 (‰)
0,71	-0,009	-0,004	-0,005	-0,006	-0,004	-0,008	–	–	–	–
1,19	-0,010	-0,005	-0,006	-0,008	-0,005	-0,009	–	–	–	–
5,01	-0,011	-0,006	-0,006	-0,010	-0,006	-0,009	–	–	–	–
10,22	-0,014	-0,007	-0,007	-0,012	-0,008	-0,009	–	–	–	–
15,00	-0,015	-0,009	-0,007	-0,013	-0,009	-0,009	–	–	–	–
20,03	-0,016	-0,010	-0,008	-0,014	-0,010	-0,010	–	–	–	–
30,29	-0,020	-0,012	-0,009	-0,017	-0,012	-0,010	–	–	–	–
40,27	-0,023	-0,015	-0,010	-0,020	-0,014	-0,010	–	–	–	–
50,29	-0,026	-0,017	-0,012	-0,023	-0,017	-0,010	–	–	–	–
60,45	-0,028	-0,020	-0,013	-0,026	-0,019	-0,011	–	–	–	–
70,38	-0,031	-0,023	-0,015	-0,029	-0,021	-0,012	–	–	–	–
80,17	-0,034	-0,031	-0,026	-0,032	-0,026	-0,017	–	–	–	–
90,06	-0,038	-0,035	-0,030	-0,040	-0,039	-0,034	–	–	–	–
100,11	-0,041	-0,039	-0,035	-0,042	-0,046	-0,044	–	–	–	–
110,10	-0,045	-0,043	-0,040	-0,048	-0,054	-0,053	–	–	–	–
120,04	-0,047	-0,048	-0,046	-0,056	-0,073	-0,083	–	–	–	–
130,06	-0,057	-0,078	-0,098	-0,066	-0,089	-0,101	–	–	–	–
140,15	-0,106	-0,114	-0,097	-0,084	-0,114	-0,126	–	–	–	–
149,95	-0,118	-0,126	-0,107	-0,166	-0,213	-0,240	–	–	–	–
160,19	-0,129	-0,138	-0,127	-0,190	-0,244	-0,270	–	–	–	–
165,17	-0,138	-0,148	-0,146	-0,203	-0,259	-0,285	–	–	–	–
165,41	-0,144	-0,158	-0,168	-0,211	-0,266	-0,290	–	–	–	–
164,97	-0,158	-0,180	-0,196	-0,225	-0,282	-0,306	–	–	–	–
160,39	-0,168	-0,183	-0,200	-0,234	-0,286	-0,305	0,000	-0,018	0,010	0,000
170,27	-0,182	-0,199	-0,215	-0,241	-0,295	-0,315	0,196	-0,017	0,012	0,029
180,31	-0,196	-0,214	-0,228	-0,250	-0,306	-0,325	0,372	-0,018	0,014	0,062
190,20	-0,210	-0,229	-0,242	-0,261	-0,317	-0,337	0,506	-0,017	0,017	0,101
200,70	-0,224	-0,244	-0,255	-0,271	-0,328	-0,349	0,607	-0,016	0,020	0,172
220,20	-0,247	-0,272	-0,280	-0,281	-0,354	-0,377	0,792	-0,014	0,025	0,456
240,20	-0,273	-0,300	-0,310	-0,308	-0,377	-0,407	0,969	-0,073	0,030	1,032
260,07	-0,298	-0,330	-0,341	-0,329	-0,404	-0,437	1,149	-0,070	0,069	1,514
280,09	-0,321	-0,364	-0,382	-0,353	-0,430	-0,467	1,394	0,162	0,105	1,754
300,30	-0,339	-0,390	-0,414	-0,377	-0,457	-0,496	1,535	0,434	0,162	2,092
320,57	-0,353	-0,416	-0,446	-0,401	-0,484	-0,524	1,687	1,263	0,240	2,521
340,72	-0,358	-0,436	-0,479	-0,422	-0,508	-0,551	1,832	2,106	0,529	3,001
360,14	-0,352	-0,449	-0,515	-0,405	-0,511	-0,581	2,030	3,269	1,271	3,470
380,18	-0,352	-0,467	-0,549	-0,395	-0,495	-0,632	2,242	4,095	1,542	3,775
400,21	-0,344	-0,477	-0,581	-0,399	-0,497	-0,679	2,549	4,557	1,898	3,969
420,00	-0,328	-0,456	-0,636	-0,389	-0,498	-0,768	2,945	4,883	2,174	4,112
437,58	-0,315	-0,438	-0,698	-0,425	-0,510	-0,831	3,415	5,340	2,720	4,509

Tabela D.4 – Continuação.

Força (kN)	SG6 (‰)	SG7 (‰)	SG8 (‰)	SG9 (‰)	SG10 (‰)	SG11 (‰)	SG12 (‰)	SG13 (‰)	SG14 (‰)	SG15 (‰)
440,39	-0,314	-0,440	-0,700	-0,433	-0,508	-0,835	3,426	5,352	2,754	4,507
460,42	-0,317	-0,445	-0,732	-0,473	-0,488	-0,866	3,585	5,599	3,214	4,602
461,70	-0,305	-0,442	-0,750	-0,496	-0,440	-0,874	3,692	5,715	3,452	4,519
470,28	-0,307	-0,445	-0,767	-0,507	-0,422	-0,887	3,775	5,839	3,584	4,614
475,93	-0,306	-0,447	-0,781	-0,516	-0,402	-0,896	3,848	5,946	3,707	4,704
480,23	-0,306	-0,446	-0,792	-0,523	-0,379	-0,903	3,914	6,030	3,816	4,769
489,41	-0,303	-0,445	-0,824	-0,540	-0,317	-0,919	4,104	6,226	4,129	4,914
490,89	-0,304	-0,445	-0,830	-0,542	-0,308	-0,922	4,135	6,268	4,172	4,952
497,51	-0,305	-0,445	-0,858	-0,555	-0,271	-0,935	4,255	6,458	4,371	5,095
500,16	-0,304	-0,444	-0,871	-0,560	-0,254	-0,940	4,300	6,546	4,461	4,982
503,37	-0,304	-0,444	-0,886	-0,565	-0,229	-0,945	4,368	6,569	4,607	4,975
505,61	-0,304	-0,443	-0,898	-0,570	-0,211	-0,950	4,407	6,364	4,674	5,048
510,08	-0,304	-0,443	-0,922	-0,579	-0,180	-0,961	4,476	6,411	4,736	5,277
516,62	-0,298	-0,432	-0,967	-0,592	-0,023	-0,975	4,483	6,539	4,892	5,575
517,18	-0,298	-0,432	-0,969	-0,592	-	-0,975	4,487	6,550	4,897	5,596
520,27	-0,296	-0,424	-0,990	-0,598	-	-0,982	4,502	6,620	4,934	5,732
518,85	-0,292	-0,417	-0,993	-0,598	-	-0,953	4,503	6,624	4,904	2,925
520,31	-0,291	-0,411	-1,000	-0,603	-	-0,961	4,513	6,648	4,911	2,843
522,16	-0,290	-0,403	-1,007	-0,608	-	-0,968	4,520	6,676	4,926	2,828
523,60	-0,287	-0,394	-1,013	-0,613	-	-0,976	4,491	6,704	4,944	2,803
525,03	-0,285	-0,385	-1,018	-0,618	-	-0,984	4,481	6,724	4,963	2,770
525,11	-0,285	-0,384	-1,018	-0,619	-	-0,985	4,480	6,726	4,966	2,768
530,17	-0,280	-0,364	-0,996	-0,635	-	-1,009	4,473	6,797	5,031	2,753
531,39	-0,280	-0,360	-0,990	-0,640	-	-1,016	4,464	6,819	5,053	2,789
532,69	-0,279	-0,356	-0,985	-0,646	-	-1,024	4,451	6,840	5,079	2,839
533,33	-0,279	-0,354	-0,984	-0,650	-	-1,029	4,452	6,850	5,090	2,845
535,22	-0,280	-0,349	-0,981	-0,657	-	-1,037	4,459	6,882	5,112	2,833
540,05	-0,285	-0,336	-0,975	-0,678	-	-1,002	4,512	6,972	5,187	2,789
540,30	-0,285	-0,336	-0,975	-0,679	-	-1,003	4,514	6,975	5,191	2,790
541,52	-0,287	-0,333	-0,974	-0,686	-	-1,009	4,526	6,990	5,213	2,797
541,84	-0,288	-0,332	-0,974	-0,688	-	-1,012	4,530	6,996	5,220	2,804
543,26	-0,290	-0,330	-0,975	-0,694	-	-1,016	4,541	7,015	5,239	2,775
545,24	-0,293	-0,328	-0,976	-0,702	-	-1,024	4,557	7,043	5,264	2,741
545,96	-0,294	-0,327	-0,977	-0,707	-	-1,028	4,565	7,059	5,280	2,750
546,27	-0,294	-0,326	-0,977	-0,709	-	-1,029	4,568	7,065	5,286	2,761
547,18	-0,296	-0,325	-0,977	-0,713	-	-1,034	4,576	7,082	5,298	2,752
547,83	-0,299	-0,317	-0,979	-0,717	-	-1,040	4,551	7,252	5,311	2,701
548,58	-0,300	-0,316	-0,981	-0,721	-	-1,044	4,550	7,293	5,322	2,674
550,10	-0,303	-0,314	-0,984	-0,727	-	-1,052	4,557	7,334	5,345	2,553
550,87	-0,304	-0,313	-0,985	-0,730	-	-1,055	4,561	7,350	5,358	2,512
551,84	-0,306	-0,311	-0,986	-0,736	-	-1,058	4,568	7,372	5,375	2,434
552,79	-0,308	-0,309	-0,987	-0,742	-	-1,063	4,575	7,398	5,387	2,360

Tabela D.5 – Leituras dos LVDT e extensômetros colados no aço da viga VI-2.

Força (kN)	LVDT 1 (mm)	LVDT 2 (mm)	LVDT 3 (mm)	SG1 (‰)	SG2 (‰)	SG3 (‰)	SG4 (‰)	SG5 (‰)
0,00	0,00	0,00	0,00	-0,029	-0,006	0,027	0,084	0,001
0,47	0,00	-0,01	0,01	-0,028	-0,006	0,028	0,082	0,006
5,28	0,02	-0,01	0,05	-0,028	-0,007	0,029	0,082	0,016
10,46	0,03	-0,01	0,11	-0,028	-0,007	0,029	0,081	0,027
15,58	0,04	-0,01	0,18	-0,029	-0,007	0,029	0,082	0,038
20,19	0,16	-0,01	0,26	-0,028	-0,007	0,029	0,082	0,047
30,48	0,34	0,04	0,44	-0,029	-0,019	0,029	0,082	0,071
40,51	0,54	0,25	0,63	-0,030	-0,021	0,028	0,083	0,126
50,29	0,88	0,59	0,94	-0,030	-0,025	0,028	0,084	0,248
60,43	1,16	0,89	1,22	-0,030	-0,023	0,022	0,085	0,357
70,42	1,49	1,20	1,52	-0,034	-0,038	0,028	0,087	0,445
80,35	1,76	1,46	1,78	-0,035	-0,042	0,034	0,089	0,523
90,21	2,06	1,74	2,07	-0,037	-0,118	0,027	0,091	0,597
100,13	2,29	1,99	2,30	-0,055	-0,142	0,015	0,092	0,659
110,12	2,59	2,31	2,58	-0,065	-0,030	-0,004	0,098	0,721
120,29	2,83	2,58	2,82	-0,070	0,048	-0,008	0,099	0,778
130,22	3,07	2,85	3,06	-0,076	0,171	-0,004	0,098	0,837
140,11	3,31	3,14	3,32	-0,079	0,231	0,023	0,096	0,898
150,78	3,80	3,66	3,82	-0,057	0,427	0,883	0,089	0,960
160,24	4,01	3,90	4,04	-0,059	0,403	1,002	0,086	1,013
165,23	4,16	4,07	4,20	-0,065	0,371	1,090	0,086	1,046
165,22	4,23	4,17	4,32	-0,066	0,362	1,131	0,088	1,056
166,97	4,26	4,20	4,38	-0,068	0,319	1,142	0,087	1,063
166,83	4,62	4,53	4,76	-0,412	0,280	1,253	0,084	1,133
160,27	4,53	4,38	4,64	-0,339	0,477	1,081	0,217	1,111
170,28	4,68	4,54	4,79	-0,343	0,459	1,112	0,218	1,154
180,29	4,84	4,72	4,94	-0,348	0,441	1,145	0,218	1,201
190,31	5,00	4,92	5,12	-0,353	0,422	1,179	0,219	1,251
200,25	5,17	5,12	5,31	-0,358	0,403	1,218	0,219	1,304
220,46	5,56	5,59	5,70	-0,375	0,365	1,305	0,221	1,413
240,26	5,95	6,04	6,13	-0,414	0,332	1,407	0,224	1,521
260,59	6,38	6,55	6,58	-0,432	0,295	1,526	0,227	1,631
280,31	6,82	7,07	7,04	-0,152	0,269	1,662	0,231	1,737
303,66	7,34	7,69	7,59	-0,012	0,224	1,837	0,233	1,865
319,82	7,90	8,33	8,15	0,048	0,200	2,031	0,234	1,979
340,41	8,21	8,65	8,44	0,078	0,145	2,160	0,238	2,075
360,08	8,72	9,27	9,01	0,130	0,170	2,416	3,481	2,193
380,32	9,18	9,82	9,48	0,191	0,241	2,587	4,105	2,312
400,29	9,64	10,37	9,98	0,261	0,354	2,783	4,646	2,429

Tabela D.5 – Continuação.

Força (kN)	LVDT 1 (mm)	LVDT 2 (mm)	LVDT 3 (mm)	SG1 (‰)	SG2 (‰)	SG3 (‰)	SG4 (‰)	SG5 (‰)
420,21	10,13	10,95	10,52	0,342	0,382	3,040	5,024	2,552
440,26	10,62	11,56	11,04	0,432	0,350	3,323	5,402	2,688
460,41	11,11	12,13	11,56	0,500	0,225	3,559	5,684	2,824
480,31	11,63	12,74	12,11	0,547	0,288	3,756	5,915	2,992
500,21	12,18	13,40	12,72	0,635	0,543	3,962	6,051	3,155
512,96	12,53	13,82	13,10	0,723	0,842	4,140	6,103	3,275
515,85	12,62	13,93	13,19	0,747	0,905	4,189	6,121	3,309
519,80	12,75	14,08	13,31	0,782	0,983	4,251	6,147	3,350
530,42	13,10	14,48	13,67	0,922	1,166	4,417	6,228	3,458
535,53	13,38	14,70	13,86	1,003	1,258	4,496	6,270	3,515
540,40	13,56	14,91	14,04	1,126	1,355	4,569	6,311	3,584
541,11	13,86	15,16	14,26	2,076	1,507	4,637	6,334	3,645
539,49	14,02	15,26	14,33	2,076	1,505	4,643	6,325	3,645
546,25	14,48	15,58	14,58	2,076	1,527	4,731	6,347	3,701
544,45	14,49	15,58	14,58	2,076	1,534	4,737	6,345	3,702
547,24	14,66	15,73	14,71	2,076	1,559	4,794	6,335	3,738
550,77	14,74	15,81	14,78	2,076	1,551	4,828	6,349	3,761
555,12	14,89	15,99	14,93	2,076	1,535	4,892	6,375	3,823
557,31	14,97	16,09	15,01	2,076	1,524	4,917	6,389	3,855
558,31	15,01	16,14	15,06	2,076	1,518	4,929	6,394	3,872
560,46	15,10	16,25	15,15	2,076	1,504	4,953	6,409	3,914
561,17	15,15	16,29	15,19	2,076	1,498	4,962	6,415	3,935
563,09	15,24	16,39	15,28	2,076	1,480	4,984	6,435	3,989
565,43	15,33	16,49	15,36	2,076	1,461	5,006	6,453	4,029
566,54	15,38	16,56	15,41	2,076	1,452	5,019	6,466	4,050
569,42	15,51	16,70	15,55	2,076	1,438	5,048	6,496	4,106
570,45	15,55	16,76	15,58	2,076	1,439	5,057	6,506	4,129
572,07	15,63	16,84	15,65	2,076	1,446	5,070	6,522	4,163
574,29	15,73	16,96	15,75	2,076	1,464	5,086	6,546	4,216
576,36	15,85	17,10	15,87	2,076	1,491	5,099	6,575	4,278
577,65	15,92	17,19	15,94	2,076	1,508	5,106	6,590	4,310
578,44	15,96	17,22	15,97	2,076	1,518	5,109	6,600	4,332
580,54	16,07	17,35	16,08	2,076	1,560	5,117	6,624	4,381
582,27	16,17	17,47	16,18	2,076	1,636	5,121	6,647	4,429
582,74	16,27	17,56	16,24	2,076	1,787	5,121	6,660	4,456
583,88	16,38	17,67	16,33	2,076	1,965	5,120	6,677	4,495
584,55	16,43	17,72	16,37	2,076	2,075	5,119	6,684	4,512
584,80	16,46	17,76	16,39	2,076	2,127	5,118	6,688	4,522
586,14	16,55	17,85	16,47	2,076	2,307	5,112	6,702	4,556
586,65	16,63	17,91	16,53	2,076	2,398	5,108	6,710	4,581

Tabela D.6 – Leituras dos extensômetros colados na superfície do concreto e do CFC da viga VI-2.

Força (kN)	SG6 (‰)	SG7 (‰)	SG8 (‰)	SG9 (‰)	SG10 (‰)	SG11 (‰)	SG12 (‰)	SG13 (‰)	SG14 (‰)	SG15 (‰)
0,00	0,001	-0,005	0,000	-0,007	-0,001	-0,005	–	–	–	–
0,47	0,000	-0,005	0,001	-0,009	-0,001	-0,006	–	–	–	–
5,28	-0,002	-0,006	0,000	-0,010	-0,003	-0,007	–	–	–	–
10,46	-0,004	-0,008	-0,001	-0,012	-0,005	-0,008	–	–	–	–
15,58	-0,005	-0,010	-0,002	-0,014	-0,006	-0,008	–	–	–	–
20,19	-0,007	-0,012	-0,004	-0,015	-0,007	-0,009	–	–	–	–
30,48	-0,011	-0,016	-0,006	-0,018	-0,010	-0,010	–	–	–	–
40,51	-0,014	-0,019	-0,008	-0,021	-0,012	-0,011	–	–	–	–
50,29	-0,018	-0,023	-0,011	-0,024	-0,015	-0,012	–	–	–	–
60,43	-0,020	-0,025	-0,012	-0,027	-0,018	-0,015	–	–	–	–
70,42	-0,023	-0,030	-0,016	-0,030	-0,022	-0,017	–	–	–	–
80,35	-0,025	-0,032	-0,019	-0,034	-0,026	-0,020	–	–	–	–
90,21	-0,030	-0,040	-0,027	-0,038	-0,031	-0,024	–	–	–	–
100,13	-0,034	-0,046	-0,033	-0,041	-0,035	-0,029	–	–	–	–
110,12	-0,038	-0,059	-0,052	-0,044	-0,041	-0,036	–	–	–	–
120,29	-0,044	-0,069	-0,063	-0,048	-0,048	-0,044	–	–	–	–
130,22	-0,050	-0,078	-0,073	-0,050	-0,051	-0,049	–	–	–	–
140,11	-0,060	-0,087	-0,079	-0,049	-0,054	-0,058	–	–	–	–
150,78	-0,115	-0,199	-0,248	-0,078	-0,114	-0,144	–	–	–	–
160,24	-0,121	-0,211	-0,263	-0,088	-0,128	-0,159	–	–	–	–
165,23	-0,121	-0,216	-0,271	-0,094	-0,137	-0,171	–	–	–	–
165,22	-0,120	-0,219	-0,273	-0,096	-0,140	-0,175	–	–	–	–
166,97	-0,119	-0,219	-0,274	-0,097	-0,142	-0,177	–	–	–	–
166,83	-0,146	0,064	-0,345	-0,112	-0,160	-0,196	–	–	–	–
160,27	-0,142	0,114	-0,327	-0,111	-0,152	-0,185	0,003	-0,002	-0,007	0,000
170,28	-0,151	0,109	-0,338	-0,113	-0,156	-0,189	0,023	0,022	0,019	0,008
180,29	-0,161	0,105	-0,350	-0,115	-0,160	-0,194	0,029	0,037	0,039	0,016
190,31	-0,169	0,103	-0,368	-0,118	-0,164	-0,199	0,034	0,042	0,069	0,026
200,25	-0,177	0,103	-0,384	-0,123	-0,171	-0,206	0,040	0,048	0,076	0,038
220,46	-0,195	0,112	-0,418	-0,132	-0,184	-0,220	0,052	0,060	0,093	0,067
240,26	-0,215	0,176	-0,457	-0,144	-0,201	-0,238	0,063	0,071	0,107	0,109
260,59	-0,238	0,244	-0,502	-0,154	-0,218	-0,255	0,092	0,085	0,124	0,175
280,31	-0,276	0,303	-0,552	-0,165	-0,233	-0,273	0,105	0,098	0,140	0,276
303,66	-0,310	0,407	-0,590	-0,177	-0,253	-0,295	0,117	0,110	0,163	0,505
319,82	-0,338	0,475	-0,629	-0,188	-0,272	-0,321	0,136	0,129	0,187	0,938
340,41	-0,360	0,519	-0,661	-0,197	-0,289	-0,341	0,146	0,139	0,202	1,144
360,08	-0,390	0,625	-0,700	-0,304	-0,381	-0,393	0,162	0,155	0,223	1,266
380,32	-0,419	0,887	-0,737	-0,327	-0,404	-0,411	0,190	0,183	0,249	1,305
400,29	-0,449	–	-0,713	-0,332	-0,419	-0,425	0,236	0,229	0,302	1,370

Tabela D.6 – Continuação.

Força (kN)	SG6 (‰)	SG7 (‰)	SG8 (‰)	SG9 (‰)	SG10 (‰)	SG11 (‰)	SG12 (‰)	SG13 (‰)	SG14 (‰)	SG15 (‰)
420,21	-0,480		-0,750	-0,348	-0,438	-0,444	0,346	0,339	0,619	1,431
440,26	-0,516	–	-0,782	-0,361	-0,454	-0,460	0,538	0,668	1,207	1,526
460,41	-0,551	–	-0,820	-0,369	-0,467	-0,474	0,643	0,861	1,468	1,641
480,31	-0,586	–	-0,869	-0,372	-0,474	-0,485	0,763	1,284	1,692	1,770
500,21	-0,632	–	-0,920	-0,367	-0,471	-0,485	0,863	1,607	1,890	1,939
512,96	-0,657	–	-0,946	-0,373	-0,479	-0,493	0,981	1,790	2,016	2,080
515,85	-0,662	–	-0,952	-0,375	-0,482	-0,495	1,207	1,837	2,040	2,123
519,80	-0,669	–	-0,962	-0,379	-0,485	-0,499	1,428	1,902	2,074	2,174
530,42	-0,689	–	-1,001	-0,388	-0,495	-0,507	1,691	2,076	2,187	2,302
535,53	-0,699	–	-1,030	-0,393	-0,500	-0,510	1,825	2,154	2,247	2,354
540,40	-0,708	–	-1,052	-0,403	-0,506	-0,509	2,049	2,230	2,290	2,403
541,11	-0,693	–	-1,166	-0,431	-0,516	-0,497	2,271	2,284	2,331	2,439
539,49	-0,700	–	-1,134	-0,432	-0,515	-0,494	2,412	2,294	2,333	2,435
546,25	-0,700	–	-1,098	-0,444	-0,522	-0,493	2,643	2,381	2,372	2,473
544,45	-0,698	–	-1,095	-0,444	-0,521	-0,491	2,853	2,395	2,376	2,473
547,24	-0,699	–	-1,090	-0,453	-0,525	-0,489	3,037	2,474	2,406	2,497
550,77	-0,702	–	-1,092	-0,456	-0,529	-0,491	3,236	2,499	2,422	2,516
555,12	-0,703	–	-1,088	-0,462	-0,533	-0,493	3,461	2,600	2,457	2,550
557,31	-0,701	–	-1,079	-0,466	-0,536	-0,495	3,664	2,648	2,475	2,567
558,31	-0,702	–	-1,064	-0,467	-0,538	-0,495	3,921	2,672	2,484	2,574
560,46	-0,702	–	-1,059	-0,471	-0,540	-0,496	4,202	2,726	2,504	2,591
561,17	-0,701	–	-1,057	-0,472	-0,541	-0,497	4,366	2,747	2,512	2,598
563,09	-0,699	–	-1,054	-0,476	-0,545	-0,498	4,406	2,807	2,535	2,617
565,43	-0,699	–	-1,052	-0,480	-0,548	-0,499	4,459	2,860	2,555	2,640
566,54	-0,698	–	-1,051	-0,482	-0,550	-0,499	4,623	2,889	2,566	2,655
569,42	-0,696	–	-1,049	-0,488	-0,554	-0,501	4,684	2,970	2,595	2,694
570,45	-0,694	–	-1,048	-0,490	-0,555	-0,502	4,749	2,999	2,604	2,706
572,07	-0,692	–	-1,047	-0,493	-0,557	-0,503	–	3,045	2,617	2,726
574,29	-0,687	–	-1,046	-0,497	-0,561	-0,504	–	3,111	2,638	2,751
576,36	-0,682	–	-1,043	-0,502	-0,565	-0,506	–	3,199	2,661	2,777
577,65	-0,679	–	-1,039	-0,504	-0,568	-0,507	–	3,246	2,672	2,790
578,44	-0,678	–	-1,037	-0,505	-0,569	-0,508	–	3,273	2,679	2,797
580,54	-0,674	–	-1,032	-0,509	-0,572	-0,510	–	3,345	2,697	2,816
582,27	-0,669	–	-1,025	-0,513	-0,576	-0,512	–	3,426	2,712	2,838
582,74	-0,662	–	-1,021	-0,516	-0,578	-0,513	–	3,552	2,721	2,851
583,88	-0,652	–	-1,017	-0,519	-0,581	-0,515	–	3,644	2,733	2,866
584,55	-0,648	–	-1,015	-0,520	-0,582	-0,516	–	3,691	2,737	2,871
584,80	-0,646	–	-1,014	-0,521	-0,583	-0,516	–	3,717	2,740	2,872
586,14	-0,636	–	-1,010	-0,524	-0,585	-0,518	–	3,786	2,750	2,887
586,65	-0,632	–	-1,006	-0,525	-0,586	-0,519	–	3,822	2,755	2,895

Tabela D.7 – Leituras dos LVDT e extensômetros colados no aço da viga VI-3.

Força (kN)	LVDT 1 (mm)	LVDT 2 (mm)	LVDT 3 (mm)	SG1 (‰)	SG2 (‰)	SG3 (‰)	SG4 (‰)	SG5 (‰)
0,35	0,00	0,00	0,00	0,017	0,005	0,002	0,001	0,001
0,29	0,00	0,00	0,00	0,017	0,005	0,003	0,001	0,001
5,14	0,08	0,05	0,03	0,016	0,006	0,002	0,001	0,011
10,61	0,17	0,14	0,09	0,016	0,007	0,002	0,002	0,023
17,75	0,28	0,28	0,18	0,015	0,007	0,002	0,001	0,037
21,17	0,33	0,33	0,22	0,015	0,007	0,001	0,001	0,045
30,26	0,89	1,07	0,77	0,013	0,008	-0,001	0,005	0,172
40,23	0,95	1,16	0,84	0,013	0,009	-0,001	0,005	0,194
50,38	1,07	1,30	0,96	0,012	0,010	-0,002	0,006	0,218
60,21	1,22	1,47	1,11	0,012	0,011	-0,002	0,007	0,252
70,31	1,49	1,79	1,33	0,027	0,013	-0,004	0,008	0,322
80,35	1,75	2,10	1,58	0,010	0,015	-0,004	0,011	0,427
90,50	2,01	2,41	1,82	-0,004	0,021	-0,005	0,015	0,503
100,51	2,32	2,77	2,15	-0,007	0,024	0,009	0,046	0,582
110,24	2,53	3,03	2,35	-0,017	0,028	0,007	0,050	0,635
120,26	2,79	3,33	2,61	-0,030	0,031	0,006	0,055	0,695
130,23	3,09	3,68	2,89	0,150	0,046	0,001	0,061	0,752
140,51	3,37	4,02	3,19	0,875	0,053	0,006	0,080	0,810
150,59	3,66	4,37	3,49	1,887	0,059	-0,028	0,085	0,869
160,52	3,93	4,69	3,75	2,988	0,063	-0,032	0,088	0,927
165,92	4,17	4,94	3,92	2,795	0,026	-0,033	0,091	0,958
168,41	4,52	5,35	4,27	2,522	0,038	-0,036	0,096	1,019
168,55	4,61	5,44	4,33	2,486	0,039	-0,036	0,097	1,034
160,01	4,39	5,12	4,11	2,627	0,125	-0,033	0,117	0,998
170,07	4,53	5,31	4,26	2,595	0,124	-0,032	0,120	1,040
180,10	4,72	5,52	4,45	2,561	0,125	-0,036	0,119	1,085
190,34	4,91	5,76	4,64	2,542	0,123	-0,039	0,119	1,136
200,10	5,12	5,99	4,84	2,519	0,128	-0,038	0,125	1,188
222,44	5,60	6,59	5,33	2,454	0,129	-0,043	0,120	1,315
240,24	5,99	7,07	5,74	2,430	0,132	-0,043	0,120	1,417

Tabela D.7 – Continuação.

Força (kN)	LVDT 1 (mm)	LVDT 2 (mm)	LVDT 3 (mm)	SG1 (‰)	SG2 (‰)	SG3 (‰)	SG4 (‰)	SG5 (‰)
260,33	6,46	7,64	6,22	2,465	0,143	-0,048	0,114	1,531
280,48	7,04	8,24	6,76	2,537	0,902	-0,045	0,113	1,648
300,37	7,50	8,71	7,24	2,649	1,027	-0,045	0,114	1,759
320,40	8,01	9,24	7,76	2,726	1,161	-0,041	0,117	1,878
340,11	8,47	9,72	8,23	2,797	1,288	-0,032	0,120	1,986
360,25	8,95	10,24	8,77	2,965	1,431	0,209	0,125	2,098
383,99	9,55	10,90	9,44	3,120	1,572	1,088	0,138	2,232
400,26	9,93	11,29	9,86	3,213	1,665	1,195	0,144	2,321
420,42	10,41	11,78	10,35	3,276	1,776	1,321	0,152	2,428
440,72	10,92	12,31	10,90	3,401	1,942	1,644	0,157	2,535
460,25	11,40	12,80	11,40	3,533	2,152	1,812	0,167	2,637
480,01	11,94	13,36	11,98	3,739	2,443	1,955	0,186	2,743
500,03	12,47	13,90	12,53	4,017	2,653	2,139	0,215	2,853
510,16	12,76	14,20	12,86	4,172	2,792	2,598	0,231	2,909
520,07	13,05	14,51	13,17	4,349	3,067	2,959	0,246	2,971
530,13	13,35	14,82	13,50	4,551	3,375	3,106	0,258	3,017
540,38	13,60	15,08	13,75	4,686	3,520	3,178	0,265	3,048
550,19	13,88	15,37	14,03	4,850	3,720	3,260	0,274	3,211
560,36	14,21	15,72	14,38	5,099	3,963	3,353	0,293	3,326
565,30	14,41	15,94	14,60	5,260	4,410	3,441	0,484	3,377
570,15	14,58	16,13	14,80	5,418	4,645	3,515	0,671	3,415
575,27	14,82	16,36	15,04	5,670	5,009	3,602	0,827	3,465
580,10	15,03	16,58	15,27	6,042	5,335	3,683	0,930	3,603
583,54	15,22	16,79	15,49	6,432	5,625	3,790	1,064	3,650
586,27	15,36	16,95	15,67	6,802	5,857	3,899	1,175	3,673
587,13	15,41	17,00	15,72	6,924	5,934	3,939	1,210	3,676
587,93	15,45	17,05	15,77	7,022	5,997	3,965	1,236	3,679
588,48	15,48	17,08	15,80	7,093	6,045	3,981	1,252	3,681
589,06	15,51	17,11	15,85	7,165	6,096	3,995	1,268	3,687
589,75	15,55	17,14	15,88	7,243	6,160	4,012	1,283	3,693
590,52	15,59	17,19	15,92	7,340	6,280	4,032	1,303	3,701
590,81	15,64	17,25	16,01	7,440	6,408	4,054	1,325	3,709
590,33	15,66	17,27	16,03	7,453	6,425	4,064	1,333	3,708
590,13	15,66	17,28	16,04	7,458	6,432	4,068	1,338	3,707

Tabela D.8 – Leituras dos extensômetros colados na superfície do concreto e do CFC da viga VI-3.

Força (kN)	SG6 (‰)	SG7 (‰)	SG8 (‰)	SG9 (‰)	SG10 (‰)	SG11 (‰)	SG12 (‰)	SG13 (‰)	SG14 (‰)	SG15 (‰)
0,35	0,001	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	–	–	–	–
0,29	0,001	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	–	–	–	–
5,14	0,001	0,000	0,000	0,001	0,000	0,001	–	–	–	–
10,61	0,001	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	–	–	–	–
17,75	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,002	–	–	–	–
21,17	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,002	–	–	–	–
30,26	0,000	0,000	0,003	0,002	0,001	0,003	–	–	–	–
40,23	-0,001	-0,001	0,002	0,003	0,001	0,002	–	–	–	–
50,38	-0,002	-0,002	0,003	0,002	0,000	0,003	–	–	–	–
60,21	-0,003	-0,003	0,003	0,002	0,000	0,004	–	–	–	–
70,31	-0,003	-0,004	0,002	0,002	0,001	0,004	–	–	–	–
80,35	-0,004	-0,006	0,001	0,003	0,000	0,004	–	–	–	–
90,50	-0,006	-0,009	-0,003	0,004	0,000	0,002	–	–	–	–
100,51	-0,006	-0,011	-0,004	0,004	-0,014	-0,024	–	–	–	–
110,24	-0,007	-0,013	-0,007	0,004	-0,015	-0,026	–	–	–	–
120,26	-0,008	-0,016	-0,010	0,005	-0,017	-0,030	–	–	–	–
130,23	-0,005	-0,026	-0,034	0,003	-0,024	-0,044	–	–	–	–
140,51	-0,006	-0,033	-0,045	-0,008	-0,047	-0,076	–	–	–	–
150,59	-0,007	-0,041	-0,059	-0,026	-0,065	-0,095	–	–	–	–
160,52	-0,011	-0,051	-0,071	-0,032	-0,074	-0,106	–	–	–	–
165,92	-0,047	-0,115	-0,163	-0,035	-0,080	-0,115	–	–	–	–
168,41	-0,060	-0,141	-0,193	-0,030	-0,091	-0,134	–	–	–	–
168,55	-0,064	-0,147	-0,201	-0,032	-0,092	-0,137	–	–	–	–
160,01	-0,058	-0,137	-0,187	-0,029	-0,086	-0,125	0,000	0,002	0,005	0,004
170,07	-0,061	-0,141	-0,189	-0,031	-0,088	-0,128	0,033	0,025	0,015	0,037
180,10	-0,063	-0,144	-0,193	-0,034	-0,094	-0,133	0,070	0,044	0,016	0,072
190,34	-0,068	-0,149	-0,199	-0,039	-0,100	-0,140	0,120	0,057	0,018	0,121
200,10	-0,068	-0,153	-0,203	-0,043	-0,106	-0,146	0,176	0,064	0,021	0,194
222,44	-0,077	-0,167	-0,217	-0,044	-0,121	-0,163	0,322	0,077	0,055	0,473
240,24	-0,084	-0,178	-0,228	-0,058	-0,137	-0,180	0,460	0,091	0,075	0,774

Tabela D.8 – Continuação.

Força (kN)	SG6 (‰)	SG7 (‰)	SG8 (‰)	SG9 (‰)	SG10 (‰)	SG11 (‰)	SG12 (‰)	SG13 (‰)	SG14 (‰)	SG15 (‰)
260,33	-0,074	-0,180	-0,234	-0,078	-0,161	-0,205	0,659	0,105	0,083	1,229
280,48	–	-0,075	-0,370	-0,094	-0,182	-0,227	1,043	0,124	0,095	1,522
300,37	–	–	-0,385	-0,103	-0,196	-0,245	1,129	0,142	0,112	1,713
320,40	–	–	-0,414	-0,117	-0,215	-0,265	1,224	0,160	0,138	1,899
340,11	–	–	-0,440	-0,126	-0,229	-0,279	1,326	0,174	0,154	2,266
360,25	–	–	-0,466	-0,149	-0,254	-0,296	1,436	0,194	0,170	2,535
383,99	–	–	-0,435	-0,239	-0,369	-0,419	1,593	0,233	0,191	2,732
400,26	–	–	-0,456	-0,256	-0,390	-0,433	1,720	0,265	0,206	2,815
420,42	–	–	-0,482	-0,277	-0,413	-0,450	1,884	0,318	0,229	2,931
440,72	–	–	-0,515	-0,310	-0,449	-0,479	2,080	0,360	0,250	3,147
460,25	–	–	-0,548	-0,332	-0,474	-0,496	2,227	0,389	0,284	3,297
480,01	–	–	-0,585	-0,354	-0,501	-0,524	2,308	0,420	0,338	3,481
500,03	–	–	-0,611	-0,368	-0,537	-0,577	2,427	0,470	0,361	3,480
510,16	–	–	-0,620	-0,255	-0,774	-0,799	2,476	0,494	0,366	3,392
520,07	–	–	-0,615	–	-0,752	-0,687	2,541	0,521	0,376	3,388
530,13	–	–	-0,604	–	-0,783	-0,692	2,616	0,540	0,385	3,419
540,38	–	–	-0,609	–	-0,808	-0,702	2,688	0,556	0,393	3,450
550,19	–	–	-0,618	–	-0,842	-0,714	2,779	0,575	0,410	3,494
560,36	–	–	-0,619	–	-0,879	-0,728	2,879	0,601	0,435	3,538
565,30	–	–	-0,630	–	-0,919	-0,740	2,941	0,615	0,441	3,509
570,15	–	–	-0,638	–	-0,955	-0,759	2,994	0,624	0,458	3,521
575,27	–	–	-0,653	–	-1,010	-0,797	3,084	0,633	0,483	3,547
580,10	–	–	-0,665	–	-1,081	-0,859	3,148	0,644	0,511	3,564
583,54	–	–	-0,676	–	-1,159	-0,897	3,225	0,640	0,535	3,788
586,27	–	–	-0,684	–	-1,229	-0,927	3,275	0,631	0,555	3,865
587,13	–	–	-0,686	–	-1,259	-0,941	3,288	0,629	0,561	3,872
587,93	–	–	-0,688	–	-1,277	-0,950	3,298	0,628	0,565	3,888
588,48	–	–	-0,689	–	-1,288	-0,955	3,306	0,627	0,570	3,899
589,06	–	–	-0,691	–	-1,298	-0,960	3,314	0,627	0,573	3,912
589,75	–	–	-0,693	–	-1,307	-0,965	3,319	0,626	0,577	3,929
590,52	–	–	-0,696	–	-1,320	-0,971	3,327	0,624	0,582	3,953
590,81	–	–	-0,698	–	-1,351	-0,991	3,336	0,622	0,584	4,078
590,33	–	–	-0,699	–	-1,374	-1,004	3,337	0,622	0,584	4,165
590,13	–	–	-0,698	–	-1,386	-1,011	3,338	0,621	0,584	4,533

Tabela D.9 – Leituras dos LVDT e extensômetros colados no aço da viga VR2.

Força (kN)	LVDT 1 (mm)	LVDT 2 (mm)	LVDT 3 (mm)	SG1 (‰)	SG2 (‰)	SG3 (‰)	SG4 (‰)	SG5 (‰)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,004	0,005	0,005	0,001	0,001
0,03	0,00	0,00	0,00	-0,005	0,005	0,005	0,001	0,000
3,24	0,00	0,01	-0,01	-0,005	0,005	0,004	0,001	0,011
8,03	0,00	0,15	-0,01	-0,006	0,005	0,003	0,000	0,025
12,99	0,00	0,29	0,00	-0,002	0,003	0,002	0,002	0,040
18,20	0,01	0,43	0,01	-0,004	0,003	0,001	0,001	0,058
28,22	0,02	0,67	0,02	-0,005	0,000	-0,002	0,001	0,092
38,20	0,04	0,95	0,03	-0,003	-0,003	-0,003	-0,001	0,138
48,07	0,06	1,38	0,05	-0,005	0,010	0,000	-0,003	0,319
58,31	0,07	1,74	0,05	-0,004	0,009	0,007	-0,003	0,416
63,21	0,08	2,01	0,05	-0,005	-0,018	0,018	-0,001	0,489
68,14	0,09	2,14	0,05	-0,004	-0,026	0,020	-0,001	0,520
78,15	0,09	2,47	0,06	-0,001	-0,047	0,027	-0,001	0,603
88,13	0,11	2,81	0,06	-0,004	-0,065	0,030	0,003	0,688
98,16	0,11	3,14	0,06	0,000	-0,072	0,038	0,013	0,774
107,94	0,96	3,47	0,05	0,003	-0,062	0,037	0,017	0,855
118,22	1,05	3,85	0,04	0,022	-0,039	0,043	0,024	0,933
128,16	1,05	4,44	0,05	0,024	-0,022	0,044	0,001	1,014
138,75	2,36	4,82	0,05	0,003	-0,022	0,046	0,021	1,097
139,16	2,74	4,86	0,05	0,004	-0,021	0,045	0,032	1,102
148,78	2,43	5,19	0,04	-0,007	-0,021	0,048	0,092	1,173
158,18	2,69	5,55	0,04	-0,005	-0,016	0,054	0,202	1,244
168,05	2,94	5,95	0,04	-0,003	-0,008	0,058	0,290	1,319
177,86	3,09	6,31	0,03	0,000	0,002	0,061	0,358	1,391
188,27	3,34	6,80	0,04	0,005	0,026	0,063	0,449	1,470
181,76	3,35	6,81	0,03	0,008	0,037	0,063	0,508	1,447
198,83	3,55	7,22	0,03	0,010	0,046	0,068	0,528	1,542
208,65	3,61	7,64	0,03	0,015	0,062	0,072	0,632	1,615
218,09	3,66	8,13	0,03	0,024	0,074	0,080	0,683	1,683
229,26	3,67	8,62	0,04	0,031	0,083	0,089	0,725	1,757
232,41	3,69	8,87	0,04	0,046	0,089	0,104	0,759	1,774
238,66	3,70	9,12	0,04	0,060	0,093	0,111	0,763	1,823
249,85	3,73	9,59	0,04	0,180	0,102	0,119	0,783	1,898
257,98	5,00	10,01	0,04	0,416	0,115	0,124	0,806	1,958
269,79	5,14	10,52	0,04	0,540	0,125	0,130	0,824	2,018
273,38	5,20	10,91	0,05	0,617	0,139	0,136	0,841	2,052
276,87	5,20	10,96	0,05	0,624	0,141	0,138	0,842	2,068
280,69	5,23	11,10	0,05	0,638	0,145	0,139	0,845	2,084
284,89	5,23	11,18	0,06	0,641	0,146	0,138	0,847	2,086
286,33	5,24	11,25	0,06	0,646	0,148	0,140	0,848	2,110
288,07	5,24	11,34	0,06	0,648	0,151	0,141	0,848	2,123
289,45	5,24	11,43	0,06	0,656	0,151	0,142	0,850	2,132
292,70	5,24	11,62	0,06	0,662	0,155	0,142	0,851	2,155
293,56	5,23	11,71	0,06	0,672	0,156	0,143	0,852	2,162
294,54	5,23	11,80	0,06	0,682	0,157	0,143	0,853	2,170
296,98	5,23	11,98	0,06	0,690	0,160	0,144	0,855	2,178
298,80	5,24	12,08	0,06	0,704	0,163	0,146	0,856	2,197
300,61	5,24	12,26	0,06	0,719	0,168	0,148	0,857	2,213
302,51	6,71	12,52	0,06	0,740	0,174	0,149	0,862	2,228
302,50	6,93	12,89	0,06	0,753	0,179	0,151	0,862	2,238

Tabela D.10 – Leituras dos extensômetros colados na superfície do concreto da viga VR2.

Força (kN)	SG6 (‰)	SG7 (‰)	SG8 (‰)	SG9 (‰)	SG10 (‰)	SG11 (‰)
0,00	0,001	0,000	0,000	0,001	0,000	–
0,03	0,001	0,001	-0,001	0,001	0,001	–
3,24	0,002	-0,002	0,001	0,004	-0,001	–
8,03	0,003	-0,004	0,002	0,005	-0,004	–
12,99	0,003	-0,005	0,003	0,005	-0,006	–
18,20	0,004	-0,007	0,005	0,006	-0,010	–
28,22	0,003	-0,011	0,008	0,005	-0,017	–
38,20	0,003	-0,014	0,009	0,005	-0,022	–
48,07	0,003	-0,019	0,011	0,006	-0,028	–
58,31	0,002	-0,021	0,016	0,005	-0,033	–
63,21	0,004	-0,022	0,018	0,011	-0,036	–
68,14	0,004	-0,024	0,018	0,012	-0,039	–
78,15	0,006	-0,027	0,020	0,013	-0,042	–
88,13	0,008	-0,031	0,022	0,020	-0,048	–
98,16	0,011	-0,032	0,025	0,029	-0,053	–
107,94	0,017	-0,036	0,013	0,039	-0,060	–
118,22	0,032	-0,041	-0,032	0,037	-0,066	–
128,16	0,023	-0,088	-0,067	0,027	-0,183	–
138,75	0,010	-0,105	-0,091	0,034	-0,203	–
139,16	0,008	-0,106	-0,102	0,033	-0,206	–
148,78	0,004	-0,120	-0,132	0,037	-0,221	–
158,18	0,006	-0,132	-0,152	0,042	-0,233	–
168,05	0,008	-0,154	-0,252	0,047	-0,248	–
177,86	0,009	-0,168	-0,300	0,047	-0,260	–
188,27	0,011	-0,188	-0,323	0,050	-0,278	–
181,76	0,014	-0,189	-0,332	0,052	-0,274	–
198,83	0,014	-0,204	-0,350	0,052	-0,293	–
208,65	0,018	-0,217	-0,374	0,053	-0,310	–
218,09	0,022	-0,232	-0,393	0,055	-0,325	–
229,26	0,022	-0,245	-0,422	0,057	-0,342	–
232,41	0,022	-0,251	-0,436	0,059	-0,349	–
238,66	0,024	-0,262	-0,453	0,059	-0,359	–
249,85	0,029	-0,279	-0,480	0,060	-0,377	–
257,98	0,048	-0,299	-0,551	0,062	-0,389	–
269,79	0,053	-0,318	-0,602	0,064	-0,402	–
273,38	0,063	-0,315	-0,629	0,069	-0,395	–
276,87	0,064	-0,318	-0,637	0,069	-0,397	–
280,69	0,065	-0,321	-0,645	0,070	-0,399	–
284,89	0,065	-0,322	-0,650	0,070	-0,403	–
286,33	0,066	-0,327	-0,655	0,070	-0,404	–
288,07	0,067	-0,332	-0,655	0,072	-0,407	–
289,45	0,066	-0,336	-0,659	0,072	-0,408	–
292,70	0,066	-0,343	-0,669	0,073	-0,413	–
293,56	0,066	-0,344	-0,674	0,072	-0,416	–
294,54	0,068	-0,345	-0,680	0,073	-0,417	–
296,98	0,069	-0,349	-0,686	0,074	-0,419	–
298,80	0,069	-0,355	-0,695	0,074	-0,423	–
300,61	0,070	-0,362	-0,704	0,075	-0,427	–
302,51	0,070	-0,370	-0,710	0,077	-0,429	–
302,50	0,071	-0,375	-0,715	0,078	-0,432	–

Tabela D.11 – Leituras dos LVDT e extensômetros colados no aço da viga VII-1.

Força (kN)	LVDT 1 (mm)	LVDT 2 (mm)	LVDT 3 (mm)	SG1 (‰)	SG2 (‰)	SG3 (‰)	SG4 (‰)	SG5 (‰)
5,06	0,00	0,00	0,00	0,000	0,000	-0,050	-0,011	0,052
10,13	-0,01	0,07	-0,01	-0,001	0,000	-0,050	-0,012	0,061
15,12	0,00	0,15	-0,01	-0,001	0,000	-0,050	-0,013	0,071
19,99	-0,01	0,23	-0,02	-0,001	0,000	-0,050	-0,013	0,081
24,91	0,00	0,29	2,05	-0,002	0,000	-0,049	-0,014	0,092
29,98	0,00	0,41	2,05	-0,002	0,000	-0,048	-0,016	0,102
34,92	0,00	0,49	2,06	-0,003	-0,001	-0,048	-0,016	0,114
40,15	0,00	0,61	2,06	-0,007	-0,002	-0,049	-0,017	0,128
44,93	-0,01	0,73	2,06	-0,009	-0,002	-0,049	-0,018	0,140
50,00	0,00	0,87	2,06	-0,007	-0,003	-0,050	-0,020	0,155
55,00	-0,01	1,06	2,05	-0,007	-0,004	-0,050	-0,022	0,331
60,04	0,00	1,29	2,06	-0,006	-0,005	-0,048	-0,011	0,380
65,02	0,01	1,42	2,06	-0,005	-0,004	-0,047	-0,008	0,413
70,05	-0,02	1,62	2,05	-0,005	-0,005	-0,048	-0,022	0,447
75,01	0,00	1,71	2,05	-0,009	-0,005	-0,048	-0,022	0,481
80,03	-0,02	1,88	2,05	0,016	-0,005	-0,048	-0,019	0,516
85,02	-0,01	2,01	2,06	0,020	-0,005	-0,047	-0,016	0,553
90,04	-0,02	1,88	2,05	0,018	-0,006	-0,047	-0,015	0,590
95,05	-0,01	1,99	2,05	0,015	-0,006	-0,046	-0,012	0,630
100,06	-0,01	2,13	2,05	0,013	-0,006	-0,045	-0,010	0,669
105,03	0,00	2,24	2,05	0,011	-0,006	-0,045	-0,009	0,702
110,01	-0,01	2,41	2,04	0,012	-0,005	-0,044	-0,007	0,736
109,37	0,00	2,41	2,05	0,012	-0,005	-0,044	-0,004	0,740
110,09	-0,01	2,48	2,04	0,011	-0,004	-0,043	-0,003	0,751
111,68	0,00	2,75	2,04	0,012	0,007	-0,040	-0,001	0,806
111,46	0,01	2,74	2,05	0,012	0,008	-0,040	0,000	0,807
110,08	3,89	2,61	3,30	0,007	0,010	-0,036	0,003	0,922
120,05	3,67	2,76	3,30	0,004	0,011	-0,036	0,002	0,980
130,28	3,38	2,95	3,30	0,007	0,013	-0,033	0,003	1,037
140,12	3,09	3,16	3,30	0,007	0,012	-0,033	0,001	1,094
150,37	2,73	3,41	3,31	0,009	0,011	-0,031	0,001	1,158
169,82	1,88	4,01	3,31	0,016	-0,030	-0,039	0,006	1,278

Tabela D.11 – Continuação.

Força (kN)	LVDT 1 (mm)	LVDT 2 (mm)	LVDT 3 (mm)	SG1 (‰)	SG2 (‰)	SG3 (‰)	SG4 (‰)	SG5 (‰)
190,02	1,19	4,60	3,31	0,085	-0,031	-0,037	0,012	1,406
209,88	0,79	5,13	3,31	0,092	-0,032	-0,028	0,010	1,534
230,07	0,31	5,74	3,31	0,098	-0,034	-0,030	0,005	1,663
229,10	0,09	5,87	3,22	0,098	-0,035	-0,019	0,024	1,649
250,11	-0,36	6,34	3,22	0,102	-0,035	0,227	0,048	1,774
270,02	-0,82	6,92	3,11	0,110	-0,034	0,386	0,051	1,912
289,95	-1,25	7,51	3,12	0,119	-0,031	0,560	0,064	2,045
309,96	-1,72	8,10	2,99	0,125	-0,029	0,707	0,084	2,062
329,96	-2,16	8,69	3,00	0,131	-0,027	0,846	0,103	2,062
349,91	-2,68	9,37	2,78	0,134	-0,022	1,007	0,127	2,062
369,91	-3,23	10,07	2,78	0,138	-0,019	1,174	0,147	2,062
368,40	-3,31	10,15	2,60	0,140	-0,016	1,212	0,154	2,062
369,53	-3,33	10,19	2,57	0,142	-0,016	1,224	0,156	2,062
372,48	-3,36	10,25	2,53	0,141	-0,016	1,226	0,156	2,062
380,21	-3,52	10,46	2,38	0,141	-0,015	1,250	0,160	2,062
385,15	-3,63	10,62	2,26	0,143	-0,013	1,275	0,164	2,062
389,79	-3,74	10,81	2,15	0,142	-0,014	1,311	0,168	2,062
391,46	-3,83	10,94	2,12	0,146	-0,011	1,349	0,175	2,062
394,95	-3,92	11,04	2,10	0,146	-0,011	1,361	0,178	2,062
397,21	-3,96	11,10	2,11	0,146	-0,012	1,368	0,179	2,062
400,00	-4,01	11,17	2,11	0,146	-0,012	1,372	0,180	2,062
402,42	-4,10	11,23	2,11	0,146	-0,011	1,380	0,182	2,062
404,31	-4,16	11,30	2,11	0,146	-0,011	1,389	0,185	2,062
406,60	-4,18	11,37	2,11	0,147	-0,010	1,396	0,187	2,062
407,97	-4,25	11,43	2,08	0,147	-0,010	1,402	0,188	2,062
407,38	-4,26	11,43	2,08	0,147	-0,010	1,404	0,188	2,062
408,34	-4,29	11,50	2,08	0,149	-0,010	1,416	0,190	2,062
410,77	-4,34	11,56	2,08	0,150	-0,010	1,420	0,191	2,062
410,01	-4,34	11,56	2,08	0,150	-0,009	1,425	0,192	2,062
411,11	-4,40	11,62	2,08	0,151	-0,010	1,435	0,194	2,062
417,51	-4,66	11,92	2,08	0,154	-0,009	1,490	0,208	2,062
425,13	-4,84	12,12	2,08	0,155	-0,009	1,501	0,214	2,062
428,02	-4,90	12,20	2,09	0,155	-0,010	1,506	0,216	2,062
429,44	-4,96	12,28	2,09	0,156	-0,010	1,514	0,218	2,062
433,34	-5,16	12,52	2,09	0,159	-0,009	1,552	0,225	2,062

Tabela D.12 – Leituras dos extensômetros colados na superfície do concreto e do CFC da viga VII-1.

Força (kN)	SG6 (‰)	SG7 (‰)	SG8 (‰)	SG9 (‰)	SG10 (‰)	SG11 (‰)	SG12 (‰)	SG13 (‰)	SG14 (‰)	SG15 (‰)
5,06	-0,026	-0,027	-0,063	-0,054	0,124	-0,029	–	–	–	–
10,13	-0,028	-0,028	-0,065	-0,055	0,123	-0,030	–	–	–	–
15,12	-0,030	-0,030	-0,067	-0,056	0,122	-0,031	–	–	–	–
19,99	-0,031	-0,033	-0,068	-0,057	0,121	-0,032	–	–	–	–
24,91	-0,033	-0,034	-0,069	-0,058	0,120	-0,033	–	–	–	–
29,98	-0,034	-0,036	-0,071	-0,060	0,120	-0,034	–	–	–	–
34,92	-0,036	-0,039	-0,072	-0,061	0,119	-0,035	–	–	–	–
40,15	-0,038	-0,041	-0,074	-0,063	0,118	-0,036	–	–	–	–
44,93	-0,040	-0,043	-0,075	-0,064	0,117	-0,037	–	–	–	–
50,00	-0,042	-0,045	-0,077	-0,066	0,116	-0,038	–	–	–	–
55,00	-0,044	-0,047	-0,078	-0,068	0,115	-0,039	–	–	–	–
60,04	-0,046	-0,049	-0,080	-0,068	0,113	-0,040	–	–	–	–
65,02	-0,047	-0,051	-0,081	-0,070	0,112	-0,041	–	–	–	–
70,05	-0,036	-0,048	-0,081	-0,071	0,111	-0,042	–	–	–	–
75,01	-0,038	-0,050	-0,082	-0,072	0,110	-0,043	–	–	–	–
80,03	-0,040	-0,053	-0,084	-0,079	0,109	-0,044	–	–	–	–
85,02	-0,042	-0,055	-0,086	-0,080	0,108	-0,045	–	–	–	–
90,04	-0,044	-0,057	-0,088	-0,082	0,107	-0,046	–	–	–	–
95,05	-0,046	-0,059	-0,089	-0,083	0,106	-0,047	–	–	–	–
100,06	-0,048	-0,061	-0,090	-0,084	0,105	-0,048	–	–	–	–
105,03	-0,050	-0,063	-0,092	-0,086	0,103	-0,049	–	–	–	–
110,01	-0,051	-0,065	-0,093	-0,087	0,102	-0,050	–	–	–	–
109,37	-0,050	-0,064	-0,093	-0,086	0,103	-0,051	–	–	–	–
110,09	-0,049	-0,063	-0,094	-0,086	0,103	-0,052	–	–	–	–
111,68	-0,051	-0,072	-0,109	-0,083	0,101	-0,053	–	–	–	–
111,46	-0,050	-0,072	-0,109	-0,083	0,101	-0,054	–	–	–	–
110,08	-0,052	-0,069	-0,135	-0,087	0,099	-0,080	0,003	0,011	0,006	0,000
120,05	-0,058	-0,074	-0,150	-0,091	0,096	-0,081	0,004	0,014	0,008	-0,002
130,28	-0,057	-0,076	-0,126	-0,092	0,094	-0,082	0,006	0,019	0,012	-0,002
140,12	-0,062	-0,080	-0,162	-0,097	0,090	-0,083	0,008	0,023	0,015	-0,002
150,37	-0,057	-0,082	-0,182	-0,100	0,086	-0,084	-0,017	0,025	0,025	-0,002
169,82	-0,091	-0,144	-0,162	-0,108	0,065	-0,085	1,919	0,035	0,045	0,038

Tabela D.12 – Continuação.

Força (kN)	SG6 (‰)	SG7 (‰)	SG8 (‰)	SG9 (‰)	SG10 (‰)	SG11 (‰)	SG12 (‰)	SG13 (‰)	SG14 (‰)	SG15 (‰)
190,02	-0,123	-0,175	-0,025	-0,133	0,038	-0,086	2,080	0,040	0,051	0,070
209,88	-0,116	-0,215	0,032	-0,135	0,031	-0,087	2,080	0,044	0,057	0,088
230,07	-0,136	-0,238	-0,019	-0,239	-0,017	-0,088	2,080	0,044	0,069	0,241
229,10	-0,146	-0,237	-0,033	-0,247	-0,019	-0,089	2,080	0,043	0,071	0,246
250,11	-0,152	-0,248	-0,005	-0,294	-0,054	-0,090	2,080	0,046	0,082	0,266
270,02	-0,168	-0,271	-0,037	-0,326	-0,087	-0,091	2,080	0,048	0,089	0,304
289,95	-0,174	-0,290	-0,064	-0,354	-0,113	-0,092	2,080	0,059	0,097	0,362
309,96	-0,187	-0,308	-0,091	-0,381	-0,142	-0,093	2,080	0,069	0,105	0,460
329,96	-0,197	-0,325	-0,118	-0,404	-0,168	-0,094	2,080	0,086	0,117	0,691
349,91	-0,226	-0,343	-0,150	-0,430	-0,198	-0,095	2,080	0,144	0,149	2,065
369,91	-0,219	-0,364	-0,174	-0,455	-0,228	-0,096	2,080	0,277	0,403	2,065
368,40	-0,235	-0,364	-0,180	-0,457	-0,231	-0,097	2,080	0,429	0,472	2,065
369,53	-0,222	-0,366	-0,179	-0,458	-0,233	-0,098	2,080	0,484	0,491	2,065
372,48	-0,221	-0,367	-0,183	-0,461	-0,236	-0,099	2,080	0,500	0,501	2,065
380,21	-0,235	-0,373	-0,191	-0,469	-0,244	-0,100	2,080	0,592	0,555	2,065
385,15	-0,229	-0,377	-0,194	-0,472	-0,250	-0,101	2,080	0,676	0,650	2,065
389,79	-0,240	-0,380	-0,226	-0,476	-0,256	-0,102	2,080	0,797	0,738	2,065
391,46	-0,239	-0,381	-0,204	-0,480	-0,261	-0,103	2,080	0,939	0,817	2,065
394,95	-0,240	-0,384	-0,212	-0,482	-0,266	-0,104	2,080	1,004	0,853	2,065
397,21	-0,243	-0,387	-0,212	-0,486	-0,269	-0,105	2,080	1,046	0,872	2,065
400,00	-0,246	-0,390	-0,216	-0,488	-0,272	-0,106	2,080	1,078	0,886	2,065
402,42	-0,249	-0,392	-0,220	-0,491	-0,274	-0,107	2,080	1,122	0,901	2,065
404,31	-0,249	-0,394	-0,222	-0,493	-0,276	-0,108	2,080	1,175	0,916	2,065
406,60	-0,249	-0,396	-0,224	-0,495	-0,279	-0,109	2,080	1,215	0,930	2,065
407,97	-0,235	-0,390	-0,222	-0,496	-0,281	-0,110	2,080	1,250	0,943	2,065
407,38	-0,235	-0,390	-0,254	-0,496	-0,280	-0,111	2,080	1,253	0,945	2,065
408,34	-0,236	-0,392	-0,216	-0,498	-0,284	-0,112	2,080	1,279	0,963	2,065
410,77	-0,243	-0,394	-0,216	-0,500	-0,286	-0,113	2,080	1,293	0,972	2,065
410,01	-0,241	-0,394	-0,234	-0,500	-0,286	-0,114	2,080	1,301	0,975	2,065
411,11	-0,247	-0,396	-0,269	-0,502	-0,289	-0,115	2,080	1,331	0,987	2,065
417,51	-0,253	-0,407	-0,240	-0,514	-0,307	-0,116	2,080	1,545	1,053	2,065
425,13	-0,258	-0,415	-0,244	-0,522	-0,317	-0,117	2,080	1,614	1,074	2,065
428,02	-0,264	-0,418	-0,248	-0,524	-0,320	-0,118	2,080	1,647	1,080	2,065
429,44	-0,263	-0,420	-0,249	-0,526	-0,321	-0,119	2,080	1,687	1,087	2,065
433,34	-0,276	-0,428	-0,277	-0,534	-0,332	-0,120	2,080	1,925	1,113	2,065

Tabela D.13 – Leituras dos LVDT e extensômetros colados no aço da viga VII-2.

Força (kN)	LVDT 1 (mm)	LVDT 2 (mm)	LVDT 3 (mm)	SG1 (‰)	SG2 (‰)	SG3 (‰)	SG4 (‰)	SG5 (‰)
0,57	0,00	0,00	0,00	0,003	0,000	0,003	0,004	0,001
0,58	0,00	0,00	0,00	0,004	0,001	0,003	0,004	0,002
5,05	0,00	0,00	0,00	0,007	0,002	0,003	0,003	0,011
10,04	0,00	0,05	0,00	0,008	0,000	0,002	0,004	0,022
15,06	0,00	0,13	0,00	0,009	-0,001	0,001	0,002	0,033
20,19	0,00	0,22	0,00	0,009	-0,001	0,001	0,001	0,044
25,11	0,00	0,30	0,00	0,011	-0,002	0,000	0,001	0,055
30,19	0,00	0,38	0,01	0,012	-0,002	-0,001	0,000	0,067
35,16	0,00	0,47	0,00	0,012	-0,003	-0,001	0,001	0,094
40,14	0,00	0,60	0,00	0,013	-0,004	0,000	0,000	0,197
45,11	0,00	0,75	0,01	0,014	-0,004	0,003	-0,001	0,258
50,12	0,00	0,93	0,01	0,014	-0,003	-0,006	-0,001	0,297
55,06	0,00	1,07	0,01	0,015	-0,002	-0,007	-0,001	0,327
60,12	0,00	1,23	0,00	0,015	0,000	-0,006	0,000	0,360
65,20	0,00	1,39	0,01	0,016	0,020	-0,008	-0,001	0,393
70,09	0,09	1,53	0,01	0,017	0,016	-0,011	0,000	0,430
75,08	0,23	1,71	0,00	0,026	0,013	-0,013	0,002	0,472
80,12	0,33	1,84	0,01	0,029	0,010	-0,013	0,000	0,503
85,12	0,43	1,97	0,01	0,031	-0,001	-0,016	0,001	0,535
90,06	0,58	2,13	0,01	0,034	-0,018	-0,019	0,001	0,573
95,06	0,70	2,27	0,01	0,037	-0,034	-0,021	0,002	0,607
100,05	0,80	2,41	0,01	0,038	-0,051	-0,024	0,003	0,637
105,06	0,91	2,56	0,01	0,038	-0,063	-0,025	0,000	0,672
110,15	1,05	2,69	0,01	0,041	-0,065	-0,027	0,000	0,703
115,19	1,18	2,83	0,01	0,043	-0,067	-0,033	-0,003	0,736
120,10	1,29	2,97	0,01	0,046	-0,064	-0,034	-0,001	0,767
125,09	1,44	3,15	0,01	0,053	-0,052	-0,038	0,002	0,802
129,91	1,54	3,29	0,02	0,055	-0,031	-0,044	0,001	0,832
129,90	1,53	3,29	0,02	0,055	-0,030	-0,044	0,002	0,832
135,09	1,57	3,45	0,01	0,057	0,041	-0,045	0,004	0,863
135,37	1,76	3,50	0,01	0,058	0,089	-0,042	0,006	0,871
135,35	1,76	3,50	0,01	0,058	0,089	-0,042	0,006	0,871
135,11	2,11	3,82	-0,15	0,060	0,182	-0,038	-0,029	0,925
130,13	1,68	3,14	-6,39	0,052	0,222	0,008	-0,061	0,890
140,13	1,79	3,25	-6,39	0,052	0,229	0,007	-0,063	0,920
150,07	1,89	3,38	-6,38	0,054	0,237	0,005	-0,064	0,955
150,25	1,90	3,41	-6,38	0,053	0,238	0,005	-0,065	0,959
170,11	2,20	3,74	-6,39	0,058	0,271	0,001	-0,069	1,047
190,26	2,54	4,14	-6,39	0,057	0,325	-0,006	-0,071	1,152
210,33	2,98	4,65	-6,38	0,038	0,333	-0,014	0,005	1,271
230,21	3,42	5,13	-6,37	0,036	0,338	-0,021	0,136	1,386
250,07	3,90	5,65	-6,37	0,040	0,332	-0,028	0,303	1,507
270,43	4,30	6,15	-6,39	0,045	0,345	-0,031	0,397	1,628

Tabela D.13 – Continuação.

Força (kN)	LVDT 1 (mm)	LVDT 2 (mm)	LVDT 3 (mm)	SG1 (‰)	SG2 (‰)	SG3 (‰)	SG4 (‰)	SG5 (‰)
290,36	4,63	6,67	-6,77	0,033	0,343	-0,016	0,496	1,747
310,15	5,19	7,24	-6,72	0,049	0,388	0,029	0,597	1,869
331,85	5,80	7,83	-6,67	0,095	0,454	0,094	0,695	2,003
350,03	6,36	8,39	-6,65	0,156	0,503	0,172	0,823	2,074
370,41	7,12	9,16	-6,66	0,256	0,579	0,287	1,042	2,074
365,62	7,15	9,16	-6,66	0,263	0,574	0,302	1,081	2,074
370,10	7,26	9,26	-6,66	0,267	0,575	0,304	1,104	2,074
375,26	7,83	9,81	-6,61	0,298	0,593	0,336	1,236	2,074
369,54	7,83	9,82	-6,61	0,299	0,592	0,336	1,239	2,074
373,25	7,84	9,82	-6,60	0,304	0,594	0,337	1,244	2,074
382,12	7,86	9,93	-6,60	0,307	0,599	0,345	1,251	2,074
381,64	7,88	9,93	-6,60	0,309	0,599	0,346	1,253	2,074
385,46	7,94	10,01	-6,60	0,315	0,604	0,355	1,270	2,074
390,10	7,99	10,18	-3,35	0,387	0,625	0,350	1,292	2,271
410,21	8,43	10,65	-3,11	0,398	0,653	0,384	1,360	2,385
420,07	8,68	10,93	-2,99	0,414	0,666	0,403	1,410	2,441
430,07	8,88	11,20	-2,84	0,436	0,680	0,427	1,454	2,500
435,05	8,99	11,41	-2,76	0,450	0,686	0,450	1,484	2,530
435,71	9,04	11,45	-2,73	0,453	0,687	0,454	1,489	2,535
436,76	9,11	11,50	-2,69	0,455	0,689	0,457	1,495	2,541
437,84	9,16	11,55	-2,69	0,458	0,690	0,462	1,500	2,548
438,91	9,21	11,58	-2,67	0,461	0,690	0,463	1,505	2,553
440,08	9,26	11,62	-2,65	0,465	0,692	0,466	1,509	2,560
440,80	9,29	11,65	-2,62	0,466	0,693	0,468	1,511	2,565
442,13	9,33	11,69	-2,60	0,469	0,694	0,471	1,514	2,572
443,57	9,39	11,74	-2,58	0,473	0,696	0,474	1,518	2,582
444,08	9,40	11,75	-2,58	0,474	0,698	0,476	1,519	2,584
445,11	9,43	11,79	-2,55	0,476	0,698	0,479	1,522	2,591
445,90	9,48	11,82	-2,55	0,478	0,699	0,481	1,525	2,595
446,21	9,49	11,83	-2,53	0,479	0,699	0,483	1,526	2,598
447,16	9,54	11,87	-2,53	0,482	0,701	0,487	1,529	2,603
448,12	9,58	11,90	-2,51	0,485	0,703	0,491	1,532	2,609
448,67	9,60	11,92	-2,51	0,487	0,703	0,493	1,533	2,612
449,57	9,62	11,95	-2,48	0,489	0,705	0,495	1,536	2,617
450,85	9,68	11,99	-2,46	0,493	0,707	0,499	1,541	2,625
452,36	9,73	12,04	-2,44	0,499	0,709	0,504	1,546	2,633
453,11	9,78	12,08	-2,42	0,502	0,710	0,506	1,552	2,639
454,44	9,82	12,13	-2,39	0,506	0,712	0,508	1,563	2,646
456,23	9,90	12,20	-2,36	0,512	0,714	0,512	1,576	2,657
458,92	10,03	12,31	-2,32	0,523	0,718	0,519	1,593	2,673
460,10	10,05	12,34	-2,30	0,528	0,719	0,521	1,599	2,681
462,40	10,17	12,44	-2,24	0,536	0,723	0,525	1,612	2,695
463,46	10,22	12,48	-2,24	0,540	0,724	0,526	1,617	2,701
465,23	10,29	12,54	-2,20	0,547	0,727	0,529	1,625	2,713
466,57	10,36	12,60	-2,17	0,552	0,728	0,530	1,632	2,721

Tabela D.14 – Leituras dos extensômetros colados na superfície do concreto e do CFC da viga VII-2.

Força (kN)	SG6 (‰)	SG7 (‰)	SG8 (‰)	SG9 (‰)	SG10 (‰)	SG11 (‰)	SG12 (‰)	SG13 (‰)	SG14 (‰)	SG15 (‰)
0,57	0,001	0,001	0,000	0,002	0,002	-0,001	-	-	-	-
0,58	0,001	0,001	0,000	0,002	0,001	-0,001	-	-	-	-
5,05	-0,001	0,000	0,000	-0,001	-0,002	-0,003	-	-	-	-
10,04	-0,006	-0,005	-0,004	-0,005	-0,006	-0,007	-	-	-	-
15,06	-0,010	-0,009	-0,006	-0,009	-0,009	-0,010	-	-	-	-
20,19	-0,013	-0,012	-0,009	-0,012	-0,013	-0,013	-	-	-	-
25,11	-0,016	-0,015	-0,011	-0,015	-0,016	-0,015	-	-	-	-
30,19	-0,020	-0,019	-0,013	-0,019	-0,020	-0,019	-	-	-	-
35,16	-0,024	-0,022	-0,016	-0,023	-0,023	-0,021	-	-	-	-
40,14	-0,027	-0,026	-0,018	-0,026	-0,027	-0,024	-	-	-	-
45,11	-0,031	-0,029	-0,020	-0,029	-0,030	-0,028	-	-	-	-
50,12	-0,034	-0,033	-0,023	-0,033	-0,033	-0,030	-	-	-	-
55,06	-0,038	-0,036	-0,026	-0,036	-0,037	-0,033	-	-	-	-
60,12	-0,042	-0,040	-0,028	-0,040	-0,042	-0,039	-	-	-	-
65,20	-0,045	-0,043	-0,031	-0,043	-0,046	-0,042	-	-	-	-
70,09	-0,049	-0,046	-0,033	-0,047	-0,049	-0,045	-	-	-	-
75,08	-0,049	-0,052	-0,043	-0,049	-0,051	-0,047	-	-	-	-
80,12	-0,053	-0,058	-0,048	-0,052	-0,055	-0,050	-	-	-	-
85,12	-0,057	-0,063	-0,054	-0,056	-0,059	-0,055	-	-	-	-
90,06	-0,061	-0,067	-0,057	-0,060	-0,064	-0,060	-	-	-	-
95,06	-0,065	-0,071	-0,060	-0,064	-0,068	-0,066	-	-	-	-
100,05	-0,068	-0,074	-0,062	-0,067	-0,072	-0,069	-	-	-	-
105,06	-0,073	-0,080	-0,066	-0,070	-0,076	-0,074	-	-	-	-
110,15	-0,076	-0,083	-0,069	-0,072	-0,079	-0,079	-	-	-	-
115,19	-0,080	-0,088	-0,072	-0,079	-0,088	-0,090	-	-	-	-
120,10	-0,081	-0,089	-0,076	-0,081	-0,092	-0,096	-	-	-	-
125,09	-0,083	-0,098	-0,094	-0,086	-0,098	-0,104	-	-	-	-
129,91	-0,086	-0,103	-0,099	-0,092	-0,109	-0,118	-	-	-	-
129,90	-0,086	-0,103	-0,099	-0,092	-0,109	-0,118	-	-	-	-
135,09	-0,090	-0,108	-0,104	-0,100	-0,120	-0,131	-	-	-	-
135,37	-0,091	-0,102	-0,105	-0,104	-0,126	-0,140	-	-	-	-
135,35	-0,091	-0,102	-0,105	-0,104	-0,126	-0,140	-	-	-	-
135,11	-0,097	-0,112	-0,112	-0,164	-0,183	-0,202	-	-	-	-
130,13	-0,086	-0,098	-0,106	-0,157	-0,176	-0,195	-0,004	0,006	0,018	0,016
140,13	-0,090	-0,103	-0,111	-0,161	-0,181	-0,200	-0,005	0,011	0,031	0,032
150,07	-0,093	-0,106	-0,115	-0,166	-0,185	-0,204	-0,005	0,013	0,035	0,037
150,25	-0,095	-0,106	-0,115	-0,166	-0,187	-0,205	-0,005	0,013	0,037	0,039
170,11	-0,105	-0,117	-0,125	-0,181	-0,203	-0,223	-0,005	0,018	0,049	0,057
190,26	-0,118	-0,127	-0,131	-0,202	-0,226	-0,248	0,043	0,025	0,065	0,079
210,33	-0,145	-0,171	-0,200	-0,229	-0,258	-0,283	0,527	0,031	0,085	0,117
230,21	-0,169	-0,201	-0,232	-0,259	-0,296	-0,325	1,299	0,036	0,105	0,177
250,07	-0,205	-0,225	-0,231	-0,282	-0,332	-0,366	2,068	0,041	0,131	0,330
270,43	-0,247	-0,272	-0,274	-0,300	-0,355	-0,395	2,068	0,047	0,166	0,504

Tabela D.14 – Continuação.

Força (kN)	SG6 (‰)	SG7 (‰)	SG8 (‰)	SG9 (‰)	SG10 (‰)	SG11 (‰)	SG12 (‰)	SG13 (‰)	SG14 (‰)	SG15 (‰)
290,36	-0,327	-0,396	0,639	-0,314	-0,374	-0,418	2,068	0,053	0,219	0,692
310,15	-0,364	-0,448	0,928	-0,333	-0,399	-0,446	2,068	0,056	0,344	1,106
331,85	-0,398	-0,495	1,167	-0,353	-0,423	-0,472	2,068	0,059	0,659	1,511
350,03	-0,422	-0,535	1,342	-0,373	-0,445	-0,494	2,068	0,062	1,022	2,037
370,41	-0,446	-0,581	1,342	-0,404	-0,469	-0,500	2,068	0,074	1,079	2,037
365,62	-0,443	-0,579	1,342	-0,404	-0,468	-0,498	2,068	0,075	1,069	2,037
370,10	-0,447	-0,584	1,342	-0,409	-0,475	-0,503	2,068	0,076	1,069	2,037
375,26	-0,465	-0,612	1,342	-0,425	-0,496	-0,512	2,068	0,086	1,124	2,037
369,54	-0,462	-0,609	1,342	-0,420	-0,491	-0,507	2,068	0,085	1,122	2,037
373,25	-0,465	-0,613	1,342	-0,421	-0,493	-0,509	2,068	0,086	1,126	2,037
382,12	-0,472	-0,623	1,342	-0,427	-0,500	-0,514	2,068	0,087	1,140	2,037
381,64	-0,472	-0,623	1,342	-0,427	-0,499	-0,514	2,068	0,088	1,140	2,037
385,46	-0,475	-0,628	1,342	-0,430	-0,504	-0,516	2,068	0,089	1,146	2,037
390,10	-0,661	-0,927	1,615	-0,562	-0,665	-0,649	3,545	0,097	1,265	3,146
410,21	-0,681	-0,961	1,800	-0,577	-0,684	-0,664	3,810	0,103	1,338	3,352
420,07	-0,690	-0,980	1,906	-0,586	-0,695	-0,672	3,964	0,105	1,312	3,551
430,07	-0,700	-0,998	2,044	-0,594	-0,708	-0,681	4,137	0,109	1,318	3,700
435,05	-0,704	-1,009	2,125	-0,599	-0,716	-0,686	4,238	0,112	1,213	3,791
435,71	-0,704	-1,010	2,139	-0,600	-0,718	-0,687	4,250	0,112	1,191	3,585
436,76	-0,704	-1,012	2,159	-0,601	-0,721	-0,689	4,269	0,114	1,143	3,263
437,84	-0,704	-1,014	2,178	-0,603	-0,724	-0,691	4,289	0,114	1,116	3,675
438,91	-0,706	-1,016	2,196	-0,605	-0,726	-0,692	4,307	0,115	1,098	4,040
440,08	-0,706	-1,018	2,215	-0,606	-0,729	-0,693	4,329	0,116	1,090	4,436
440,80	-0,707	-1,020	2,228	-0,607	-0,729	-0,694	4,342	0,117	1,085	4,489
442,13	-0,708	-1,022	2,252	-0,608	-0,731	-0,696	4,366	0,118	1,080	4,585
443,57	-0,709	-1,025	2,280	-0,610	-0,734	-0,696	4,393	0,119	1,075	4,703
444,08	-0,709	-1,026	2,291	-0,610	-0,734	-0,696	4,403	0,120	1,067	4,732
445,11	-0,710	-1,028	2,312	-0,611	-0,736	-0,696	4,423	0,121	1,054	4,956
445,90	-0,711	-1,030	2,329	-0,612	-0,737	-0,697	4,439	0,122	1,043	4,991
446,21	-0,711	-1,030	2,336	-0,612	-0,737	-0,698	4,445	0,123	1,032	5,003
447,16	-0,712	-1,032	2,356	-0,613	-0,739	-0,698	4,464	0,124	1,016	5,035
448,12	-0,712	-1,034	2,377	-0,614	-0,741	-0,699	4,485	0,125	1,007	5,064
448,67	-0,713	-1,034	2,386	-0,615	-0,741	-0,699	4,496	0,126	1,004	5,078
449,57	-0,714	-1,036	2,404	-0,616	-0,743	-0,699	4,516	0,127	1,000	5,098
450,85	-0,714	-1,038	2,432	-0,617	-0,744	-0,699	4,543	0,129	0,997	5,129
452,36	-0,715	-1,042	2,464	-0,619	-0,746	-0,700	4,578	0,132	0,994	5,150
453,11	-0,715	-1,043	2,478	-0,616	-0,742	-0,690	4,597	0,134	0,992	5,055
454,44	-0,716	-1,047	2,508	-0,618	-0,744	-0,689	4,629	0,137	0,989	5,106
456,23	-0,718	-1,050	2,548	-0,619	-0,746	-0,689	4,669	0,141	0,980	5,158
458,92	-0,719	-1,057	2,616	-0,621	-0,749	-0,689	4,737	0,146	0,948	5,244
460,10	-0,720	-1,059	2,658	-0,621	-0,750	-0,690	4,765	0,150	0,945	5,278
462,40	-0,722	-1,065	2,731	-0,622	-0,751	-0,690	4,824	0,155	0,937	5,345
463,46	-0,723	-1,067	2,768	-0,623	-0,753	-0,691	4,851	0,157	0,935	5,373
465,23	-0,724	-1,071	2,830	-0,624	-0,755	-0,692	4,898	0,161	0,923	5,422
466,57	-0,725	-1,076	2,884	-0,625	-0,756	-0,692	4,936	0,164	0,917	5,463

Tabela D.15 – Leituras dos LVDT e extensômetros colados no aço da viga VII-3.

Força (kN)	LVDT 1 (mm)	LVDT 2 (mm)	LVDT 3 (mm)	SG1 (‰)	SG2 (‰)	SG3 (‰)	SG4 (‰)	SG5 (‰)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,019	0,005	0,003	0,002	0,001
5,49	0,14	0,02	0,01	0,018	0,006	0,003	-0,001	0,020
10,84	0,24	0,12	0,04	0,018	0,006	0,002	-0,001	0,032
14,98	0,37	0,32	0,27	0,017	0,006	0,003	-0,002	0,044
20,19	0,44	0,33	0,28	0,016	0,007	0,002	-0,004	0,055
25,51	0,52	0,40	0,36	0,016	0,007	0,002	-0,004	0,068
30,37	0,59	0,50	0,44	0,014	0,008	0,001	-0,005	0,081
35,38	0,69	0,60	0,53	0,013	0,008	0,001	-0,007	0,099
40,05	0,81	0,69	0,66	0,013	0,009	0,000	-0,006	0,143
45,27	0,94	0,72	0,79	0,012	0,009	0,000	-0,005	0,174
50,42	1,09	0,78	0,93	0,015	0,010	0,000	-0,005	0,204
55,33	1,26	0,89	1,08	0,042	0,011	0,000	0,000	0,243
60,21	1,42	1,09	1,25	0,051	0,011	-0,001	0,017	0,285
65,25	1,57	1,27	1,42	0,041	0,012	0,001	0,145	0,323
69,68	1,69	1,41	1,54	0,041	0,013	0,001	0,194	0,356
75,29	1,93	1,66	1,76	0,024	0,013	0,000	0,205	0,458
80,01	2,01	1,76	1,85	0,026	0,014	0,000	0,208	0,481
85,07	2,18	1,95	2,01	0,033	0,015	0,002	0,203	0,527
90,03	2,33	2,11	2,15	0,042	0,020	0,005	0,206	0,561
95,07	2,46	2,25	2,28	0,064	0,023	0,006	0,207	0,596
100,05	2,58	2,39	2,40	0,076	0,025	0,008	0,210	0,631
105,06	2,71	2,53	2,52	0,088	0,026	0,009	0,213	0,665
110,88	2,84	2,68	2,66	0,099	0,028	0,010	0,222	0,700
115,33	2,97	2,81	2,79	0,110	0,030	0,012	0,225	0,734
120,20	3,06	2,92	2,88	0,116	0,032	0,012	0,236	0,760
125,66	3,29	3,14	3,08	0,127	0,019	0,013	0,248	0,809
130,41	3,39	3,27	3,18	0,134	0,002	0,013	0,272	0,835
135,12	3,60	3,50	3,44	0,142	-0,004	-0,024	0,287	0,870
140,34	4,55	4,46	4,16	0,162	-0,010	-0,022	0,319	0,974
130,03	4,32	4,21	3,85	0,168	0,017	-0,004	0,359	0,876
140,15	4,46	4,37	4,00	0,171	0,017	-0,005	0,368	0,918
150,21	4,60	4,53	4,16	0,174	0,018	-0,006	0,380	0,964
160,18	4,75	4,70	4,32	0,179	0,018	-0,009	0,391	1,012
170,24	4,91	4,89	4,50	0,185	0,019	-0,009	0,403	1,066
180,17	5,10	5,11	4,70	0,190	0,020	-0,011	0,416	1,126
200,16	5,49	5,59	5,14	0,208	0,023	-0,012	0,442	1,257
220,22	5,91	6,08	5,59	0,225	0,023	-0,011	0,464	1,382
240,11	6,36	6,61	6,07	0,259	0,024	-0,006	0,475	1,511
260,13	6,86	7,17	6,59	0,283	0,025	-0,002	0,492	1,641
280,34	7,48	7,85	7,19	0,290	0,029	0,023	0,513	1,764
300,27	7,96	8,40	7,71	0,324	0,035	0,027	0,521	1,884
320,29	8,57	9,15	8,41	0,327	0,042	0,039	0,534	2,036
340,40	8,90	9,49	8,74	0,311	0,045	0,043	0,538	2,135

Tabela D.15 – Continuação.

Força (kN)	LVDT 1 (mm)	LVDT 2 (mm)	LVDT 3 (mm)	SG1 (‰)	SG2 (‰)	SG3 (‰)	SG4 (‰)	SG5 (‰)
360,76	9,40	10,08	9,30	0,306	0,051	0,060	0,545	2,261
380,63	9,93	10,72	9,92	0,429	0,059	0,122	0,548	2,385
399,96	10,65	11,71	10,91	0,600	0,068	0,438	0,548	2,509
392,00	10,81	11,91	11,30	0,608	0,067	0,471	0,535	2,486
391,95	10,81	11,91	11,31	0,608	0,068	0,465	0,535	2,485
390,18	10,84	11,96	11,40	0,606	0,068	0,428	0,532	2,479
390,04	10,85	11,97	11,41	0,605	0,068	0,422	0,532	2,478
389,93	10,86	11,98	11,43	0,605	0,068	0,414	0,530	2,478
389,93	10,86	11,99	11,44	0,605	0,068	0,408	0,529	2,478
390,11	10,87	12,01	11,46	0,605	0,068	0,399	0,528	2,478
390,07	10,88	12,02	11,47	0,605	0,068	0,393	0,526	2,479
390,31	10,88	12,02	11,48	0,605	0,069	0,388	0,526	2,479
390,54	10,90	12,04	11,51	0,604	0,069	0,377	0,525	2,480
390,37	10,90	12,05	11,52	0,604	0,069	0,372	0,524	2,479
390,06	10,90	12,05	11,53	0,603	0,069	0,369	0,524	2,479
389,91	10,90	12,05	11,53	0,603	0,069	0,367	0,524	2,478
389,72	10,90	12,05	11,53	0,603	0,069	0,365	0,524	2,477
389,63	10,90	12,05	11,53	0,603	0,069	0,363	0,524	2,477
385,56	10,88	12,05	11,53	0,599	0,069	0,348	0,522	2,463
384,88	10,87	12,05	11,53	0,599	0,069	0,347	0,522	2,461
383,20	10,85	12,05	11,53	0,598	0,069	0,343	0,522	2,455
382,55	10,85	12,05	11,53	0,597	0,069	0,340	0,521	2,452
382,56	10,85	12,05	11,53	0,597	0,069	0,336	0,521	2,452
382,77	10,85	12,05	11,53	0,597	0,069	0,334	0,521	2,452
387,67	10,89	12,05	11,53	0,600	0,070	0,330	0,520	2,468
393,08	10,95	12,12	11,61	0,607	0,070	0,328	0,520	2,487
397,26	11,01	12,21	11,70	0,614	0,071	0,327	0,521	2,503
400,10	11,06	12,27	11,76	0,621	0,071	0,325	0,521	2,513
401,66	11,09	12,31	11,80	0,625	0,071	0,325	0,522	2,520
403,56	11,13	12,36	11,85	0,631	0,072	0,324	0,522	2,528
405,06	11,16	12,40	11,90	0,637	0,072	0,324	0,523	2,536
406,09	11,19	12,44	11,94	0,642	0,072	0,324	0,523	2,541
408,41	11,24	12,51	12,02	0,653	0,073	0,323	0,524	2,552
410,01	11,29	12,57	12,08	0,663	0,073	0,324	0,524	2,561
411,64	11,33	12,63	12,14	0,673	0,073	0,325	0,524	2,569
413,12	11,37	12,68	12,21	0,684	0,074	0,326	0,525	2,578
415,87	11,46	12,80	12,33	0,704	0,074	0,329	0,526	2,593
416,76	11,49	12,85	12,39	0,714	0,075	0,330	0,526	2,598
415,42	11,53	12,92	12,49	0,721	0,075	0,330	0,526	2,595
414,59	11,56	12,97	12,56	0,722	0,075	0,330	0,523	2,593
414,39	11,58	13,01	12,61	0,724	0,076	0,331	0,521	2,593
414,55	11,60	13,05	12,67	0,726	0,076	0,332	0,518	2,594
415,22	11,64	13,12	12,74	0,731	0,076	0,326	0,516	2,597
415,66	11,69	13,18	12,81	0,736	0,076	0,311	0,515	2,599
416,00	11,73	13,24	12,90	0,741	0,077	0,291	0,513	2,602
416,30	11,76	13,31	12,97	0,745	0,077	0,276	0,512	2,603

Tabela D.16 – Leituras dos extensômetros colados na superfície do concreto e do CFC da viga VII-3.

Força (kN)	SG6 (‰)	SG7 (‰)	SG8 (‰)	SG9 (‰)	SG10 (‰)	SG11 (‰)	SG12 (‰)	SG13 (‰)	SG14 (‰)	SG15 (‰)
0,00	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	–	–	–	–
5,49	0,000	-0,001	0,000	-0,001	-0,001	0,000	–	–	–	–
10,84	-0,001	-0,001	-0,001	-0,002	-0,002	-0,001	–	–	–	–
14,98	-0,001	-0,002	-0,001	-0,003	-0,003	-0,001	–	–	–	–
20,19	-0,003	-0,003	-0,001	-0,005	-0,005	-0,001	–	–	–	–
25,51	-0,004	-0,004	-0,002	-0,006	-0,006	-0,002	–	–	–	–
30,37	-0,004	-0,005	-0,002	-0,007	-0,007	-0,002	–	–	–	–
35,38	-0,005	-0,005	-0,002	-0,008	-0,008	-0,003	–	–	–	–
40,05	-0,005	-0,006	-0,002	-0,009	-0,008	-0,003	–	–	–	–
45,27	-0,006	-0,007	-0,002	-0,011	-0,010	-0,003	–	–	–	–
50,42	-0,007	-0,007	-0,003	-0,012	-0,011	-0,004	–	–	–	–
55,33	-0,007	-0,008	-0,003	-0,013	-0,012	-0,004	–	–	–	–
60,21	-0,008	-0,009	-0,003	-0,014	-0,013	-0,004	–	–	–	–
65,25	-0,008	-0,009	-0,003	-0,015	-0,015	-0,006	–	–	–	–
69,68	-0,009	-0,010	-0,004	-0,016	-0,016	-0,007	–	–	–	–
75,29	-0,009	-0,010	-0,006	-0,018	-0,018	-0,008	–	–	–	–
80,01	-0,009	-0,011	-0,007	-0,019	-0,019	-0,009	–	–	–	–
85,07	-0,008	-0,011	-0,009	-0,020	-0,021	-0,011	–	–	–	–
90,03	-0,004	-0,014	-0,023	-0,021	-0,024	-0,015	–	–	–	–
95,07	-0,004	-0,015	-0,026	-0,022	-0,026	-0,018	–	–	–	–
100,05	-0,005	-0,016	-0,028	-0,023	-0,028	-0,020	–	–	–	–
105,06	-0,005	-0,017	-0,031	-0,024	-0,030	-0,022	–	–	–	–
110,88	-0,006	-0,019	-0,033	-0,024	-0,033	-0,027	–	–	–	–
115,33	-0,006	-0,020	-0,035	-0,024	-0,035	-0,029	–	–	–	–
120,20	-0,005	-0,021	-0,037	-0,025	-0,036	-0,031	–	–	–	–
125,66	-0,003	-0,012	-0,021	-0,023	-0,036	-0,035	–	–	–	–
130,41	-0,004	-0,016	-0,035	-0,024	-0,037	-0,038	–	–	–	–
135,12	-0,007	-0,023	-0,047	-0,054	-0,088	-0,116	–	–	–	–
140,34	-0,091	-0,129	-0,167	-0,090	-0,155	-0,206	–	–	–	–
130,03	-0,085	-0,118	-0,148	-0,094	-0,151	-0,193	0,020	0,000	0,015	0,012
140,15	-0,088	-0,123	-0,152	-0,098	-0,157	-0,199	0,074	0,000	0,040	0,055
150,21	-0,093	-0,128	-0,158	-0,103	-0,163	-0,206	0,165	0,001	0,078	0,109
160,18	-0,097	-0,132	-0,163	-0,108	-0,170	-0,213	0,250	0,001	0,105	0,181
170,24	-0,102	-0,138	-0,169	-0,114	-0,177	-0,221	0,340	0,002	0,118	0,262
180,17	-0,107	-0,145	-0,176	-0,119	-0,184	-0,230	0,454	0,003	0,132	0,355
200,16	-0,118	-0,160	-0,193	-0,132	-0,202	-0,249	0,700	0,008	0,167	0,608
220,22	-0,133	-0,179	-0,214	-0,146	-0,221	-0,271	0,972	0,014	0,217	0,940
240,11	-0,150	-0,199	-0,236	-0,163	-0,243	-0,294	1,252	0,015	0,291	1,364
260,13	-0,175	-0,225	-0,266	-0,188	-0,274	-0,325	1,515	0,012	0,407	1,802
280,34	-0,186	-0,240	-0,284	-0,262	-0,350	-0,393	1,822	0,031	0,650	2,356
300,27	-0,196	-0,256	-0,302	-0,285	-0,378	-0,423	2,123	0,244	1,017	2,605
320,29	-0,206	-0,271	-0,313	-0,312	-0,411	-0,457	2,384	1,224	1,776	2,902
340,40	-0,215	-0,283	-0,325	-0,329	-0,433	-0,480	2,571	1,485	2,061	3,011

Tabela D.16 – Continuação.

Força (kN)	SG6 (‰)	SG7 (‰)	SG8 (‰)	SG9 (‰)	SG10 (‰)	SG11 (‰)	SG12 (‰)	SG13 (‰)	SG14 (‰)	SG15 (‰)
360,76	-0,225	-0,296	-0,338	-0,351	-0,461	-0,510	2,871	1,933	2,453	3,103
380,63	-0,231	-0,306	-0,349	-0,362	-0,481	-0,538	3,218	2,206	2,696	2,875
399,96	-0,232	-0,309	-0,356	-0,349	-0,455	-0,589	3,698	2,388	2,459	0,033
392,00	-0,230	-0,307	-0,354	-0,367	-0,486	-0,601	3,705	2,393	1,606	0,057
391,95	-0,230	-0,306	-0,354	-0,368	-0,487	-0,602	3,704	2,393	1,567	0,058
390,18	-0,229	-0,305	-0,352	-0,373	-0,498	-0,610	3,694	2,389	1,275	0,065
390,04	-0,229	-0,305	-0,352	-0,374	-0,500	-0,612	3,692	2,389	1,271	0,065
389,93	-0,229	-0,305	-0,352	-0,375	-0,502	-0,614	3,691	2,389	1,266	0,065
389,93	-0,229	-0,305	-0,352	-0,375	-0,502	-0,615	4,180	2,388	1,258	0,065
390,11	-0,229	-0,305	-0,352	-0,377	-0,504	-0,616	4,179	2,388	1,253	0,064
390,07	-0,229	-0,305	-0,352	-0,377	-0,505	-0,617	4,178	2,388	1,250	0,062
390,31	-0,229	-0,305	-0,351	-0,377	-0,506	-0,618	4,177	2,388	1,222	0,061
390,54	-0,228	-0,305	-0,351	-0,378	-0,508	-0,619	4,176	2,388	1,214	0,058
390,37	-0,228	-0,305	-0,351	-0,379	-0,508	-0,620	4,175	2,388	1,211	0,057
390,06	-0,228	-0,305	-0,351	-0,379	-0,508	-0,620	4,174	2,387	1,204	0,056
389,91	-0,228	-0,305	-0,351	-0,379	-0,509	-0,620	4,172	2,386	1,197	0,056
389,72	-0,228	-0,304	-0,351	-0,379	-0,509	-0,620	4,171	2,386	1,188	0,055
389,63	-0,228	-0,304	-0,351	-0,379	-0,509	-0,620	4,170	2,386	1,183	0,055
385,56	-0,226	-0,302	-0,348	-0,376	-0,507	-0,616	4,153	2,378	1,166	0,049
384,88	-0,225	-0,301	-0,348	-0,376	-0,507	-0,615	4,149	2,377	1,165	0,048
383,20	-0,225	-0,300	-0,347	-0,375	-0,505	-0,614	4,142	2,374	1,162	0,047
382,55	-0,224	-0,300	-0,346	-0,375	-0,505	-0,613	4,138	2,372	1,161	0,046
382,56	-0,224	-0,299	-0,346	-0,375	-0,505	-0,613	4,137	2,371	1,159	0,045
382,77	-0,224	-0,300	-0,347	-0,375	-0,505	-0,613	4,136	2,372	1,159	0,045
387,67	-0,226	-0,303	-0,349	-0,379	-0,510	-0,619	4,151	2,378	1,159	0,046
393,08	-0,229	-0,305	-0,352	-0,383	-0,516	-0,625	4,172	2,388	1,163	0,049
397,26	-0,231	-0,308	-0,355	-0,387	-0,521	-0,631	4,197	2,398	1,167	0,053
400,10	-0,232	-0,310	-0,356	-0,389	-0,524	-0,635	4,218	2,408	1,168	0,056
401,66	-0,232	-0,310	-0,357	-0,391	-0,526	-0,638	4,232	2,413	1,166	0,059
403,56	-0,233	-0,311	-0,359	-0,393	-0,529	-0,641	4,251	2,422	1,165	0,063
405,06	-0,234	-0,312	-0,359	-0,394	-0,531	-0,643	4,267	2,429	1,163	0,066
406,09	-0,234	-0,313	-0,360	-0,395	-0,532	-0,644	4,279	2,433	1,162	0,067
408,41	-0,235	-0,314	-0,361	-0,397	-0,534	-0,647	4,304	2,444	1,160	0,072
410,01	-0,235	-0,314	-0,362	-0,398	-0,536	-0,649	4,326	2,453	1,159	0,076
411,64	-0,236	-0,315	-0,363	-0,400	-0,538	-0,651	4,346	2,461	1,158	0,078
413,12	-0,236	-0,316	-0,364	-0,401	-0,540	-0,652	4,369	2,469	1,157	0,081
415,87	-0,237	-0,317	-0,366	-0,403	-0,544	-0,655	4,407	2,482	1,154	0,088
416,76	-0,237	-0,318	-0,366	-0,404	-0,545	-0,656	4,422	2,488	1,147	0,087
415,42	-0,235	-0,316	-0,365	-0,402	-0,546	-0,656	4,422	2,488	0,880	0,049
414,59	-0,234	-0,315	-0,364	-0,400	-0,545	-0,653	4,417	2,485	0,875	0,037
414,39	-0,234	-0,314	-0,363	-0,400	-0,546	-0,652	4,414	2,485	0,872	0,031
414,55	-0,233	-0,314	-0,363	-0,401	-0,547	-0,653	4,414	2,485	0,869	0,023
415,22	-0,233	-0,314	-0,363	-0,401	-0,549	-0,653	4,417	2,486	0,860	0,018
415,66	-0,233	-0,314	-0,363	-0,402	-0,551	-0,653	4,420	2,487	0,841	0,014
416,00	-0,233	-0,313	-0,362	-0,402	-0,553	-0,651	4,425	2,488	0,828	0,000
416,30	-0,233	-0,313	-0,362	-0,403	-0,556	-0,651	4,428	2,489	0,822	0,037

Anexo E

Gráficos dos Resultados dos Ensaios das Vigas

E.1.

Viga de Referência VR1



Figura E.1 – Diagrama força x deformação específica do aço referente ao extensômetro SG1 colado num estribo da viga VR1.

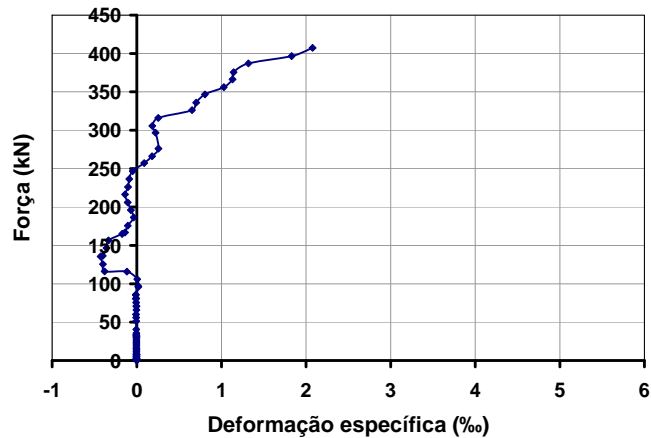


Figura E.2 – Diagrama força x deformação específica do aço referente ao extensômetro SG2 colado num estribo da viga VR1.

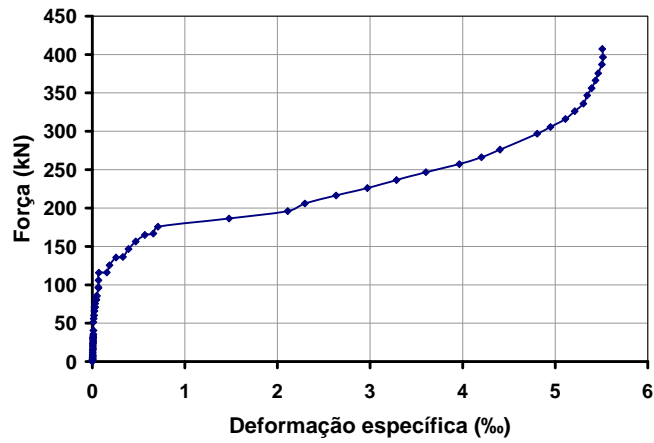


Figura E.3 – Diagrama força x deformação específica do aço referente ao extensômetro SG3 colado num estribo da viga VR1.



Figura E.4 – Diagrama força x deformação específica do aço referente ao extensômetro SG4 colado num estribo da viga VR1.



Figura E.5 – Diagrama força x deformação específica do aço referente ao extensômetro SG5 colado na armadura de flexão da viga VR1.

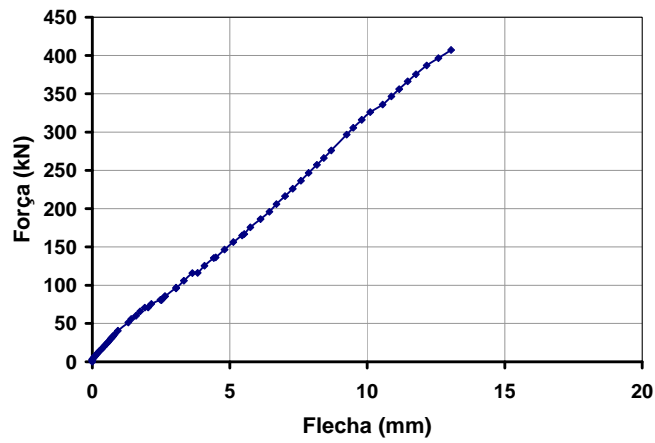


Figura E.6 – Diagrama força x flecha referente ao LVDT 2 da viga VR1.

E.2.

Viga VI-1

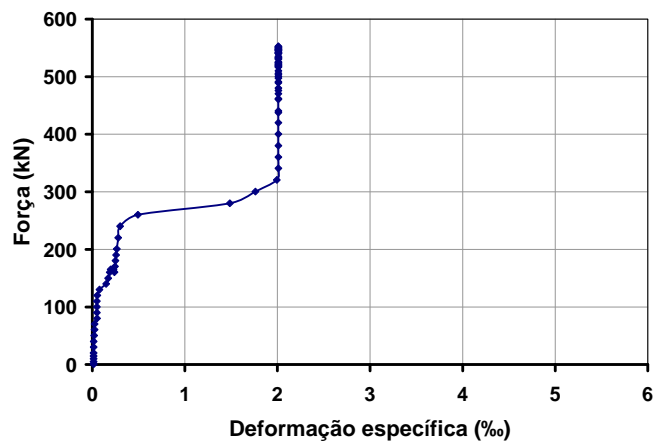


Figura E.7 – Diagrama força x deformação específica do aço referente ao extensômetro SG1 colado num estribo da viga VI-1.

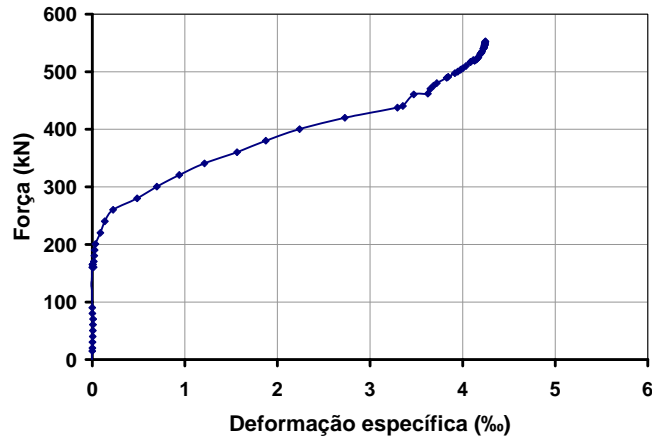


Figura E.8 – Diagrama força x deformação específica do aço referente ao extensômetro SG2 colado num estribo da viga VI-1.

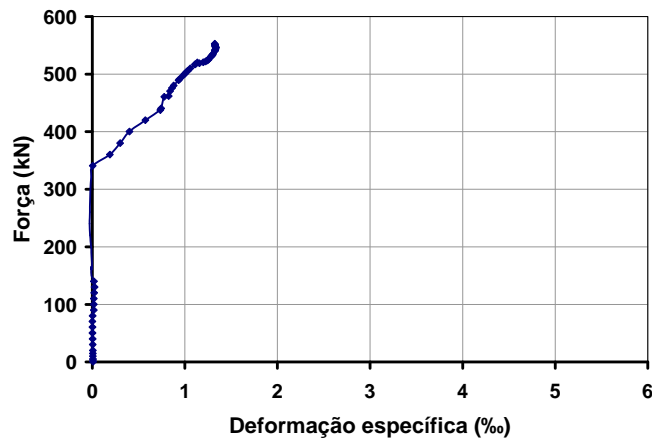


Figura E.9 – Diagrama força x deformação específica do aço referente ao extensômetro SG3 colado num estribo da viga VI-1.

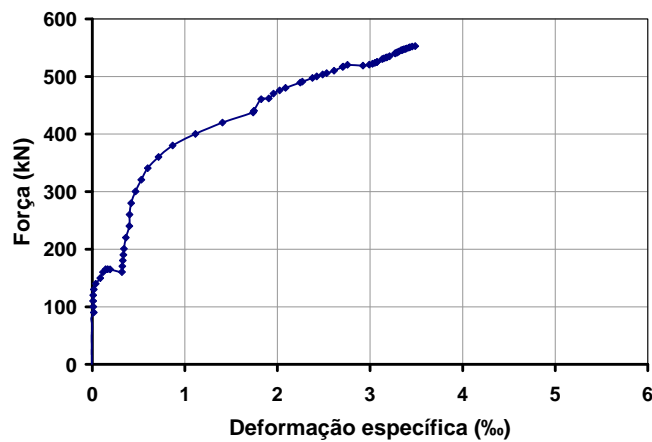


Figura E.10 – Diagrama força x deformação específica do aço referente ao extensômetro SG4 colado num estribo da viga VI-1.

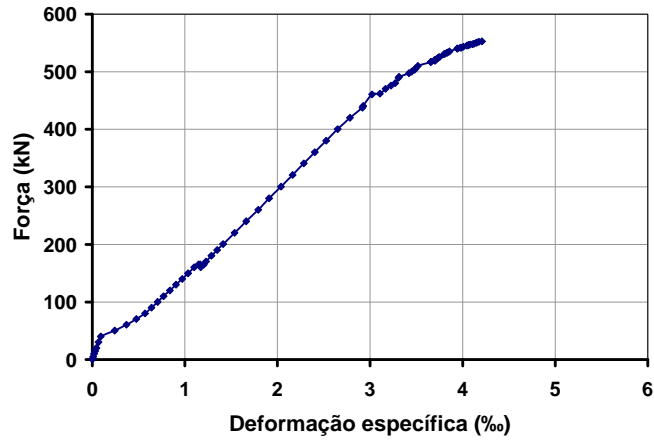


Figura E.11 – Diagrama força x deformação específica do aço referente ao extensômetro SG5 colado na armadura de flexão da viga VI-1.

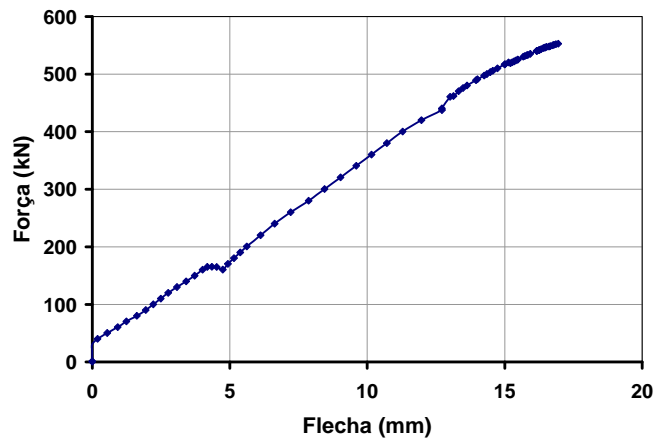


Figura E.12 – Diagrama força x flecha referente ao LVDT 1 da viga VI-1.

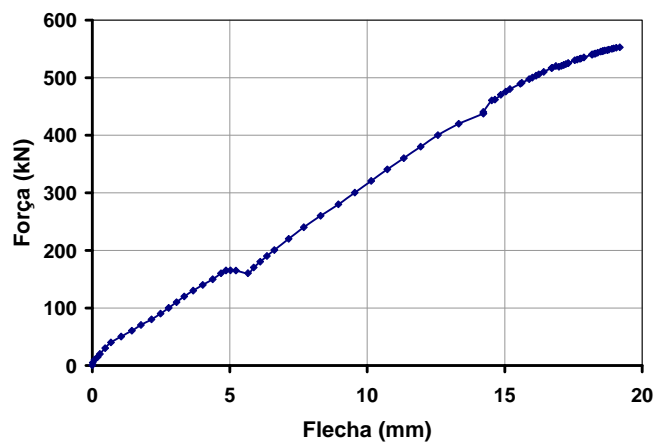


Figura E.13 – Diagrama força x flecha referente ao LVDT 2 da viga VI-1.

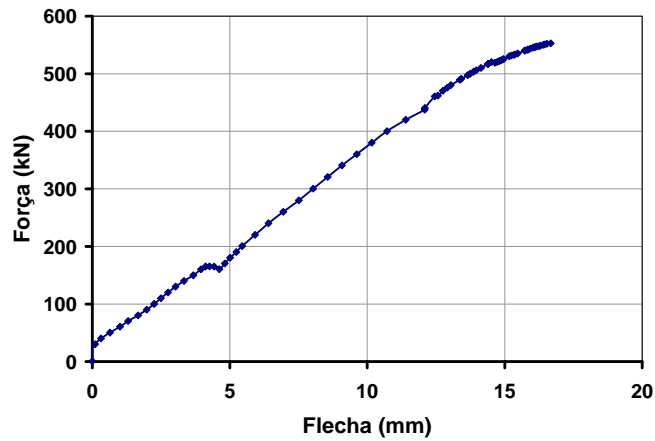


Figura E.14 – Diagrama força x flecha referente ao LVDT 3 da viga VI-1.

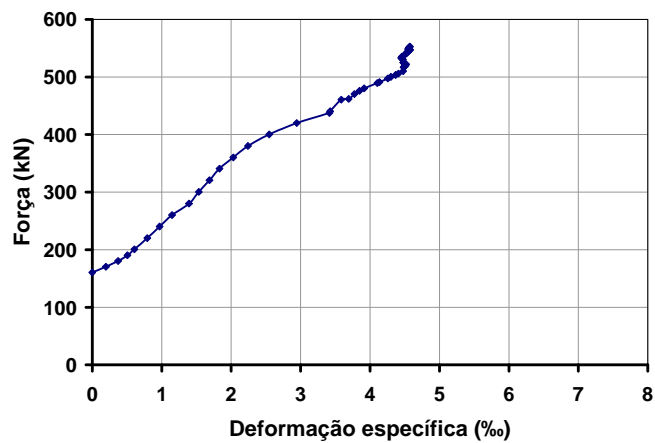


Figura E.15 – Diagrama força x deformação específica do CFC referente ao extensômetro SG12 colado numa tira de CFC da viga VI-1.

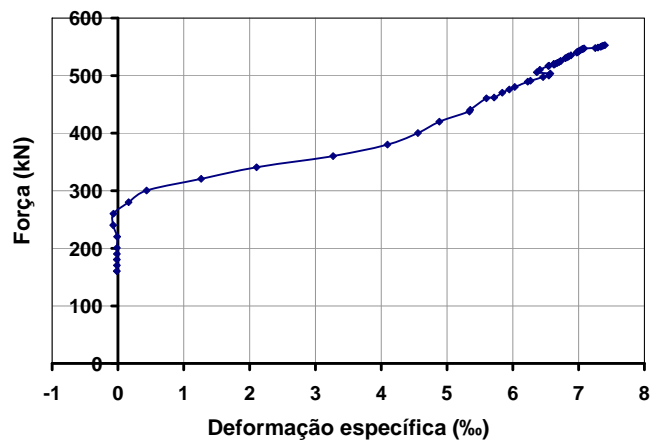


Figura E.16 – Diagrama força x deformação específica do CFC referente ao extensômetro SG13 colado numa tira de CFC da viga VI-1.

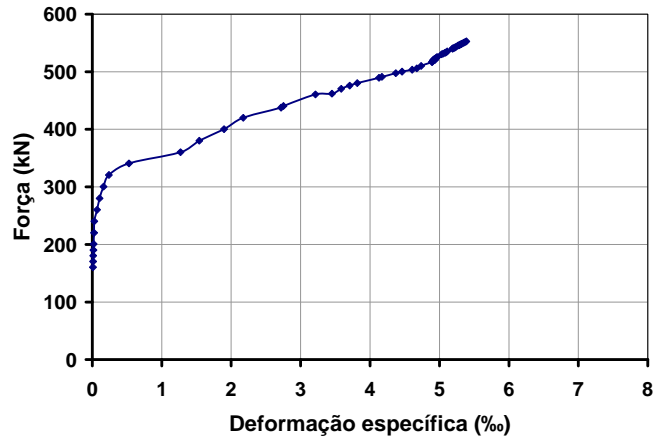


Figura E.17 – Diagrama força x deformação específica do CFC referente ao extensômetro SG14 colado numa tira de CFC da viga VI-1.

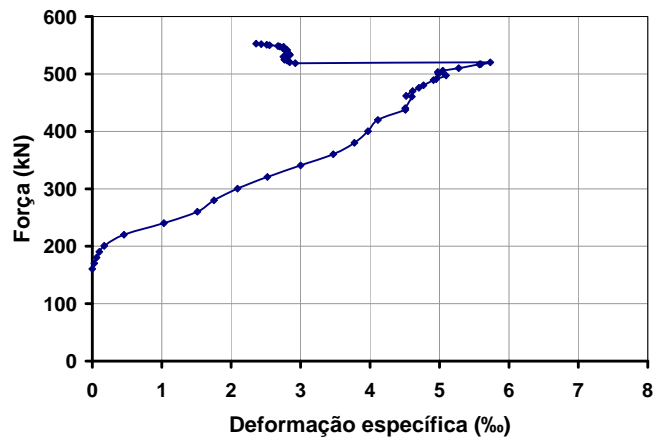


Figura E.18 – Diagrama força x deformação específica do CFC referente ao extensômetro SG15 colado numa tira de CFC da viga VI-1.

E.3.

Viga VI-2

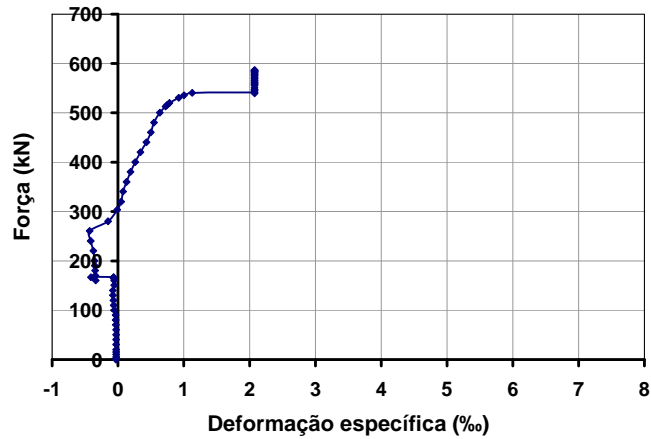


Figura E.19 – Diagrama força x deformação específica do aço referente ao extensômetro SG1 colado num estribo da viga VI-2.

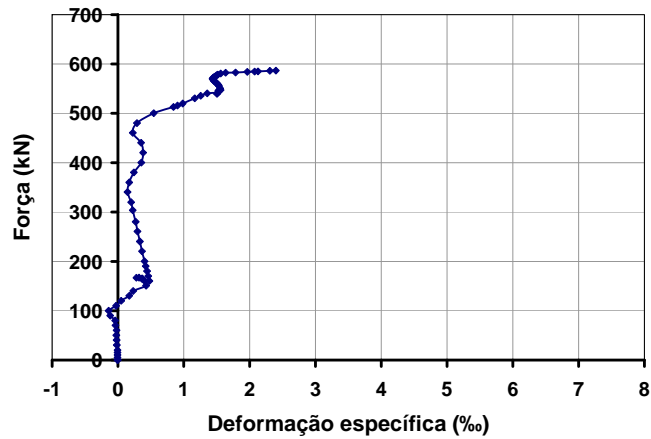


Figura E.20 – Diagrama força x deformação específica do aço referente ao extensômetro SG2 colado num estribo da viga VI-2.

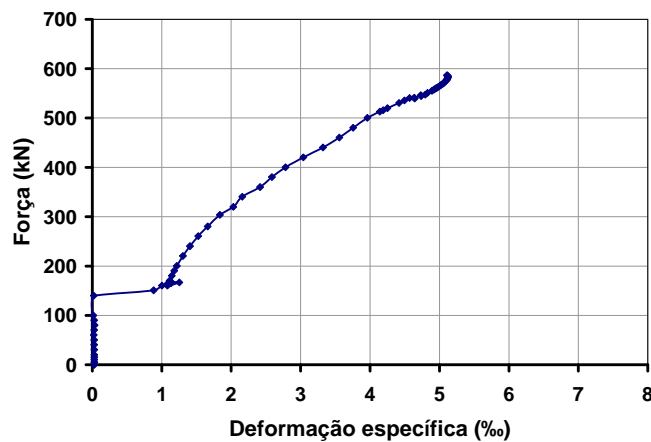


Figura E.21 – Diagrama força x deformação específica do aço referente ao extensômetro SG3 colado num estribo da viga VI-2.

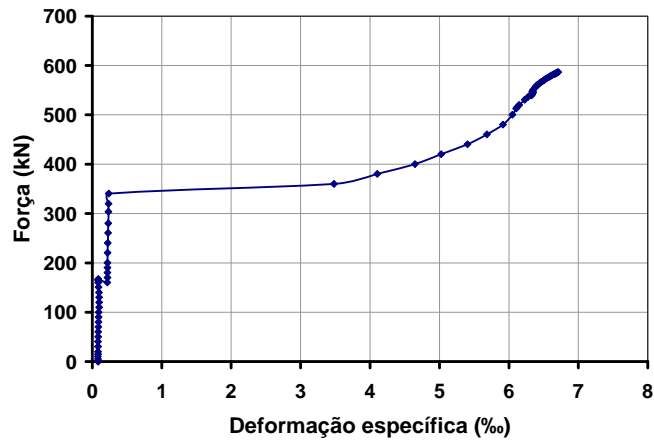


Figura E.22 – Diagrama força x deformação específica do aço referente ao extensômetro SG4 colado num estribo da viga VI-2.

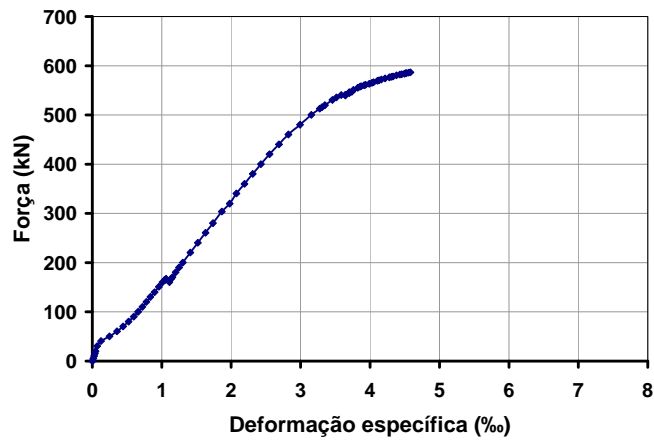


Figura E.23 – Diagrama força x deformação específica do aço referente ao extensômetro SG5 colado na armadura de flexão da viga VI-2.

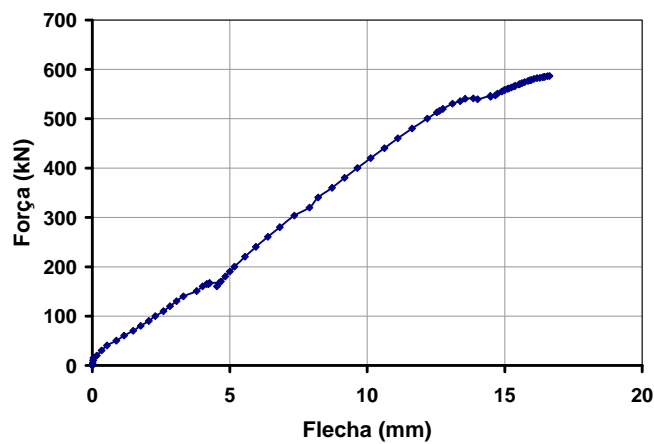


Figura E.24 – Diagrama força x flecha referente ao LVDT 1 da viga VI-2.

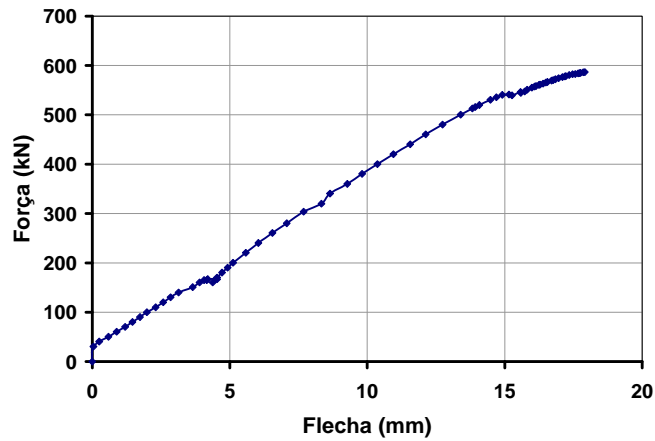


Figura E.25 – Diagrama força x flecha referente ao LVDT 2 da viga VI-2.

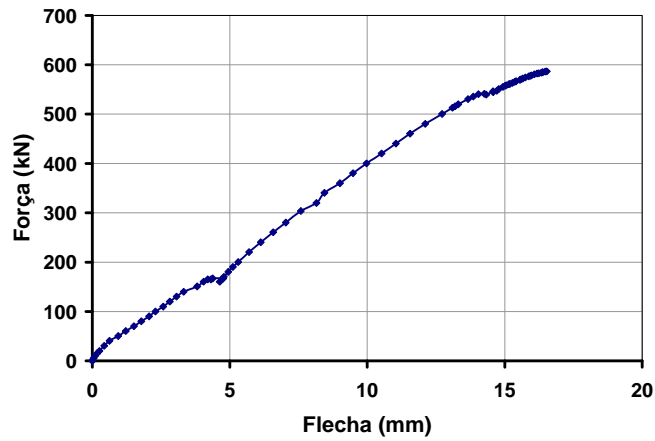


Figura E.26 – Diagrama força x flecha referente ao LVDT 3 da viga VI-2.

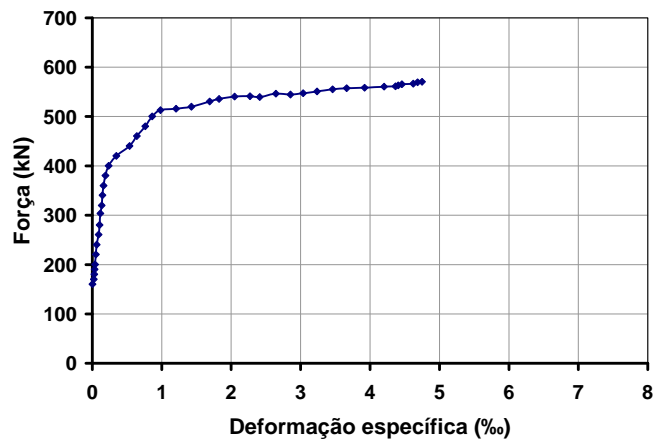


Figura E.27 – Diagrama força x deformação específica do CFC referente ao extensômetro SG12 colado numa tira de CFC da viga VI-2.

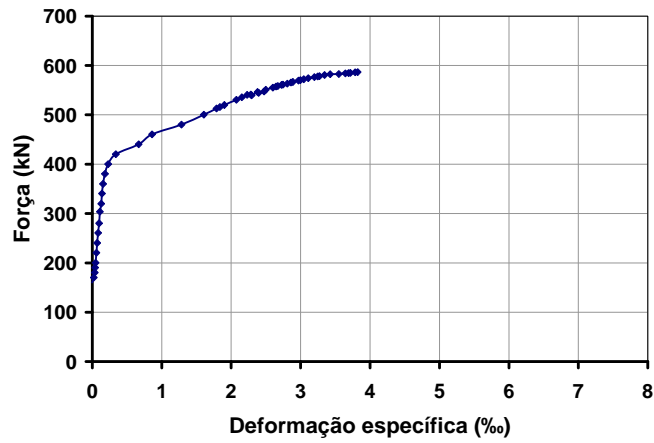


Figura E.28 – Diagrama força x deformação específica do CFC referente ao extensômetro SG13 colado numa tira de CFC da viga VI-2.

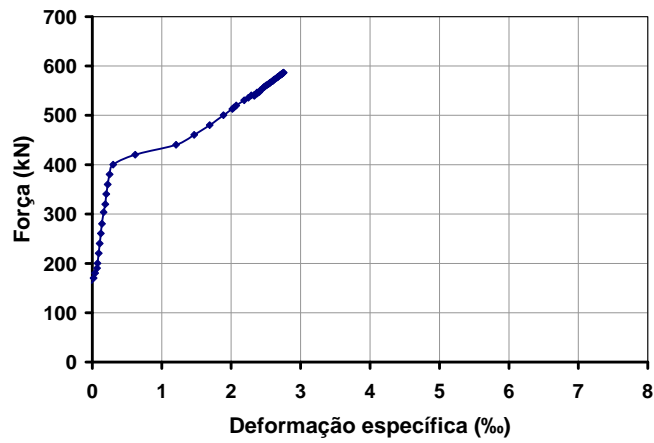


Figura E.29 – Diagrama força x deformação específica do CFC referente ao extensômetro SG14 colado numa tira de CFC da viga VI-2.

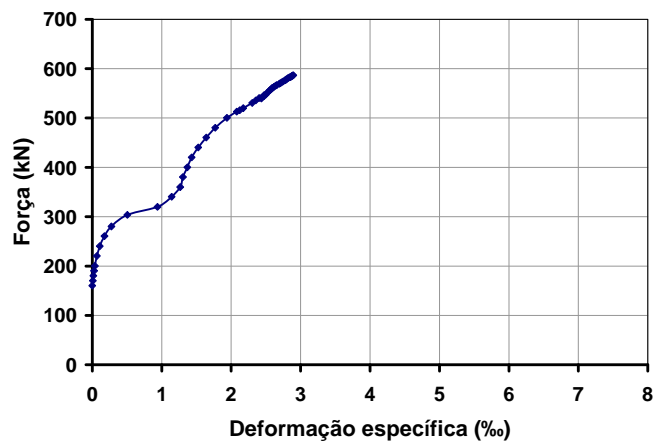


Figura E.30 – Diagrama força x deformação específica do CFC referente ao extensômetro SG15 colado numa tira de CFC da viga VI-2.

E.4.

Viga VI-3

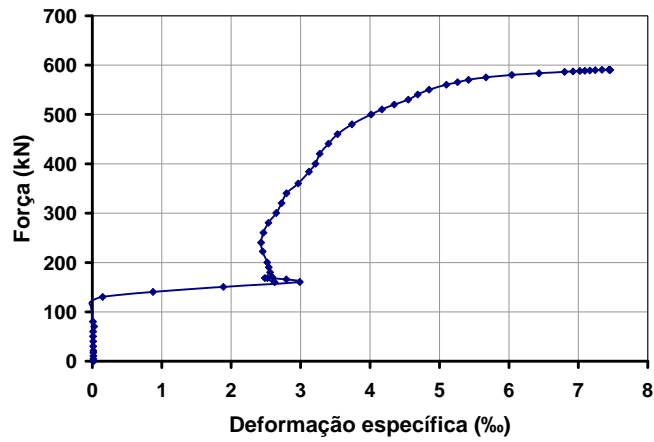


Figura E.31 – Diagrama força x deformação específica do aço referente ao extensômetro SG1 colado num estribo da viga VI-3.

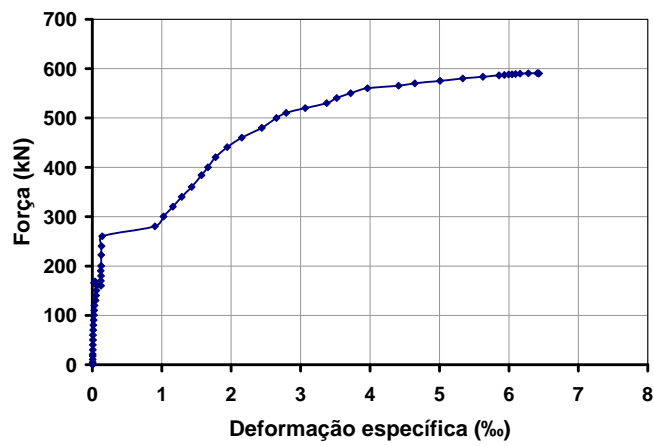


Figura E.32 – Diagrama força x deformação específica do aço referente ao extensômetro SG2 colado num estribo da viga VI-3.

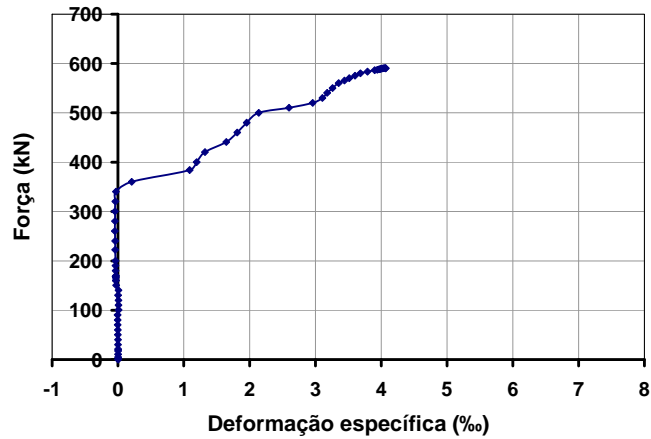


Figura E.33 – Diagrama força x deformação específica do aço referente ao extensômetro SG3 colado num estribo da viga VI-3.

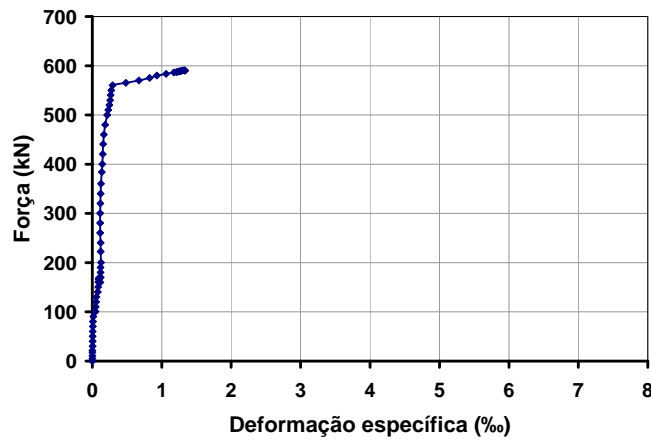


Figura E.34 – Diagrama força x deformação específica do aço referente ao extensômetro SG4 colado num estribo da viga VI-3.

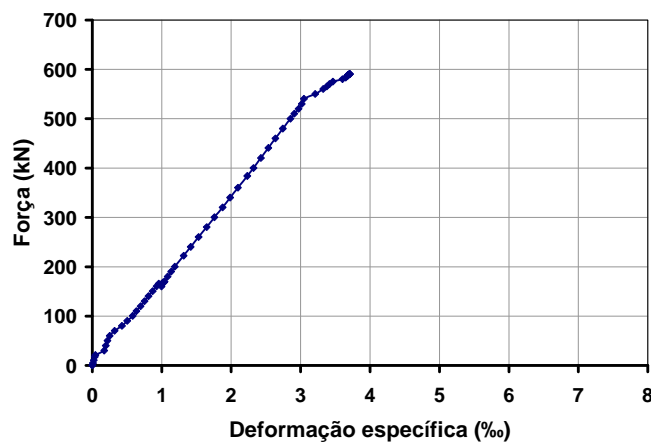


Figura E.35 – Diagrama força x deformação específica do aço referente ao extensômetro SG5 colado na armadura de flexão da viga VI-3.

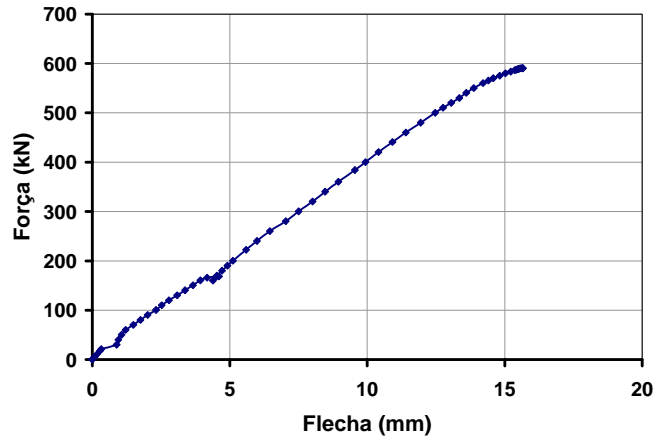


Figura E.36 – Diagrama força x flecha referente ao LVDT 1 da viga VI-3.

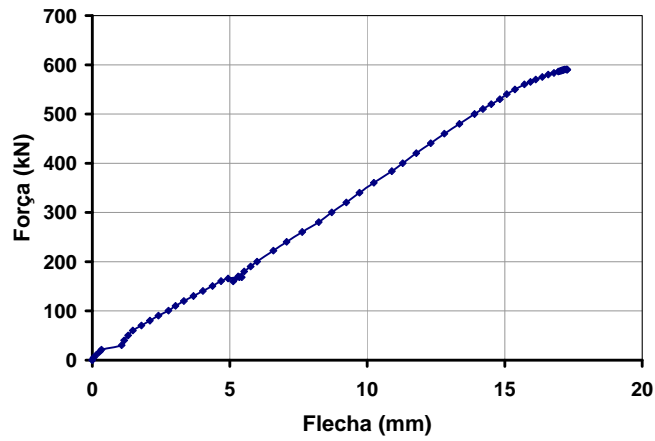


Figura E.37 – Diagrama força x flecha referente ao LVDT 2 da viga VI-3.

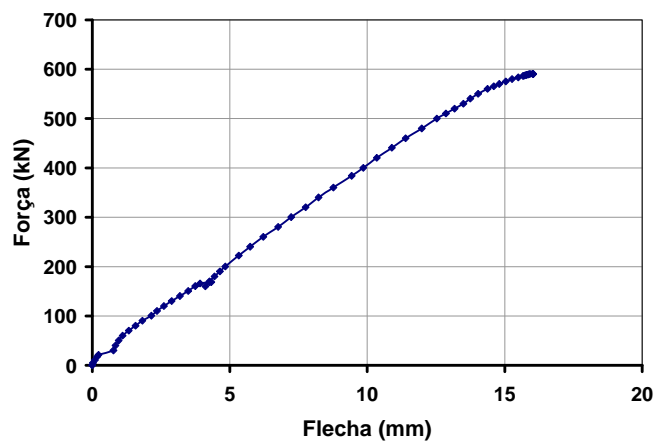


Figura E.38 – Diagrama força x flecha referente ao LVDT 3 da viga VI-3.

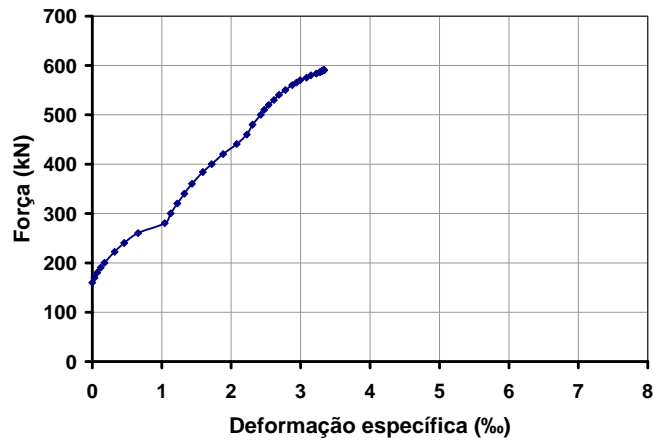


Figura E.39 – Diagrama força x deformação específica do CFC referente ao extensômetro SG12 colado numa tira de CFC da viga VI-3.

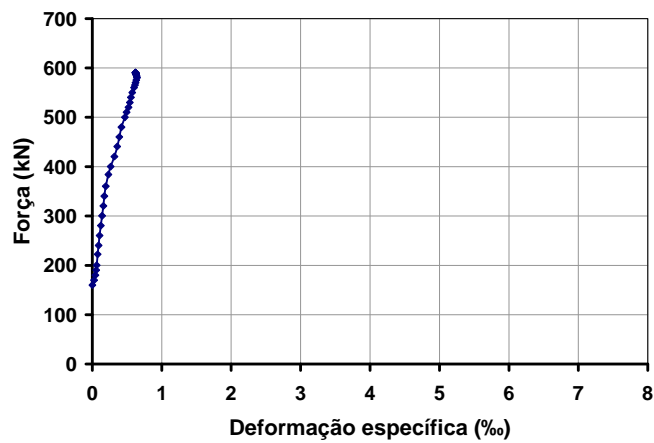


Figura E.40 – Diagrama força x deformação específica do CFC referente ao extensômetro SG13 colado numa tira de CFC da viga VI-3.

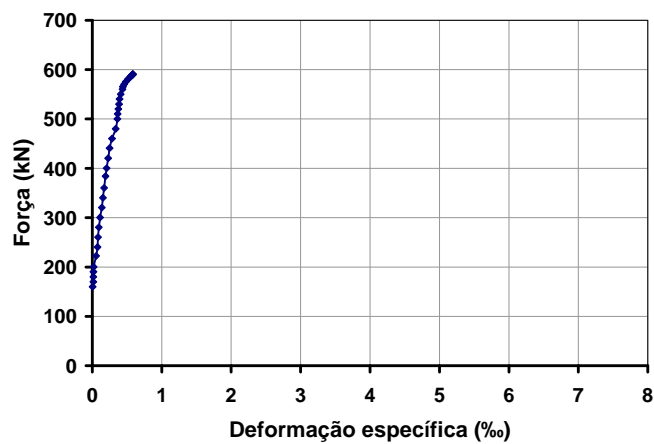


Figura E.41 – Diagrama força x deformação específica do CFC referente ao extensômetro SG14 colado numa tira de CFC da viga VI-3.

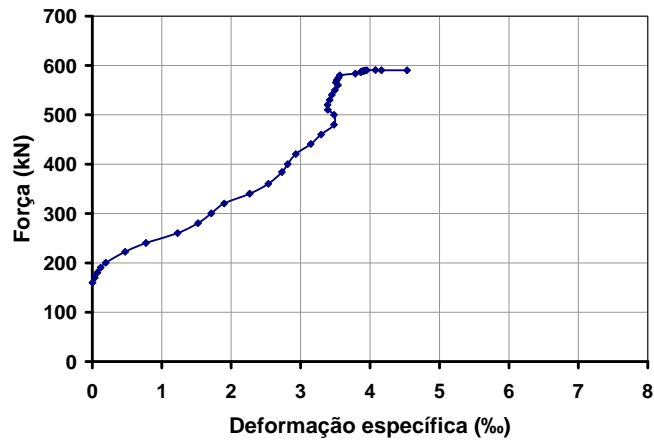


Figura E.42 – Diagrama força x deformação específica do CFC referente ao extensômetro SG15 colado numa tira de CFC da viga VI-3.

E.5.

Viga de Referência VR2

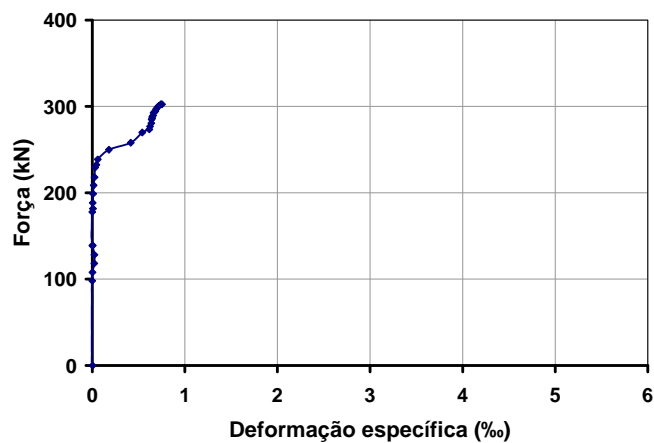


Figura E.43 – Diagrama força x deformação específica do aço referente ao extensômetro SG1 colado num estribo da viga VR2.



Figura E.44 – Diagrama força x deformação específica do aço referente ao extensômetro SG2 colado num estribo da viga VR2.

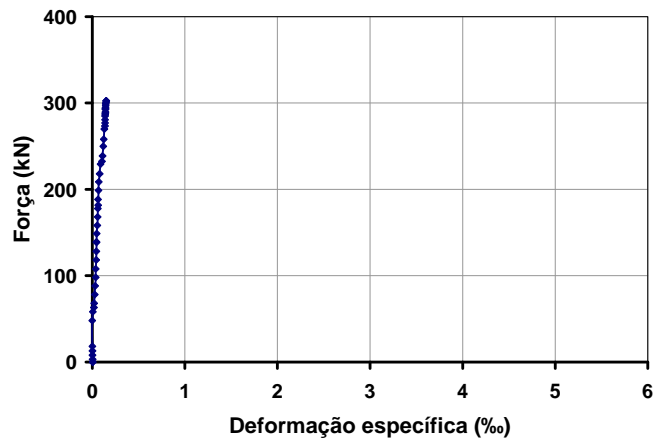


Figura E.45 – Diagrama força x deformação específica do aço referente ao extensômetro SG3 colado num estribo da viga VR2.

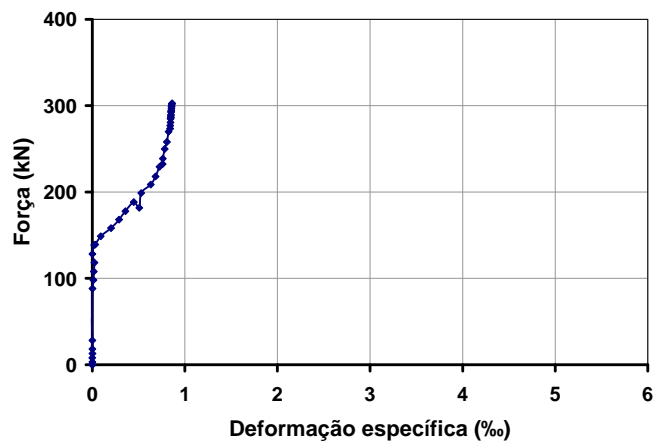


Figura E.46 – Diagrama força x deformação específica do aço referente ao extensômetro SG4 colado num estribo da viga VR2.

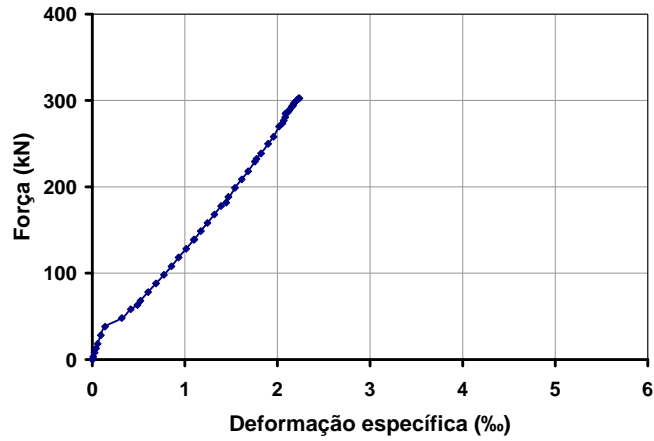


Figura E.47 – Diagrama força x deformação específica do aço referente ao extensômetro SG5 colado na armadura de flexão da viga VR2.

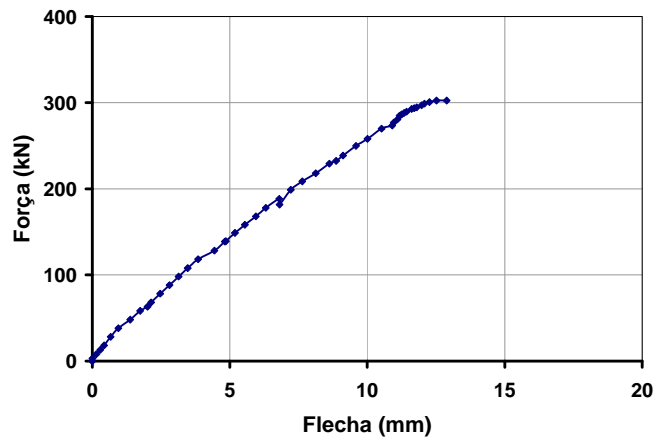


Figura E.48 – Diagrama força x flecha referente ao LVDT 1 da viga VR2.

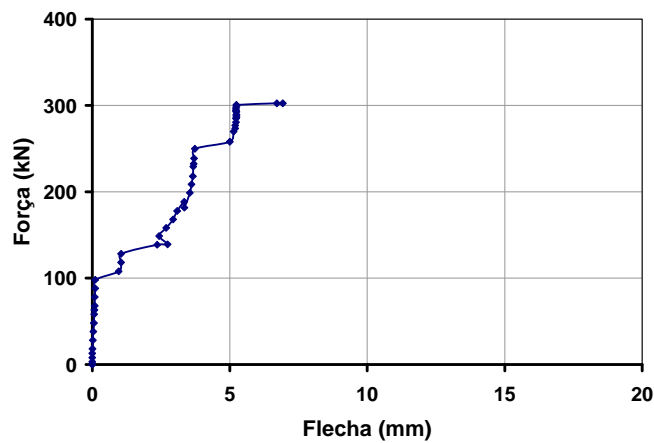


Figura E.49 – Diagrama força x flecha referente ao LVDT 2 da viga VR2.

E.6.

Viga VII-1

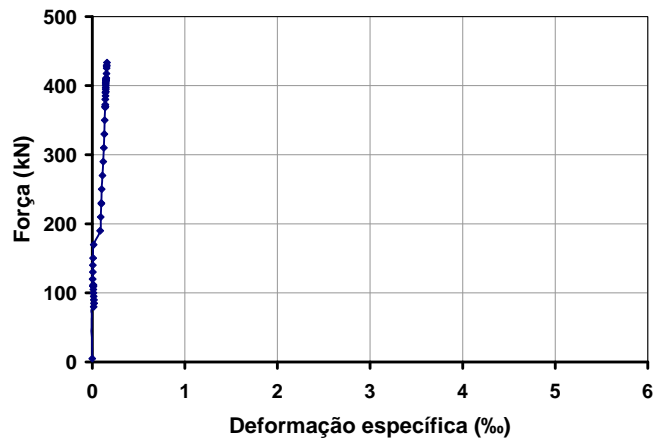


Figura E.50 – Diagrama força x deformação específica do aço referente ao extensômetro SG1 colado num estribo da viga VII-1.

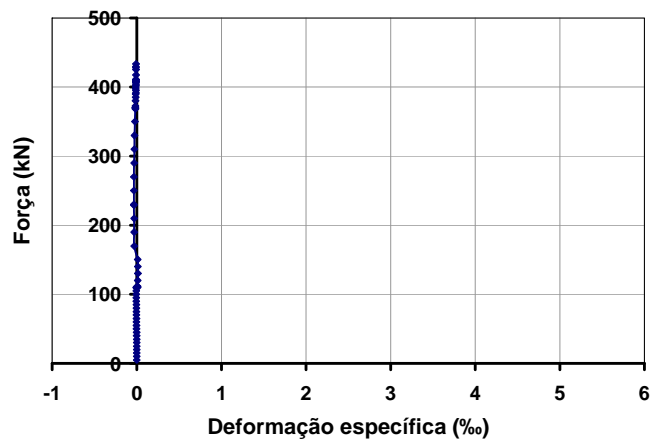


Figura E.51 – Diagrama força x deformação específica do aço referente ao extensômetro SG2 colado num estribo da viga VII-1.

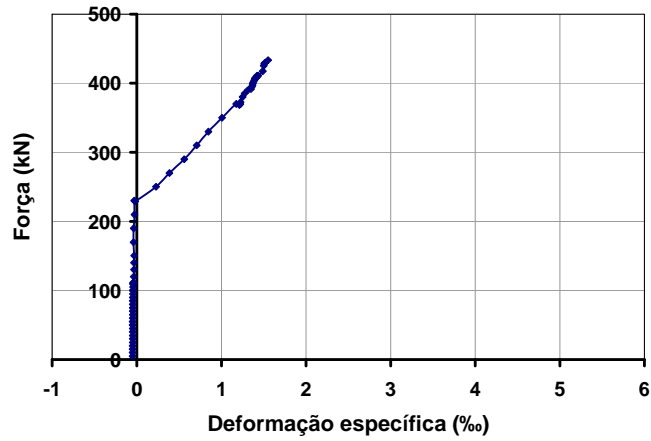


Figura E.52 – Diagrama força x deformação específica do aço referente ao extensômetro SG3 colado num estribo da viga VII-1.

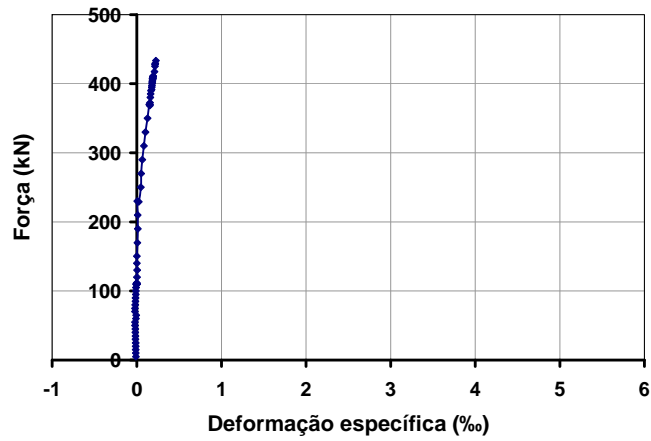


Figura E.53 – Diagrama força x deformação específica do aço referente ao extensômetro SG4 colado num estribo da viga VII-1.

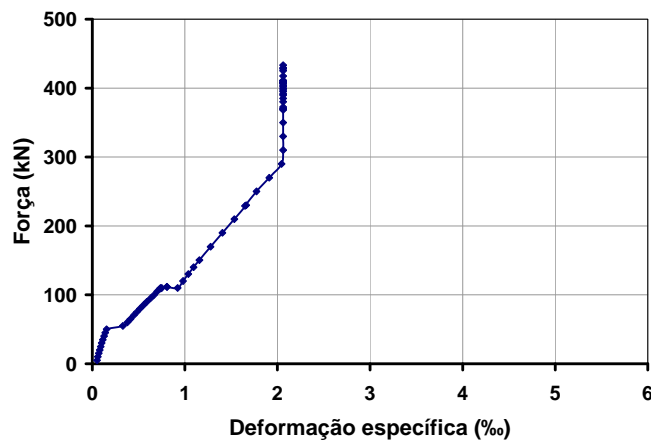


Figura E.54 – Diagrama força x deformação específica do aço referente ao extensômetro SG5 colado na armadura de flexão da viga VII-1.

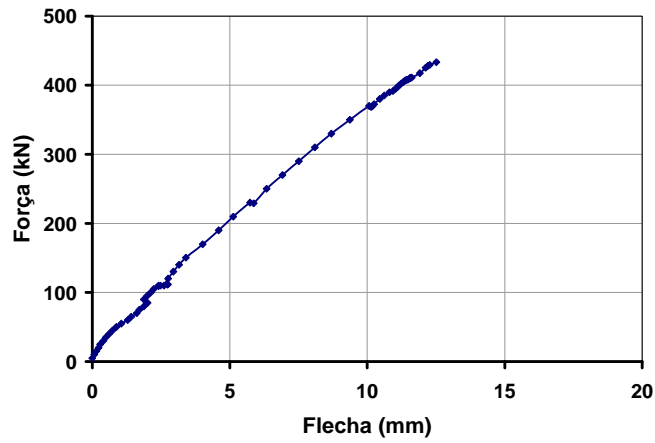


Figura E.55 – Diagrama força x flecha referente ao LVDT 2 da viga VII-1.

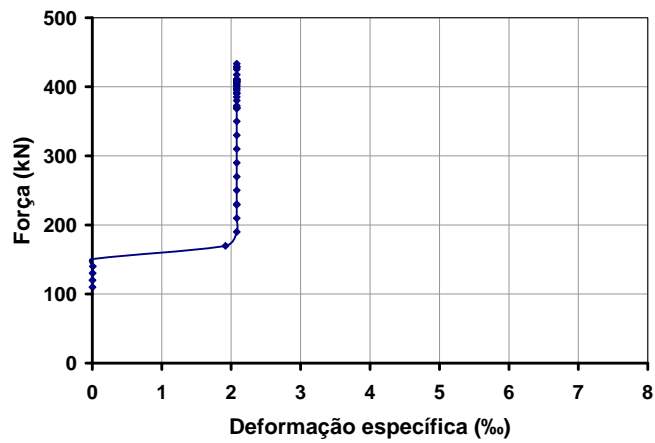


Figura E.56 – Diagrama força x deformação específica do CFC referente ao extensômetro SG12 colado numa tira de CFC da viga VII-1.

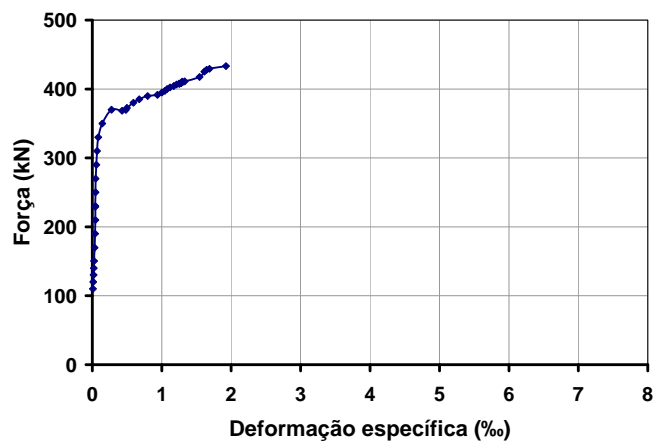


Figura E.57 – Diagrama força x deformação específica do CFC referente ao extensômetro SG13 colado numa tira de CFC da viga VII-1.



Figura E.58 – Diagrama força x deformação específica do CFC referente ao extensômetro SG14 colado numa tira de CFC da viga VII-1.

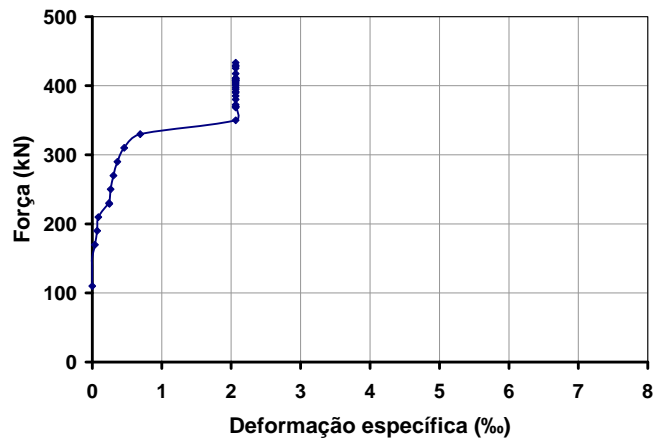


Figura E.59 – Diagrama força x deformação específica do CFC referente ao extensômetro SG15 colado numa tira de CFC da viga VII-1.

E.7.

Viga VII-2

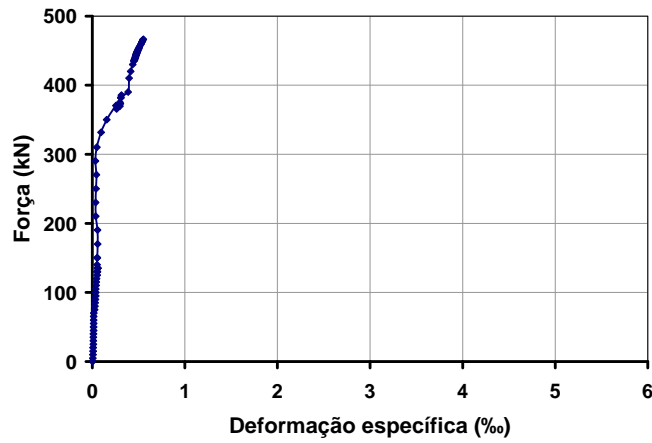


Figura E.60 – Diagrama força x deformação específica do aço referente ao extensômetro SG1 colado num estribo da viga VII-2.

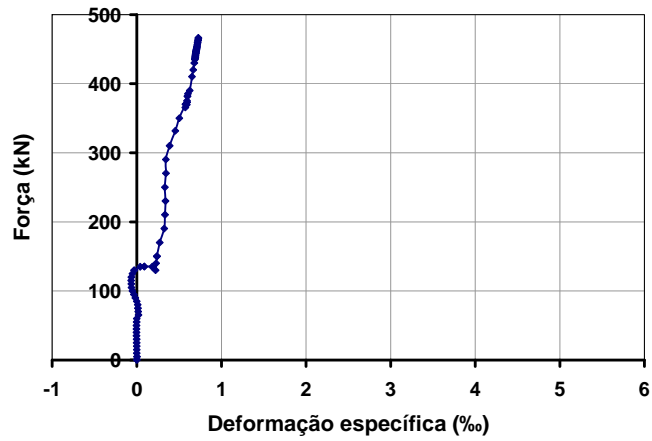


Figura E.61 – Diagrama força x deformação específica do aço referente ao extensômetro SG2 colado num estribo da viga VII-2.

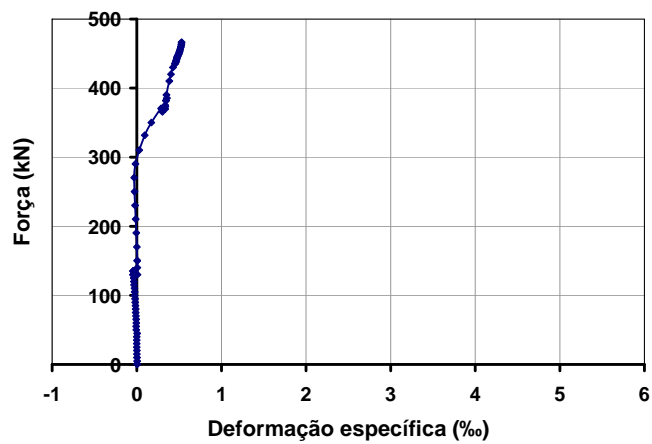


Figura E.62 – Diagrama força x deformação específica do aço referente ao extensômetro SG3 colado num estribo da viga VII-2.

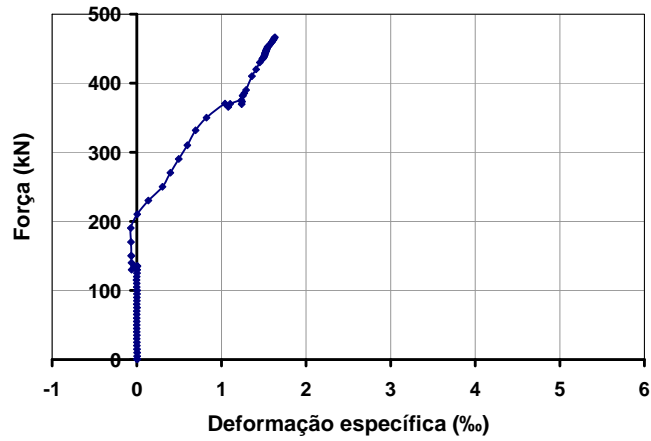


Figura E.63 – Diagrama força x deformação específica do aço referente ao extensômetro SG4 colado num estribo da viga VII-2.

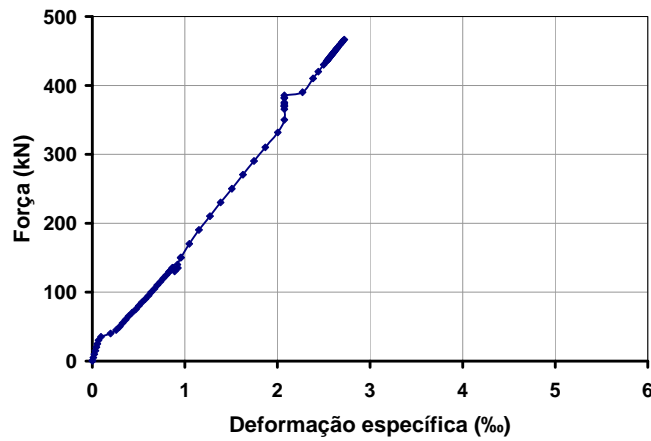


Figura E.64 – Diagrama força x deformação específica do aço referente ao extensômetro SG5 colado na armadura de flexão da viga VII-2.

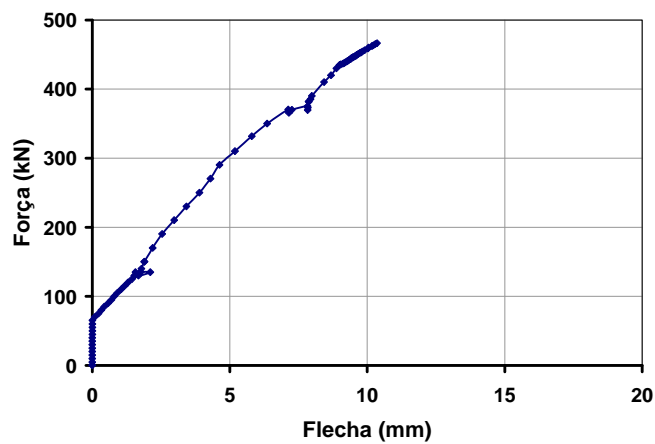


Figura E.65 – Diagrama força x flecha referente ao LVDT 1 da viga VII-2.

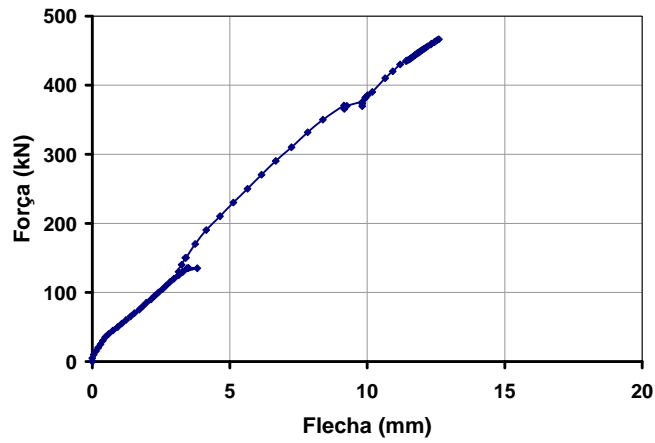


Figura E.66 – Diagrama força x flecha referente ao LVDT 2 da viga VII-2.

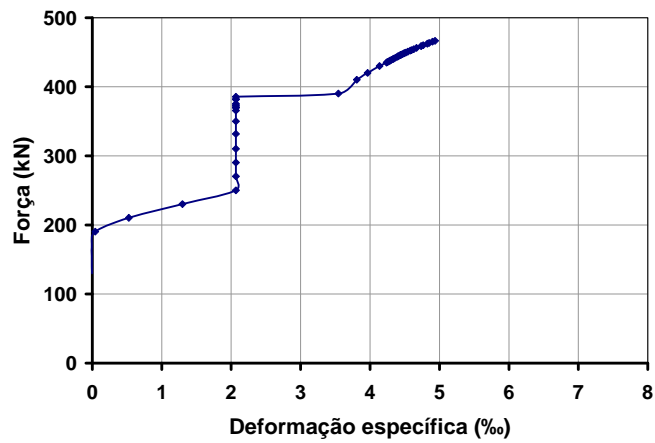


Figura E.67 – Diagrama força x deformação específica do CFC referente ao extensômetro SG12 colado numa tira de CFC da viga VII-2.

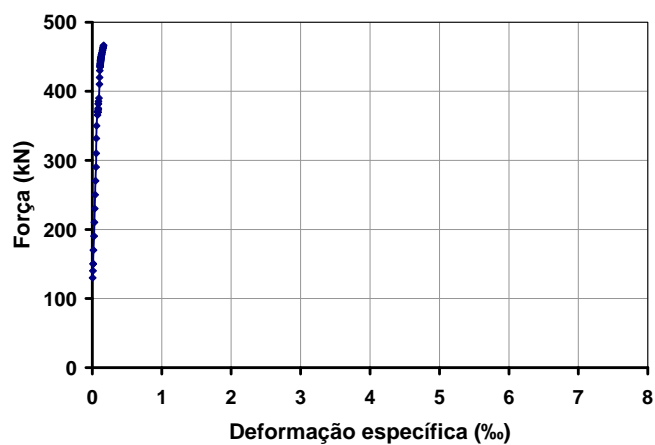


Figura E.68 – Diagrama força x deformação específica do CFC referente ao extensômetro SG13 colado numa tira de CFC da viga VII-2.

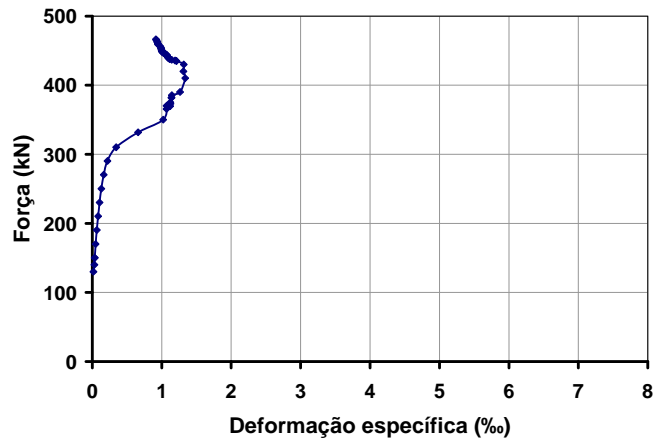


Figura E.69 – Diagrama força x deformação específica do CFC referente ao extensômetro SG14 colado numa tira de CFC da viga VII-2.

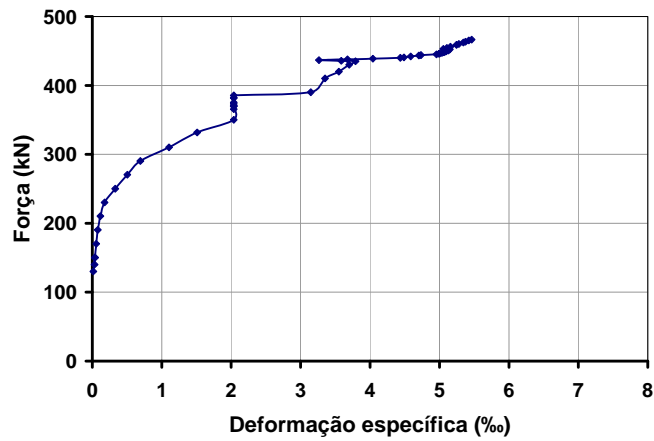


Figura E.70 – Diagrama força x deformação específica do CFC referente ao extensômetro SG15 colado numa tira de CFC da viga VII-2.

E.8.

Viga VII-3

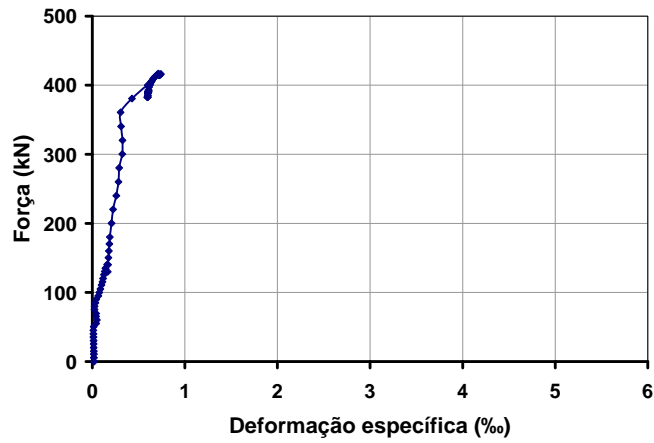


Figura E.71 – Diagrama força x deformação específica do aço referente ao extensômetro SG1 colado num estribo da viga VII-3.

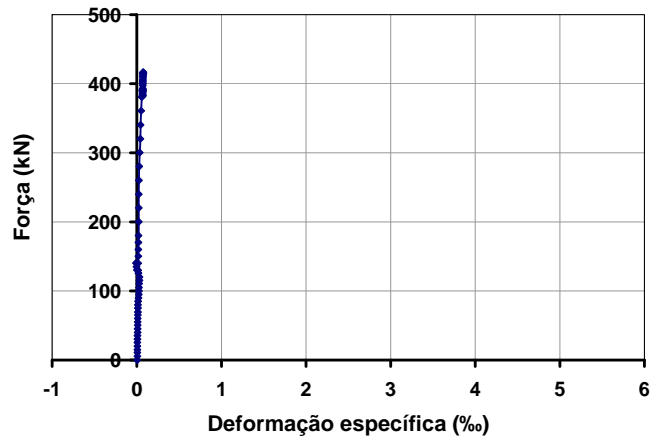


Figura E.72 – Diagrama força x deformação específica do aço referente ao extensômetro SG2 colado num estribo da viga VII-3.



Figura E.73 – Diagrama força x deformação específica do aço referente ao extensômetro SG3 colado num estribo da viga VII-3.

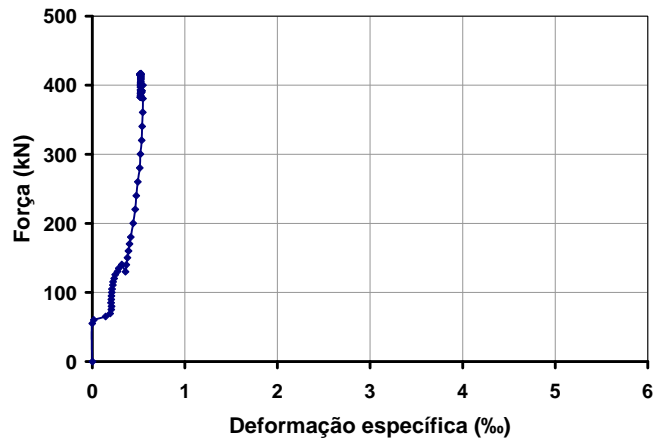


Figura E.74 – Diagrama força x deformação específica do aço referente ao extensômetro SG4 colado num estribo da viga VII-3.

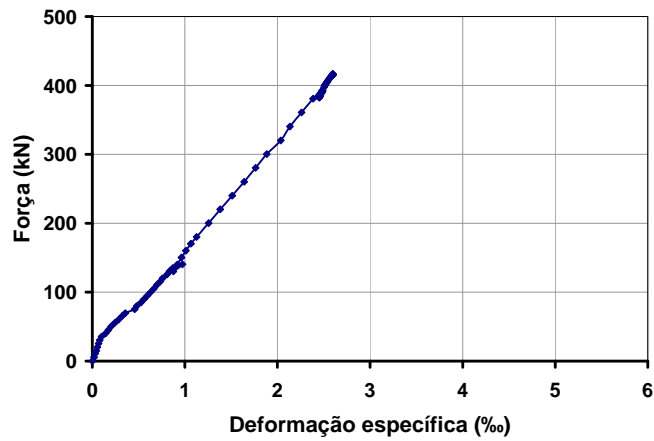


Figura E.75 – Diagrama força x deformação específica do aço referente ao extensômetro SG5 colado na armadura de flexão da viga VII-3.

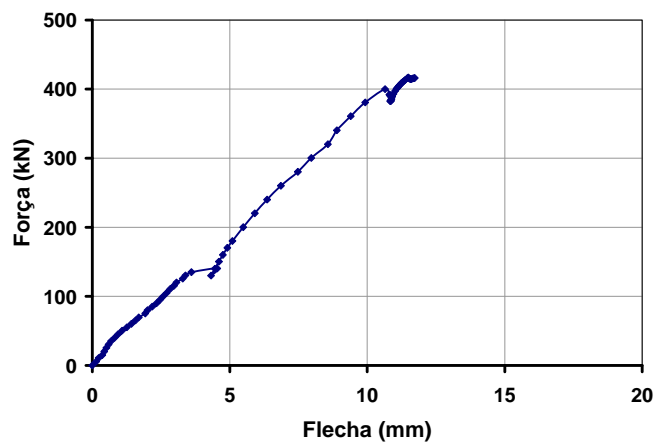


Figura E.76 – Diagrama força x flecha referente ao LVDT 1 da viga VII-3.

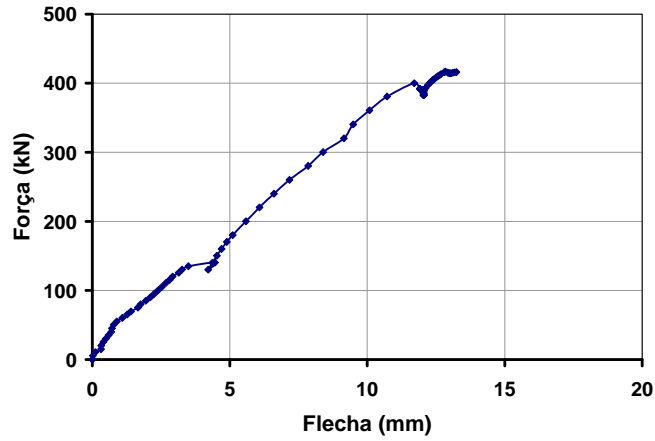


Figura E.77 – Diagrama força x flecha referente ao LVDT 2 da viga VII-3.

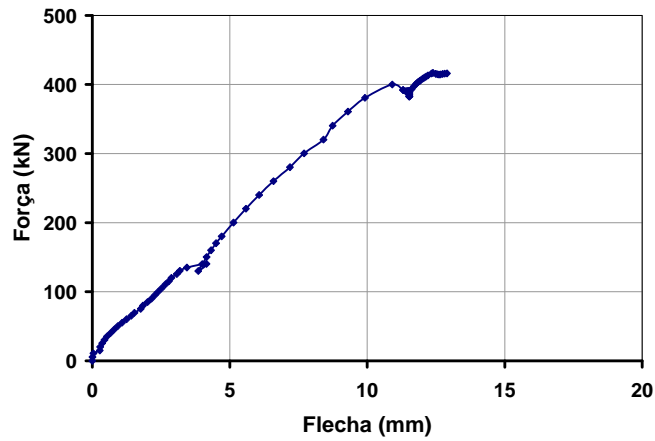


Figura E.78 – Diagrama força x flecha referente ao LVDT 3 da viga VII-3.

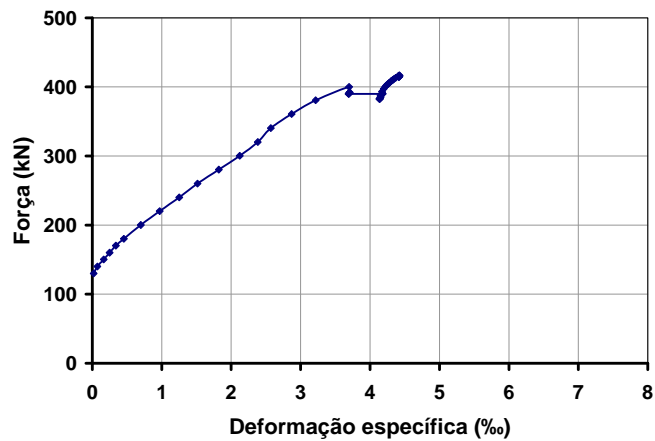


Figura E.79 – Diagrama força x deformação específica do CFC referente ao extensômetro SG12 colado numa tira de CFC da viga VII-3.

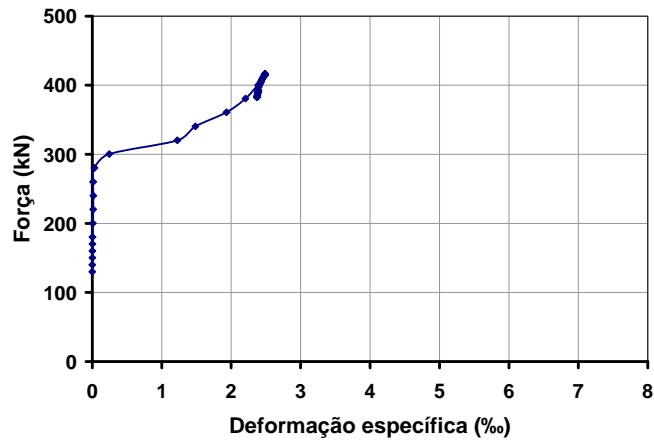


Figura E.80 – Diagrama força x deformação específica do CFC referente ao extensômetro SG13 colado numa tira de CFC da viga VII-3.

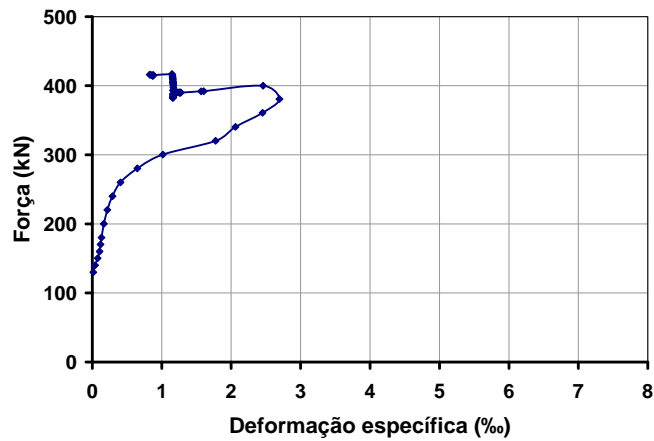


Figura E.81 – Diagrama força x deformação específica do CFC referente ao extensômetro SG14 colado numa tira de CFC da viga VII-3.

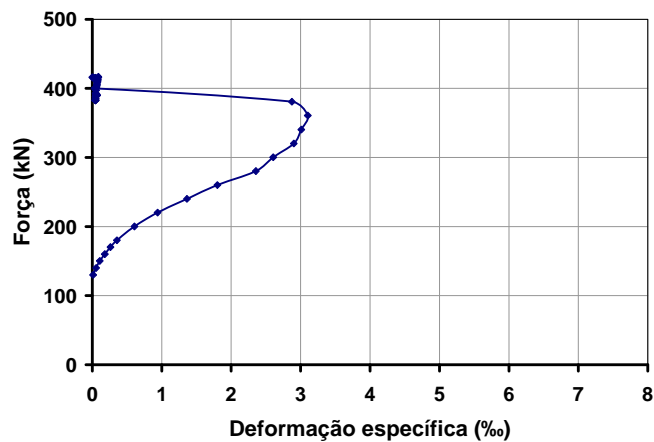


Figura E.82 – Diagrama força x deformação específica do CFC referente ao extensômetro SG15 colado numa tira de CFC da viga VII-3.

Anexo F

Rotinas de Cálculo das Forças Teóricas

F.1.

Viga VR1

Dados de Entrada:

$$b_w = 15 \text{ cm}$$

$$h = 40 \text{ cm}$$

$$d = 40 - 1,5 - 0,5 - 1,0 = 35,4 \text{ cm}$$

$$a = 87,5 \text{ cm}$$

$$A_{sl} = 12,06 \text{ cm}^2 \rightarrow 6 \phi 16,0 \text{ mm}$$

$$\rho_{sl} = \frac{A_{sl}}{b_w d} = 0,02272$$

$$A_{sw} = 0,3927 \text{ cm}^2 \rightarrow \text{estribo de } \phi 5,0 \text{ mm}$$

$$s = 10,0 \text{ cm}$$

$$f_c = 48,44 \text{ MPa}$$

$$f_y = 595,5 \text{ MPa}$$

Força cortante última teórica segundo a norma ACI-318 (1999):

a) Parcela referente ao concreto V_c :

$$\frac{V_c}{b_w d} = \left(0,16\sqrt{f_c} + 17\rho_{sl} \frac{a}{d} \right) \leq 0,29\sqrt{f_c}$$

$$\frac{V_c}{b_w d}(1) = 0,16\sqrt{f_c} + 17\rho_{sl} \frac{a}{d} = 2,068 \text{ MPa}$$

$$\frac{V_c}{b_w d}(1) = 0,2068 \text{ kN/cm}^2 \rightarrow V_c(1) = 109,81 \text{ kN}$$

$$\frac{V_c}{b_w d}(2) = 0,29\sqrt{f_c} = 2,018 \text{ MPa} = 0,2018 \text{ kN/cm}^2$$

$$V_c(2) = 107,18 \text{ kN}$$

$$\text{Adotar } V_c = 107,18 \text{ kN}$$

b) Parcela referente ao aço V_{sw} :

$$V_{sw} = \frac{A_{sw} f_y d}{s} \leq 0,68 \sqrt{f_c} b_w d$$

$$V_{sw} = 82,78 \text{ kN} \leq 251,31 \text{ kN} \rightarrow \text{OK!}$$

$$V_{u,teor} = V_{c,teor} + V_{sw,teor} = 107,18 + 82,78 = 189,96 \text{ kN}$$

Força cortante última teórica segundo o modelo cinemático:

$$v_0 = \frac{0,88}{\sqrt{f_c}} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{h}} \right) (1 + 26 \rho_{sl}) = 0,519$$

$$\omega_{sw} = \frac{A_{sw} f_y}{b_w s f_c} = 0,032$$

$$\tau_c = 0,059 v_0 f_c = 1,48 \text{ MPa}$$

$$\frac{\omega_{sw}}{v_0} = 0,062 \leq 0,21$$

$$\tau_u = \tau_c \left(11,64 \sqrt{\frac{\omega_{sw}}{v_0}} - \frac{16,95}{v_0 h} \omega_{sw} s \right) = 3,91 \text{ MPa}$$

$$V_u = \tau_u b_w d = 207,64 \text{ kN}$$

Ângulo teórico θ_{CIN} :

$$x = h \sqrt{\frac{2\tau_c}{\omega_{sw} f_c}} = 55,18 \text{ cm}$$

$$\text{tg } \theta_{CIN} = \frac{h}{x} = 0,725$$

$$\theta_{CIN} = 35,94^\circ$$

F.2.

Viga VI-1

Dados de Entrada:

$$b_w = 15 \text{ cm}$$

$$h = 40 \text{ cm}$$

$$d = 40 - 1,5 - 0,5 - 1,0 = 35,4 \text{ cm}$$

$$a = 87,5 \text{ cm}$$

$$A_{sl} = 12,06 \text{ cm}^2 \rightarrow 6 \phi 16,0 \text{ mm}$$

$$\rho_{sl} = \frac{A_{sl}}{b_w d} = 0,02272$$

$$A_{sw} = 0,3927 \text{ cm}^2 \rightarrow \text{estribo de } \phi 5,0 \text{ mm}$$

$$s = 10,0 \text{ cm}$$

$$t_f = 0,0122 \text{ cm}$$

$$w_f = 10,0 \text{ cm}$$

$$A_f = 2t_f w_f = 0,244 \text{ cm}^2$$

$$s_f = 22,5 \text{ cm}$$

$$d_f = d - 8 \text{ cm} = 27,4 \text{ cm}$$

$$\rho_f = \frac{2t_f w_f}{b_w s_f} = 0,00072$$

$$E_f = 255180 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{f,u} = 0,011636 = 11,636 \text{ ‰}$$

$$f_{f,u} = 2969,16 \text{ MPa}$$

$$f_c = 51,73 \text{ MPa}$$

$$f_y = 595,5 \text{ MPa}$$

$$\alpha = \beta = 90^\circ$$

Força cortante última teórica segundo o modelo do ACI-318 (1999) e o ACI-440 (2001):

a) Parcela referente ao concreto V_c :

$$\frac{V_c}{b_w d} = \left(0,16\sqrt{f_c} + 17\rho_{sl} \frac{a}{d} \right) \leq 0,29\sqrt{f_c}$$

$$\frac{V_c}{b_w d}(1) = 0,16\sqrt{f_c} + 17\rho_{st} \frac{a}{d} = 2,105 \text{ MPa}$$

$$\frac{V_c}{b_w d}(1) = 0,2105 \text{ kN/cm}^2 \rightarrow V_c(1) = 111,77 \text{ kN}$$

$$\frac{V_c}{b_w d}(2) = 0,29\sqrt{f_c} = 2,086 \text{ MPa} = 0,2086 \text{ kN/cm}^2$$

$$V_c(2) = 110,76 \text{ kN}$$

$$\text{Adotar } V_c = 110,76 \text{ kN}$$

b) Parcela referente ao aço V_{sw} :

$$V_{sw} = \frac{A_{sw} f_y d}{s} \leq 0,68\sqrt{f_c} b_w d$$

$$V_{sw} = 82,78 \text{ kN} \leq 259,70 \text{ kN} \rightarrow \text{OK!}$$

c) Parcela referente ao CFC V_f :

$$L_e = \frac{23300}{(t_f E_f)^{0,58}} = \frac{23300}{(0,122\text{mm} \times 255180\text{MPa})^{0,58}} = 57,72 \text{ mm}$$

$$k_1 = \sqrt[3]{\left(\frac{f_c}{27}\right)^2} = 1,543$$

$$k_2 = \frac{d_f - L_e}{d_f} = 0,789 \rightarrow \text{envolvimento em U}$$

$$k_v = \frac{k_1 k_2 L_e}{11900 \varepsilon_{f,u}} = 0,508 \leq 0,75$$

$$\varepsilon_{f,e}(1) = 0,004 \leq 0,75 \varepsilon_{f,u} \rightarrow \text{envolvimento completo}$$

$$0,75 \varepsilon_{f,u} = 0,008727$$

$$\text{Adotar } \varepsilon_{f,e}(1) = 0,004$$

$$\varepsilon_{f,e}(2) = k_v \varepsilon_{f,u} \leq 0,004 \rightarrow \text{envolvimento em U}$$

$$k_v \varepsilon_{f,u} = 0,005911$$

$$\text{Adotar } \varepsilon_{f,e}(2) = 0,004$$

$$\text{Logo: } \varepsilon_{f,e} = 0,004$$

$$V_f = \frac{A_f f_{f,e} (\text{sen } \alpha + \text{cos } \alpha) d_f}{s_f} = \frac{A_f E_f \varepsilon_{f,e} (\text{sen } \alpha + \text{cos } \alpha) d_f}{s_f} = 30,33 \text{ kN}$$

$$V_{u,teor} = V_{c,teor} + V_{sw,teor} + V_{f,teor} = 110,76 + 82,78 + 30,33 = 223,87 \text{ kN}$$

Força cortante última teórica segundo o modelo cinemático:

$$v_0 = \frac{0,88}{\sqrt{f_c}} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{h}} \right) (1 + 26\rho_{sl}) = 0,502$$

$$\omega_{sw} = \frac{A_{sw}}{b_w s} \frac{f_y}{f_c} = 0,030$$

$$Adota - se f_{f,e} = 1546,49 \text{ MPa} \rightarrow \text{Chen e Teng (2002)}$$

$$\omega_{fw} = \frac{2t_f w_f \text{ sen } \beta}{b_w s_f} \frac{f_{f,e}}{f_c} = 0,022$$

$$\tau_c = 0,059 v_0 f_c = 1,53 \text{ MPa}$$

$$\frac{(\omega_{sw} + \omega_{fw})}{v_0} = 0,103 \leq 0,21$$

$$\tau_u = \tau_c \left[11,64 \sqrt{\frac{(\omega_{sw} + \omega_{fw})}{v_0}} - \frac{16,95}{v_0 h} (\omega_{sw} s + \omega_{fw} s_f) \right] = 4,71 \text{ MPa}$$

$$V_u(1) = V_{c,teor} + V_{sw,teor} + V_{f,teor} = \tau_u b_w d = 250,07 \text{ kN}$$

Ângulo teórico θ_{CIN} :

$$x = h \sqrt{\frac{2\tau_c}{(\omega_{sw} + \omega_{fw}) f_c}} = 42,81 \text{ cm}$$

$$tg \theta_{CIN} = \frac{h}{x} = 0,934$$

$$\theta_{CIN} = 43,06^\circ$$

Parcela da força cortante referente ao CFC segundo o modelo da FIB-Bulletin 14 (2001):

$$\varepsilon_{f,e}(1) = 0,17 \left(\frac{f_c^{2/3}}{E_f \rho_f} \right)^{0,3} \varepsilon_{f,u} \rightarrow \text{envolvimento completo}$$

$$\varepsilon_{f,e}(1) = 0,00723$$

$$\varepsilon_{f,e}(2) = 0,65 \left(\frac{f_c^{2/3}}{E_f \rho_f} \right)^{0,56} 10^{-3} \rightarrow \text{envolvimento em U}$$

$$\varepsilon_{f,e}(2) = 0,00731$$

Logo:

$$\varepsilon_{f,e} = k \times 0,00723 = 0,8 \times 0,00723 = 0,00578$$

Para $\theta_{CR} = 39^\circ$:

$$V_f = 0,9 \varepsilon_{f,e} E_f \rho_f b_w d (\cot g \theta_{CR} + \cot g \alpha) \text{sen} \alpha = 62,98 \text{ kN}$$

Para $\theta_\varepsilon = 33,63^\circ$:

$$V_f = 0,9 \varepsilon_{f,e} E_f \rho_f b_w d (\cot g \theta_\varepsilon + \cot g \alpha) \text{sen} \alpha = 76,68 \text{ kN}$$

Parcela da força cortante referente ao CFC segundo o modelo de Chen e Teng (2002):

$$z_t = d_{ft} = 8 \text{ cm}$$

$$z_b = 0,9d - h + d_{fb} = 0,9 \times 35,4 - 40 + 40 = 31,86 \text{ cm}$$

$$h_{fe} = z_b - z_t = 23,86 \text{ cm}$$

$$s_{fe} = s_f = 22,5 \text{ cm}$$

Ruptura por aderência:

$$L_e = \sqrt{\frac{E_f t_f}{\sqrt{f_c}}} = \sqrt{\frac{255180 \text{ MPa} \times 0,122 \text{ mm}}{\sqrt{51,73 \text{ MPa}}}} = 65,80 \text{ mm} = 6,58 \text{ cm}$$

$$L_{m\acute{a}x} = h_{f,e} = 23,86 \text{ cm}$$

$$\lambda = \frac{L_{m\acute{a}x}}{L_e} = 3,627 \geq 1,0$$

Então $\beta_L = 1,0$

$$\beta_w = \sqrt{\frac{2 - \frac{w_f}{s_{fe}}}{1 + \frac{w_f}{s_{fe}}}} = 1,038$$

$$D_f = 1 - \frac{\pi - 2}{\pi \lambda} = 0,900 \quad \rightarrow \quad \lambda > 1,0$$

$$\sigma_{f,máx}(1) = 0,427 \beta_w \beta_L \sqrt{\frac{E_f \sqrt{f_c}}{t_f}}$$

$$\sigma_{f,máx}(1) = 0,427 \times 1,038 \times 1,0 \times \sqrt{\frac{255180 MPa \times \sqrt{51,73 MPa}}{0,122 mm}} = 1718,70 MPa$$

$$\sigma_{f,máx}(2) = f_{f,u} = 2969,16 MPa$$

Adota – se $\sigma_{f,máx} = 1718,70 MPa$

$$f_{f,e}(1) = D_f \sigma_{f,máx} = 1546,49 MPa$$

Ruptura do CFC:

$$\zeta = \frac{z_t}{z_b} = 0,251$$

$$D_f = \frac{1 + \zeta}{2} = 0,626$$

Sendo $\frac{f_{f,u}}{E_f} = \varepsilon_{f,u}$

$$\sigma_{f,máx} = f_{f,u} = 2969,16 MPa$$

$$f_{f,e}(2) = D_f \sigma_{f,máx} = 1857,36 MPa$$

Adota – se $f_{f,e} = 1546,49 MPa$

Para $\theta_{CR} = 39^\circ$:

$$V_f = 2 f_{f,e} t_f w_f \frac{h_{fe} (\cot g \theta_{CR} + \cot g \beta) \text{sen} \beta}{s_f} = 49,41 kN$$

Para $\theta_\varepsilon = 33,63^\circ$:

$$V_f = 2 f_{f,e} t_f w_f \frac{h_{fe} (\cot g \theta_\varepsilon + \cot g \beta) \text{sen} \beta}{s_f} = 60,16 kN$$

Parcela da força cortante referente ao CFC segundo o modelo de Khalifa e Nanni (2002):

Ruptura por aderência:

$$L_e = 75 \text{ mm}$$

$$w_{f,e} = d_f - L_e = 19,90 \text{ cm} \rightarrow \text{envolvimento em U}$$

$$t_f E_f = 31,13 \text{ mmGPa} \rightarrow 20 \text{ mmGPa} \leq t_f E_f \leq 90 \text{ mmGPa} \rightarrow \text{OK!}$$

$$R(1) = \frac{\sqrt[3]{f_c^2 w_{f,e}}}{\varepsilon_{f,u} d_f} [738,93 - 4,06(t_f E_f)] 10^{-6} = 0,531$$

Ruptura do CFC:

$$\rho_f E_f = 0,184 \leq 0,7 \rightarrow \text{OK!}$$

$$R(2) = 0,56(\rho_f E_f)^2 - 1,22(\rho_f E_f) + 0,78 = 0,572$$

O limite superior do coeficiente de redução é:

$$R(3) = \frac{0,006}{\varepsilon_{f,u}} = 0,516$$

$$\text{Adota-se } R = 0,516$$

$$f_{f,e} = R f_{f,u} = 1531,02 \text{ MPa}$$

$$V_f = \frac{A_f f_{f,e} (\sin \beta + \cos \beta) d_f}{s_f} = 45,49 \text{ kN}$$

Força cortante última teórica segundo o modelo de Colloti et al. (2004):

$$\psi_i = \frac{A_{sw} f_s}{b_w s f_c} = 0,0302$$

$$v_c = 0,7$$

$$\tau_u = 2,77 + 0,06(f_c' - 20) = 2,77 + 0,06(v_c f_c - 20) = 3,74$$

$$h_f = 40 - 8 \text{ cm} = 32 \text{ cm}$$

$$\psi_e(1) = \frac{P_b}{b_w f_c} = \frac{w_f h_f \tau_u}{b_w f_c s_f} = 0,0686$$

$$v_f = 1,0$$

$$\psi_e(2) = \frac{P_f}{b_w f_c} = \frac{A_f f_{f,e}}{b_w f_c s_f} = \frac{2t_f w_f v_f f_{f,u}}{b_w f_c s_f} = 0,0415$$

$$\text{Adota-se } \psi_e = 0,0415$$

$$\psi = \psi_i + \psi_e = 0,0302 + 0,0415 = 0,0717$$

a) esmagamento da biela de concreto e/ou do escoamento dos estribos:

$$\alpha = \frac{a}{d_v} = \frac{a}{0,9d} = 2,746$$

$$f_{sl} = 599,65 \text{ MPa}$$

$$\eta = \frac{A_{sl} f_{sl}}{b d_v f_c} = 0,293$$

$$\psi_0 = \frac{\sqrt{1 + \alpha^2} - \alpha}{2\sqrt{1 + \alpha^2}} = 0,0302$$

$$\psi_0 \leq \psi \leq 0,5$$

$$\text{Então } \frac{\tau}{f_c} = \sqrt{\psi(1 - \psi)}$$

$$\tau = 13,34 \text{ MPa}$$

$$V_u(1) = t b_w d_v = t b_w 0,9d = 637,62 \text{ kN}$$

b) modo de ruptura relacionado ao esmagamento da biela de concreto e/ou do escoamento da armadura longitudinal:

$$\psi > \psi_0$$

$$\text{Então } \frac{\tau}{f_c} = \psi \left(\sqrt{\frac{2\eta}{\psi} + \alpha^2} - \alpha \right)$$

$$\tau = 4,51 \text{ MPa}$$

$$V_u(2) = t b_w d_v = t b_w 0,9d = 215,62 \text{ kN}$$

c) modo de ruptura relacionado à resistência das barras longitudinais e/ou ao esmagamento da seção de concreto (ruptura à flexão):

$$M_u = 21570 \text{ kNcm}$$

$$\frac{\tau}{f_c} = \frac{M_u}{abd_v f_c}$$

$$\tau = 5,16 \text{ MPa}$$

$$V_u(3) = t b_w d_v = t b_w 0,9d = 246,51 \text{ kN}$$

$$V_u = 215,62 \text{ kN}$$

F.3.

Viga VI-2

Dados de Entrada:

$$b_w = 15 \text{ cm}$$

$$h = 40 \text{ cm}$$

$$d = 40 - 1,5 - 0,5 - 1,0 = 35,4 \text{ cm}$$

$$a = 87,5 \text{ cm}$$

$$A_{sl} = 12,06 \text{ cm}^2 \rightarrow 6 \phi 16,0 \text{ mm}$$

$$\rho_{sl} = \frac{A_{sl}}{b_w d} = 0,02272$$

$$A_{sw} = 0,3927 \text{ cm}^2 \rightarrow \text{estribo de } \phi 5,0 \text{ mm}$$

$$s = 10,0 \text{ cm}$$

$$t_f = 0,0244 \text{ cm}$$

$$w_f = 10,0 \text{ cm}$$

$$A_f = 2t_f w_f = 0,488 \text{ cm}^2$$

$$s_f = 22,5 \text{ cm}$$

$$d_f = d - 8 \text{ cm} = 27,4 \text{ cm}$$

$$\rho_f = \frac{2t_f w_f}{b_w s_f} = 0,00145$$

$$E_f = 255180 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{f,u} = 0,011636 = 11,636 \text{ ‰}$$

$$f_{f,u} = 2969,16 \text{ MPa}$$

$$f_c = 51,73 \text{ MPa}$$

$$f_y = 595,5 \text{ MPa}$$

$$\alpha = \beta = 90^\circ$$

Força cortante última teórica segundo o modelo do ACI-318 (1999) e o ACI-440

(2001):

a) Parcela referente ao concreto V_c :

$$\frac{V_c}{b_w d} = \left(0,16\sqrt{f_c} + 17\rho_{st} \frac{a}{d} \right) \leq 0,29\sqrt{f_c}$$

$$\frac{V_c}{b_w d}(1) = 0,16\sqrt{f_c} + 17\rho_{st} \frac{a}{d} = 2,105 \text{ MPa}$$

$$\frac{V_c}{b_w d}(1) = 0,2105 \text{ kN/cm}^2 \rightarrow V_c(1) = 111,77 \text{ kN}$$

$$\frac{V_c}{b_w d}(2) = 0,29\sqrt{f_c} = 2,086 \text{ MPa} = 0,2086 \text{ kN/cm}^2$$

$$V_c(2) = 110,76 \text{ kN}$$

$$\text{Adotar } V_c = 110,76 \text{ kN}$$

b) Parcela referente ao aço V_{sw} :

$$V_{sw} = \frac{A_{sw} f_y d}{s} \leq 0,68\sqrt{f_c} b_w d$$

$$V_{sw} = 82,78 \text{ kN} \leq 259,70 \text{ kN} \rightarrow \text{OK!}$$

c) Parcela referente ao CFC V_f :

$$L_e = \frac{23300}{(t_f E_f)^{0,58}} = \frac{23300}{(0,244\text{mm} \times 255180\text{MPa})^{0,58}} = 38,61 \text{ mm}$$

$$k_1 = \sqrt[3]{\left(\frac{f_c}{27}\right)^2} = 1,543$$

$$k_2 = \frac{d_f - L_e}{d_f} = 0,859 \rightarrow \text{envolvimento em U}$$

$$k_v = \frac{k_1 k_2 L_e}{11900 \varepsilon_{f,u}} = 0,370 \leq 0,75$$

$$\varepsilon_{f,e}(1) = 0,004 \leq 0,75 \varepsilon_{f,u} \rightarrow \text{envolvimento completo}$$

$$0,75 \varepsilon_{f,u} = 0,008727$$

$$\text{Adotar } \varepsilon_{f,e}(1) = 0,004$$

$$\varepsilon_{f,e}(2) = k_v \varepsilon_{f,u} \leq 0,004 \rightarrow \text{envolvimento em U}$$

$$k_v \varepsilon_{f,u} = 0,004305$$

$$\text{Adotar } \varepsilon_{f,e}(2) = 0,004$$

$$\text{Logo: } \varepsilon_{f,e} = 0,004$$

$$V_f = \frac{A_f f_{f,e} (\sin \alpha + \cos \alpha) d_f}{s_f} = \frac{A_f E_f \varepsilon_{f,e} (\sin \alpha + \cos \alpha) d_f}{s_f} = 60,66 \text{ kN}$$

$$V_{u,teor} = V_{c,teor} + V_{sw,teor} + V_{f,teor} = 110,76 + 82,78 + 60,66 = 254,20 \text{ kN}$$

Força cortante última teórica segundo o modelo cinemático:

$$v_0 = \frac{0,88}{\sqrt{f_c}} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{h}} \right) (1 + 26 \rho_{sl}) = 0,502$$

$$\omega_{sw} = \frac{A_{sw} f_y}{b_w s f_c} = 0,030$$

$$\text{Adota-se } f_{f,e} = 1043,09 \text{ MPa} \rightarrow \text{Chen e Teng (2002)}$$

$$\omega_{fw} = \frac{2 t_f w_f \sin \beta f_{f,e}}{b_w s_f f_c} = 0,029$$

$$\tau_c = 0,059 v_0 f_c = 1,53 \text{ MPa}$$

$$\frac{(\omega_{sw} + \omega_{fw})}{v_0} = 0,118 \leq 0,21$$

$$\tau_u = \tau_c \left[11,64 \sqrt{\frac{(\omega_{sw} + \omega_{fw})}{v_0}} - \frac{16,95}{v_0 h} (\omega_{sw} s + \omega_{fw} s_f) \right] = 4,89 \text{ MPa}$$

$$V_u(1) = V_{c,teor} + V_{sw,teor} + V_{f,teor} = \tau_u b_w d = 259,83 \text{ kN}$$

Ângulo teórico θ_{CIN} :

$$x = h \sqrt{\frac{2\tau_c}{(\omega_{sw} + \omega_{fw})f_c}} = 39,99 \text{ cm}$$

$$\text{tg } \theta_{CIN} = \frac{h}{x} = 1,000$$

$$\theta_{CIN} = 45,00^\circ$$

Parcela da força cortante referente ao CFC segundo o modelo da FIB-Bulletin 14 (2001):

$$\varepsilon_{f,e}(1) = 0,17 \left(\frac{f_c^{2/3}}{E_f \rho_f} \right)^{0,3} \varepsilon_{f,u} \rightarrow \text{envolvimento completo}$$

$$\varepsilon_{f,e}(1) = 0,00587$$

$$\varepsilon_{f,e}(2) = 0,65 \left(\frac{f_c^{2/3}}{E_f \rho_f} \right)^{0,56} 10^{-3} \rightarrow \text{envolvimento em U}$$

$$\varepsilon_{f,e}(2) = 0,00496$$

Logo:

$$\varepsilon_{f,e} = k \times 0,00496 = 0,8 \times 0,00496 = 0,00397$$

Para $\theta_{CR} = 41^\circ$:

$$V_f = 0,9 \varepsilon_{f,e} E_f \rho_f b_w d (\cot g \theta_{CR} + \cot g \alpha) \text{sen } \alpha = 80,44 \text{ kN}$$

Para $\theta_\varepsilon = 40,04^\circ$:

$$V_f = 0,9 \varepsilon_{f,e} E_f \rho_f b_w d (\cot g \theta_\varepsilon + \cot g \alpha) \text{sen } \alpha = 83,21 \text{ kN}$$

Parcela da força cortante referente ao CFC segundo o modelo de Chen e Teng (2002):

$$z_t = d_{ft} = 8 \text{ cm}$$

$$z_b = 0,9d - h + d_{fb} = 0,9 \times 35,4 - 40 + 40 = 31,86 \text{ cm}$$

$$h_{fe} = z_b - z_t = 23,86 \text{ cm}$$

$$s_{fe} = s_f = 22,5 \text{ cm}$$

Ruptura por aderência:

$$L_e = \sqrt{\frac{E_f t_f}{\sqrt{f_c}}} = \sqrt{\frac{255180 \text{MPa} \times 0,244 \text{mm}}{\sqrt{51,73 \text{MPa}}}} = 93,00 \text{ mm} = 9,30 \text{ cm}$$

$$L_{m\acute{a}x} = h_{f,e} = 23,86 \text{ cm}$$

$$\lambda = \frac{L_{m\acute{a}x}}{L_e} = 2,564 \geq 1,0$$

Então $\beta_L = 1,0$

$$\beta_w = \sqrt{\frac{2 - \frac{w_f}{s_{fe}}}{1 + \frac{w_f}{s_{fe}}}} = 1,038$$

$$D_f = 1 - \frac{\pi - 2}{\pi \lambda} = 0,858 \quad \rightarrow \quad \lambda > 1,0$$

$$\sigma_{f,m\acute{a}x}(1) = 0,427 \beta_w \beta_L \sqrt{\frac{E_f \sqrt{f_c}}{t_f}}$$

$$\sigma_{f,m\acute{a}x}(1) = 0,427 \times 1,038 \times 1,0 \times \sqrt{\frac{255180 \text{MPa} \times \sqrt{51,73 \text{MPa}}}{0,244 \text{mm}}} = 1215,30 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{f,m\acute{a}x}(2) = f_{f,u} = 2969,16 \text{ MPa}$$

Adota-se $\sigma_{f,m\acute{a}x} = 1215,30 \text{ MPa}$

$$f_{f,e}(1) = D_f \sigma_{f,m\acute{a}x} = 1043,09 \text{ MPa}$$

Ruptura do CFC:

$$\zeta = \frac{z_t}{z_b} = 0,251$$

$$D_f = \frac{1 + \zeta}{2} = 0,626$$

Sendo $\frac{f_{f,u}}{E_f} = \varepsilon_{f,u}$

$$\sigma_{f,m\acute{a}x} = f_{f,u} = 2969,16 \text{ MPa}$$

$$f_{f,e}(2) = D_f \sigma_{f,m\acute{a}x} = 1857,36 \text{ MPa}$$

$$\text{Adota-se } f_{f,e} = 1043,09 \text{ MPa}$$

$$\text{Para } \theta_{CR} = 41^\circ:$$

$$V_f = 2f_{f,e}t_f w_f \frac{h_{fe}(\cot g \theta_{CR} + \cot g \beta) \text{sen} \beta}{s_f} = 62,10 \text{ kN}$$

$$\text{Para } \theta_\varepsilon = 40,04^\circ:$$

$$V_f = 2f_{f,e}t_f w_f \frac{h_{fe}(\cot g \theta_\varepsilon + \cot g \beta) \text{sen} \beta}{s_f} = 64,24 \text{ kN}$$

Parcela da força cortante referente ao CFC segundo o modelo de Khalifa e Nanni (2002):

Ruptura por aderência:

$$L_e = 75 \text{ mm}$$

$$w_{f,e} = d_f - L_e = 19,90 \text{ cm} \rightarrow \text{envolvimento em U}$$

$$t_f E_f = 62,26 \text{ mmGPa} \rightarrow 20 \text{ mmGPa} \leq t_f E_f \leq 90 \text{ mmGPa} \rightarrow \text{OK!}$$

$$R(1) = \frac{\sqrt[3]{f_c^2 w_{f,e}}}{\varepsilon_{f,u} d_f} [738,93 - 4,06(t_f E_f)] 10^{-6} = 0,421$$

Ruptura do CFC:

$$\rho_f E_f = 0,369 \leq 0,7 \rightarrow \text{OK!}$$

$$R(2) = 0,56(\rho_f E_f)^2 - 1,22(\rho_f E_f) + 0,78 = 0,404$$

O limite superior do coeficiente de redução é:

$$R(3) = \frac{0,006}{\varepsilon_{f,u}} = 0,516$$

$$\text{Adota-se } R = 0,404$$

$$f_{f,e} = Rf_{f,u} = 1199,82 \text{ MPa}$$

$$V_f = \frac{A_f f_{f,e} (\operatorname{sen} \beta + \cos \beta) d_f}{s_f} = 71,30 \text{ kN}$$

Força cortante última teórica segundo o modelo de Colloti *et al.* (2004):

$$\psi_i = \frac{A_{sw} f_s}{b_w s f_c} = 0,0302$$

$$v_c = 0,7$$

$$\tau_u = 2,77 + 0,06(f'_c - 20) = 2,77 + 0,06(v_c f_c - 20) = 3,74$$

$$h_f = 40 - 8 \text{ cm} = 32 \text{ cm}$$

$$\psi_e(1) = \frac{p_b}{b_w f_c} = \frac{w_f h_f \tau_u}{b_w f_c s_f} = 0,0686$$

$$v_f = 1,0$$

$$\psi_e(2) = \frac{p_f}{b_w f_c} = \frac{A_f f_{f,e}}{b_w f_c s_f} = \frac{2 t_f w_f v_f f_{f,u}}{b_w f_c s_f} = 0,0830$$

$$\text{Adota-se } \psi_e = 0,0686$$

$$\psi = \psi_i + \psi_e = 0,0302 + 0,0686 = 0,0988$$

a) esmagamento da biela de concreto e/ou do escoamento dos estribos:

$$\alpha = \frac{a}{d_v} = \frac{a}{0,9d} = 2,746$$

$$f_{sl} = 599,65 \text{ MPa}$$

$$\eta = \frac{A_{sl} f_{sl}}{b d_v f_c} = 0,293$$

$$\psi_0 = \frac{\sqrt{1 + \alpha^2} - \alpha}{2\sqrt{1 + \alpha^2}} = 0,0302$$

$$\psi_0 \leq \psi \leq 0,5$$

$$\text{Então } \frac{\tau}{f_c} = \sqrt{\psi - (1 - \psi)}$$

$$\tau = 15,43 \text{ MPa}$$

$$V_u(1) = t b_w d_v = t b_w 0,9d = 737,54 \text{ kN}$$

b) modo de ruptura relacionado ao esmagamento da biela de concreto e/ou do escoamento da armadura longitudinal:

$$\psi > \psi_0$$

$$\text{Então } \frac{\tau}{f_c} = \psi \left(\sqrt{\frac{2\eta}{\psi} + \alpha^2} - \alpha \right)$$

$$\tau = 4,72 \text{ MPa}$$

$$V_u(2) = \tau b_w d_v = \tau b_w 0,9d = 225,49 \text{ kN}$$

c) modo de ruptura relacionado à resistência das barras longitudinais e/ou ao esmagamento da seção de concreto (ruptura à flexão):

$$M_u = 21570 \text{ kNcm}$$

$$\frac{\tau}{f_c} = \frac{M_u}{abd_v f_c}$$

$$\tau = 5,16 \text{ MPa}$$

$$V_u(3) = \tau b_w d_v = \tau b_w 0,9d = 246,51 \text{ kN}$$

$$V_u = 225,49 \text{ kN}$$

F.4.

Viga VI-3

Dados de Entrada:

$$b_w = 15 \text{ cm}$$

$$h = 40 \text{ cm}$$

$$d = 40 - 1,5 - 0,5 - 1,0 = 35,4 \text{ cm}$$

$$a = 87,5 \text{ cm}$$

$$A_{sl} = 12,06 \text{ cm}^2 \rightarrow 6 \phi 16,0 \text{ mm}$$

$$\rho_{sl} = \frac{A_{sl}}{b_w d} = 0,02272$$

$$A_{sw} = 0,3927 \text{ cm}^2 \rightarrow \text{estribo de } \phi 5,0 \text{ mm}$$

$$s = 10,0 \text{ cm}$$

$$t_f = 0,0366 \text{ cm}$$

$$w_f = 10,0 \text{ cm}$$

$$A_f = 2t_f w_f = 0,732 \text{ cm}^2$$

$$s_f = 22,5 \text{ cm}$$

$$d_f = d - 8 \text{ cm} = 27,4 \text{ cm}$$

$$\rho_f = \frac{2t_f w_f}{b_w s_f} = 0,00217$$

$$E_f = 255180 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{f,u} = 0,011636 = 11,636 \text{ ‰}$$

$$f_{f,u} = 2969,16 \text{ MPa}$$

$$f_c = 52,30 \text{ MPa}$$

$$f_y = 595,5 \text{ MPa}$$

$$\alpha = \beta = 90^\circ$$

Força cortante última teórica segundo o modelo do ACI-318 (1999) e o ACI-440 (2001):

a) Parcela referente ao concreto V_c :

$$\frac{V_c}{b_w d} = \left(0,16\sqrt{f_c} + 17\rho_{se} \frac{a}{d} \right) \leq 0,29\sqrt{f_c}$$

$$\frac{V_c}{b_w d} (1) = 0,16\sqrt{f_c} + 17\rho_{se} \frac{a}{d} = 2,112 \text{ MPa}$$

$$\frac{V_c}{b_w d} (1) = 0,2112 \text{ kN/cm}^2 \quad \rightarrow \quad V_c (1) = 112,15 \text{ kN}$$

$$\frac{V_c}{b_w d} (2) = 0,29\sqrt{f_c} = 2,097 \text{ MPa} = 0,2097 \text{ kN/cm}^2$$

$$V_c (2) = 111,36 \text{ kN}$$

$$\text{Adotar } V_c = 111,36 \text{ kN}$$

b) Parcela referente ao aço V_{sw} :

$$V_{sw} = \frac{A_{sw} f_y d}{s} \leq 0,68 \sqrt{f_c} b_w d$$

$$V_{sw} = 82,78 \text{ kN} \leq 259,70 \text{ kN} \rightarrow \text{OK!}$$

c) Parcela referente ao CFC V_f :

$$L_e = \frac{23300}{(t_f E_f)^{0,58}} = \frac{23300}{(0,366 \text{ mm} \times 255180 \text{ MPa})^{0,58}} = 30,52 \text{ mm}$$

$$k_1 = \sqrt[3]{\left(\frac{f_c}{27}\right)^2} = 1,554$$

$$k_2 = \frac{d_f - L_e}{d_f} = 0,889 \rightarrow \text{envolvimento em U}$$

$$k_v = \frac{k_1 k_2 L_e}{11900 \varepsilon_{f,u}} = 0,304 \leq 0,75$$

$$\varepsilon_{f,e}(1) = 0,004 \leq 0,75 \varepsilon_{f,u} \rightarrow \text{envolvimento completo}$$

$$0,75 \varepsilon_{f,u} = 0,008727$$

$$\text{Adotar } \varepsilon_{f,e}(1) = 0,004$$

$$\varepsilon_{f,e}(2) = k_v \varepsilon_{f,u} \leq 0,004 \rightarrow \text{envolvimento em U}$$

$$k_v \varepsilon_{f,u} = 0,00354$$

$$\text{Adotar } \varepsilon_{f,e}(2) = 0,00354$$

$$\text{Logo: } \varepsilon_{f,e} = 0,00354$$

$$V_f = \frac{A_f f_{f,e} (\sin \alpha + \cos \alpha) d_f}{s_f} = \frac{A_f E_f \varepsilon_{f,e} (\sin \alpha + \cos \alpha) d_f}{s_f} = 80,55 \text{ kN}$$

$$V_{u,teor} = V_{c,teor} + V_{sw,teor} + V_{f,teor} = 111,36 + 82,78 + 80,55 = 274,70 \text{ kN}$$

Força cortante última teórica segundo o modelo cinemático:

$$v_0 = \frac{0,88}{\sqrt{f_c}} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{h}}\right) (1 + 26 \rho_{sl}) = 0,500$$

$$\omega_{sw} = \frac{A_{sw} f_y}{b_w s f_c} = 0,030$$

$$\text{Adota-se } f_{f,e} = 822,80 \text{ MPa} \rightarrow \text{Chen e Teng (2002)}$$

$$\omega_{fw} = \frac{2t_f w_f \text{sen } \beta}{b_w s_f} \frac{f_{f,e}}{f_c} = 0,034$$

$$\tau_c = 0,059 v_0 f_c = 1,54 \text{ MPa}$$

$$\frac{(\omega_{sw} + \omega_{fw})}{v_0} = 0,128 \leq 0,21$$

$$\tau_u = \tau_c \left[11,64 \sqrt{\frac{(\omega_{sw} + \omega_{fw})}{v_0}} - \frac{16,95}{v_0 h} (\omega_{sw} s + \omega_{fw} s_f) \right] = 5,03 \text{ MPa}$$

$$V_u(1) = V_{c,teor} + V_{sw,teor} + V_{f,teor} = \tau_u b_w d = 266,85 \text{ kN}$$

Ângulo teórico θ_{CIN} :

$$x = h \sqrt{\frac{2\tau_c}{(\omega_{sw} + \omega_{fw}) f_c}} = 38,41 \text{ cm}$$

$$\text{tg } \theta_{CIN} = \frac{h}{x} = 1,041$$

$$\theta_{CIN} = 46,16^\circ$$

Parcela da força cortante referente ao CFC segundo o modelo da FIB-Bulletin 14

(2001):

$$\varepsilon_{f,e}(1) = 0,17 \left(\frac{f_c^{2/3}}{E_f \rho_f} \right)^{0,3} \varepsilon_{f,u} \rightarrow \text{envolvimento completo}$$

$$\varepsilon_{f,e}(1) = 0,00521$$

$$\varepsilon_{f,e}(2) = 0,65 \left(\frac{f_c^{2/3}}{E_f \rho_f} \right)^{0,56} 10^{-3} \rightarrow \text{envolvimento em U}$$

$$\varepsilon_{f,e}(2) = 0,00397$$

Logo:

$$\varepsilon_{f,e} = k \times 0,00397 = 0,8 \times 0,00397 = 0,00317$$

Para $\theta_{CR} = 42^\circ$:

$$V_f = 0,9 \varepsilon_{f,e} E_f \rho_f b_w d (\cot g \theta_{CR} + \cot g \alpha) \text{sen } \alpha = 93,20 \text{ kN}$$

Para $\theta_\varepsilon = 41,38^\circ$:

$$V_f = 0,9\varepsilon_{f,e} E_f \rho_f b_w d (\cot g \theta_\varepsilon + \cot g \alpha) \text{sen} \alpha = 95,26 \text{ kN}$$

Parcela da força cortante referente ao CFC segundo o modelo de Chen e Teng (2002):

$$z_t = d_{ft} = 8 \text{ cm}$$

$$z_b = 0,9d - h + d_{fb} = 0,9 \times 35,4 - 40 + 40 = 31,86 \text{ cm}$$

$$h_{fe} = z_b - z_t = 23,86 \text{ cm}$$

$$s_{fe} = s_f = 22,5 \text{ cm}$$

Ruptura por aderência:

$$L_e = \sqrt{\frac{E_f t_f}{\sqrt{f_c}}} = \sqrt{\frac{255180 \text{ MPa} \times 0,366 \text{ mm}}{\sqrt{52,30 \text{ MPa}}}} = 113,60 \text{ mm} = 11,36 \text{ cm}$$

$$L_{\text{máx}} = h_{f,e} = 23,86 \text{ cm}$$

$$\lambda = \frac{L_{\text{máx}}}{L_e} = 2,10 \geq 1,0$$

$$\text{Então } \beta_L = 1,0$$

$$\beta_w = \sqrt{\frac{2 - \frac{w_f}{s_{fe}}}{1 + \frac{w_f}{s_{fe}}}} = 1,038$$

$$D_f = 1 - \frac{\pi - 2}{\pi \lambda} = 0,827 \quad \rightarrow \quad \lambda > 1,0$$

$$\sigma_{f,\text{máx}}(1) = 0,427 \beta_w \beta_L \sqrt{\frac{E_f \sqrt{f_c}}{t_f}}$$

$$\sigma_{f,\text{máx}}(1) = 0,427 \times 1,038 \times 1,0 \times \sqrt{\frac{255180 \text{ MPa} \times \sqrt{52,30 \text{ MPa}}}{0,366 \text{ mm}}} = 995,01 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{f,\text{máx}}(2) = f_{f,u} = 2969,16 \text{ MPa}$$

$$\text{Adota-se } \sigma_{f,\text{máx}} = 995,01 \text{ MPa}$$

$$f_{f,e}(1) = D_f \sigma_{f,\text{máx}} = 822,80 \text{ MPa}$$

Ruptura do CFC:

$$\zeta = \frac{z_t}{z_b} = 0,251$$

$$D_f = \frac{1 + \zeta}{2} = 0,626$$

Sendo $\frac{f_{f,u}}{E_f} = \varepsilon_{f,u}$

$$\sigma_{f,máx} = f_{f,u} = 2969,16 \text{ MPa}$$

$$f_{f,e}(2) = D_f \sigma_{f,máx} = 1857,36 \text{ MPa}$$

Adota-se $f_{f,e} = 822,80 \text{ MPa}$

Para $\theta_{CR} = 42^\circ$:

$$V_f = 2 f_{f,e} t_f w_f \frac{h_{fe} (\cot g \theta_{CR} + \cot g \beta) \text{sen} \beta}{s_f} = 70,93 \text{ kN}$$

Para $\theta_\varepsilon = 41,38^\circ$:

$$V_f = 2 f_{f,e} t_f w_f \frac{h_{fe} (\cot g \theta_\varepsilon + \cot g \beta) \text{sen} \beta}{s_f} = 72,50 \text{ kN}$$

Parcela da força cortante referente ao CFC segundo o modelo de Khalifa e Nanni (2002):

Ruptura por aderência:

$$L_e = 75 \text{ mm}$$

$$w_{f,e} = d_f - L_e = 19,90 \text{ cm} \rightarrow \text{envolvimento em U}$$

$$t_f E_f \cong 90 \text{ mmGPa} \rightarrow 20 \text{ mmGPa} \leq t_f E_f \leq 90 \text{ mmGPa} \rightarrow \text{OK!}$$

$$R(1) = \frac{\sqrt[3]{f_c^2 w_{f,e}}}{\varepsilon_{f,u} d_f} [738,93 - 4,06(t_f E_f)] 10^{-6} = 0,314$$

Ruptura do CFC:

$$\rho_f E_f = 0,553 \leq 0,7 \rightarrow OK!$$

$$R(2) = 0,56(\rho_f E_f)^2 - 1,22(\rho_f E_f) + 0,78 = 0,274$$

O limite superior do coeficiente de redução é:

$$R(3) = \frac{0,006}{\varepsilon_{f,u}} = 0,516$$

Adota-se $R = 0,274$

$$f_{f,e} = R f_{f,u} = 814,50 \text{ MPa}$$

$$V_f = \frac{A_f f_{f,e} (\sin \beta + \cos \beta) d_f}{s_f} = 72,61 \text{ kN}$$

Força cortante teórica última segundo o modelo de Colloti *et al.* (2004):

$$\psi_i = \frac{A_{sw} f_s}{b_w s f_c} = 0,0298$$

$$v_c = 0,7$$

$$\tau_u = 2,77 + 0,06(f'_c - 20) = 2,77 + 0,06(v_c f_c - 20) = 3,77$$

$$h_f = 40 - 8 \text{ cm} = 32 \text{ cm}$$

$$\psi_e(1) = \frac{p_b}{b_w f_c} = \frac{w_f h_f \tau_u}{b_w f_c s_f} = 0,0683$$

$$v_f = 1,0$$

$$\psi_e(2) = \frac{p_f}{b_w f_c} = \frac{A_f f_{f,e}}{b_w f_c s_f} = \frac{2 t_f w_f v_f f_{f,u}}{b_w f_c s_f} = 0,1231$$

Adota-se $\psi_e = 0,0683$

$$\psi = \psi_i + \psi_e = 0,0298 + 0,0683 = 0,0981$$

a) esmagamento da biela de concreto e/ou do escoamento dos estribos:

$$\alpha = \frac{a}{d_v} = \frac{a}{0,9d} = 2,746$$

$$f_{sl} = 599,65 \text{ MPa}$$

$$\eta = \frac{A_{sl} f_{sl}}{b d_v f_c} = 0,289$$

$$\psi_0 = \frac{\sqrt{1 + \alpha^2} - \alpha}{2\sqrt{1 + \alpha^2}} = 0,0302$$

$$\psi_0 \leq \psi \leq 0,5$$

$$\text{Então } \frac{\tau}{f_c} = \sqrt{\psi - (1 - \psi)}$$

$$\tau = 15,56 \text{ MPa}$$

$$V_u(1) = t b_w d_v = t b_w 0,9d = 743,51 \text{ kN}$$

b) modo de ruptura relacionado ao esmagamento da biela de concreto e/ou do escoamento da armadura longitudinal:

$$\psi > \psi_0$$

$$\text{Então } \frac{\tau}{f_c} = \psi \left(\sqrt{\frac{2\eta}{\psi} + \alpha^2} - \alpha \right)$$

$$\tau = 4,72 \text{ MPa}$$

$$V_u(2) = t b_w d_v = t b_w 0,9d = 225,62 \text{ kN}$$

c) modo de ruptura relacionado à resistência das barras longitudinais e/ou ao esmagamento da seção de concreto (ruptura à flexão):

$$M_u = 21613 \text{ kNcm}$$

$$\frac{\tau}{f_c} = \frac{M_u}{a b d_v f_c}$$

$$\tau = 5,17 \text{ MPa}$$

$$V_u(3) = t b_w d_v = t b_w 0,9d = 247,01 \text{ kN}$$

$$V_u = 225,49 \text{ kN}$$

F.5.

Viga VR2

Dados de Entrada:

$$b_w = 15 \text{ cm}$$

$$h = 40 \text{ cm}$$

$$d = 40 - 1,5 - 0,5 - 1,0 = 35,4 \text{ cm}$$

$$a = 87,5 \text{ cm}$$

$$A_{sl} = 12,06 \text{ cm}^2 \rightarrow 6 \phi 16,0 \text{ mm}$$

$$\rho_{sl} = \frac{A_{sl}}{b_w d} = 0,02272$$

$$A_{sw} = 0,3927 \text{ cm}^2 \rightarrow \text{estribo de } \phi 5,0 \text{ mm}$$

$$s = 20,0 \text{ cm}$$

$$f_c = 50,94 \text{ MPa}$$

$$f_y = 595,5 \text{ MPa}$$

Força cortante última teórica segundo a norma ACI-318 (1999):

a) Parcela referente ao concreto V_c :

$$\frac{V_c}{b_w d} = \left(0,16\sqrt{f_c} + 17\rho_{sl} \frac{a}{d} \right) \leq 0,29\sqrt{f_c}$$

$$\frac{V_c}{b_w d}(1) = 0,16\sqrt{f_c} + 17\rho_{sl} \frac{a}{d} = 2,0851 \text{ MPa}$$

$$\frac{V_c}{b_w d}(1) = 0,2085 \text{ kN/cm}^2 \rightarrow V_c(1) = 110,71 \text{ kN}$$

$$\frac{V_c}{b_w d}(2) = 0,29\sqrt{f_c} = 2,049 \text{ MPa} = 0,2049 \text{ kN/cm}^2$$

$$V_c(2) = 108,80 \text{ kN}$$

$$\text{Adotar } V_c = 108,80 \text{ kN}$$

b) Parcela referente ao aço V_{sw} :

$$V_{sw} = \frac{A_{sw} f_y d}{s} \leq 0,68\sqrt{f_c} b_w d$$

$$V_{sw} = 41,39 \text{ kN} \leq 251,31 \text{ kN} \rightarrow \text{OK!}$$

$$V_{u,teor} = V_{c,teor} + V_{sw,teor} = 108,80 + 41,39 = 150,19 \text{ kN}$$

Força cortante última teórica segundo o modelo cinemático:

$$v_0 = \frac{0,88}{\sqrt{f_c}} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{h}} \right) (1 + 26\rho_{sl}) = 0,511$$

$$\omega_{sw} = \frac{A_{sw}}{b_w s} \frac{f_y}{f_c} = 0,016$$

$$\tau_c = 0,059 v_0 f_c = 1,51 \text{ MPa}$$

$$\frac{\omega_{sw}}{v_0} = 0,031 \leq 0,21$$

$$\tau_u = \tau_c \left(11,64 \sqrt{\frac{\omega_{sw}}{v_0}} - \frac{16,95}{v_0 h} \omega_{sw} s \right) = 2,67 \text{ MPa}$$

$$V_u = \tau_u b_w d = 141,98 \text{ kN}$$

Ângulo teórico θ_{CIN} :

$$x = h \sqrt{\frac{2\tau_c}{\omega_{sw} f_c}} = 78,63 \text{ cm}$$

$$\text{tg } \theta_{CIN} = \frac{h}{x} = 0,509$$

$$\theta_{CIN} = 26,96^\circ$$

F.6.

Viga VII-1

Dados de Entrada:

$$b_w = 15 \text{ cm}$$

$$h = 40 \text{ cm}$$

$$d = 40 - 1,5 - 0,5 - 1,0 = 35,4 \text{ cm}$$

$$a = 87,5 \text{ cm}$$

$$A_{sl} = 12,06 \text{ cm}^2 \rightarrow 6 \phi 16,0 \text{ mm}$$

$$\rho_{sl} = \frac{A_{sl}}{b_w d} = 0,02272$$

$$A_{sw} = 0,3927 \text{ cm}^2 \rightarrow \text{estribo de } \phi 5,0 \text{ mm}$$

$$s = 20,0 \text{ cm}$$

$$t_f = 0,0122 \text{ cm}$$

$$w_f = 10,0 \text{ cm}$$

$$A_f = 2t_f w_f = 0,244 \text{ cm}^2$$

$$s_f = 22,5 \text{ cm}$$

$$d_f = d - 8 \text{ cm} = 27,4 \text{ cm}$$

$$\rho_f = \frac{2t_f w_f}{b_w s_f} = 0,00072$$

$$E_f = 255180 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{f,u} = 0,011636 = 11,636 \text{ ‰}$$

$$f_{f,u} = 2969,16 \text{ MPa}$$

$$f_c = 50,94 \text{ MPa}$$

$$f_y = 595,5 \text{ MPa}$$

$$\alpha = \beta = 90^\circ$$

Força cortante última teórica segundo o modelo do ACI-318 (1999) e o ACI-440 (2001):

a) Parcela referente ao concreto V_c :

$$\frac{V_c}{b_w d} = \left(0,16\sqrt{f_c} + 17\rho_{st} \frac{a}{d} \right) \leq 0,29\sqrt{f_c}$$

$$\frac{V_c}{b_w d} (1) = 0,16\sqrt{f_c} + 17\rho_{st} \frac{a}{d} = 2,097 \text{ MPa}$$

$$\frac{V_c}{b_w d} (1) = 0,2097 \text{ kN/cm}^2 \quad \rightarrow \quad V_c (1) = 111,3 \text{ kN}$$

$$\frac{V_c}{b_w d} (2) = 0,29\sqrt{f_c} = 2,070 \text{ MPa} = 0,2070 \text{ kN/cm}^2$$

$$V_c (2) = 109,91 \text{ kN}$$

$$\text{Adotar } V_c = 109,91 \text{ kN}$$

b) Parcela referente ao aço V_{sw} :

$$V_{sw} = \frac{A_{sw} f_y d}{s} \leq 0,68 \sqrt{f_c} b_w d$$

$$V_{sw} = 41,39 \text{ kN} \leq 259,70 \text{ kN} \rightarrow \text{OK!}$$

c) Parcela referente ao CFC V_f :

$$L_e = \frac{23300}{(t_f E_f)^{0,58}} = \frac{23300}{(0,122 \text{ mm} \times 255180 \text{ MPa})^{0,58}} = 57,72 \text{ mm}$$

$$k_1 = \sqrt[3]{\left(\frac{f_c}{27}\right)^2} = 1,527$$

$$k_2 = \frac{d_f - L_e}{d_f} = 0,789 \rightarrow \text{envolvimento em U}$$

$$k_v = \frac{k_1 k_2 L_e}{11900 \varepsilon_{f,u}} = 0,502 \leq 0,75$$

$$\varepsilon_{f,e}(1) = 0,004 \leq 0,75 \varepsilon_{f,u} \rightarrow \text{envolvimento completo}$$

$$0,75 \varepsilon_{f,u} = 0,008727$$

$$\text{Adotar } \varepsilon_{f,e}(1) = 0,004$$

$$\varepsilon_{f,e}(2) = k_v \varepsilon_{f,u} \leq 0,004 \rightarrow \text{envolvimento em U}$$

$$k_v \varepsilon_{f,u} = 0,00584$$

$$\text{Adotar } \varepsilon_{f,e}(2) = 0,004$$

$$\text{Logo: } \varepsilon_{f,e} = 0,004$$

$$V_f = \frac{A_f f_{f,e} (\sin \alpha + \cos \alpha) d_f}{s_f} = \frac{A_f E_f \varepsilon_{f,e} (\sin \alpha + \cos \alpha) d_f}{s_f} = 30,33 \text{ kN}$$

$$V_{u,teor} = V_{c,teor} + V_{sw,teor} + V_{f,teor} = 109,91 + 41,39 + 30,33 = 181,63 \text{ kN}$$

Força cortante última teórica segundo o modelo cinemático:

$$v_0 = \frac{0,88}{\sqrt{f_c}} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{h}}\right) (1 + 26 \rho_{sl}) = 0,506$$

$$\omega_{sw} = \frac{A_{sw} f_y}{b_w s f_c} = 0,015$$

$$\text{Adota-se } f_{f,e} = 1546,49 \text{ MPa} \rightarrow \text{Chen e Teng (2002)}$$

$$\omega_{fw} = \frac{2t_f w_f \text{sen } \beta}{b_w s_f} \frac{f_{f,e}}{f_c} = 0,022$$

$$\tau_c = 0,059 v_0 f_c = 1,52 \text{ MPa}$$

$$\frac{(\omega_{sw} + \omega_{fw})}{v_0} = 0,074 \leq 0,21$$

$$\tau_u = \tau_c \left[11,64 \sqrt{\frac{(\omega_{sw} + \omega_{fw})}{v_0}} - \frac{16,95}{v_0 h} (\omega_{sw} s + \omega_{fw} s_f) \right] = 3,79 \text{ MPa}$$

$$V_u(1) = V_{c,teor} + V_{sw,teor} + V_{f,teor} = \tau_u b_w d = 201,00 \text{ kN}$$

Ângulo teórico θ_{CIN} :

$$x = h \sqrt{\frac{2\tau_c}{(\omega_{sw} + \omega_{fw}) f_c}} = 50,65 \text{ cm}$$

$$\text{tg } \theta_{CIN} = \frac{h}{x} = 0,790$$

$$\theta_{CIN} = 38,30^\circ$$

Parcela da força cortante referente ao CFC segundo o modelo da FIB-Bulletin 14

(2001):

$$\varepsilon_{f,e}(1) = 0,17 \left(\frac{f_c^{2/3}}{E_f \rho_f} \right)^{0,3} \varepsilon_{f,u} \rightarrow \text{envolvimento completo}$$

$$\varepsilon_{f,e}(1) = 0,00721$$

$$\varepsilon_{f,e}(2) = 0,65 \left(\frac{f_c^{2/3}}{E_f \rho_f} \right)^{0,56} 10^{-3} \rightarrow \text{envolvimento em U}$$

$$\varepsilon_{f,e}(2) = 0,00727$$

Logo:

$$\varepsilon_{f,e} = k \times 0,00721 = 0,8 \times 0,00721 = 0,00577$$

Para $\theta_{CR} = 38^\circ$:

$$V_f = 0,9 \varepsilon_{f,e} E_f \rho_f b_w d (\cot g \theta_{CR} + \cot g \alpha) \text{sen } \alpha = 65,08 \text{ kN}$$

Para $\theta_\varepsilon = 44,97^\circ$:

$$V_f = 0,9\varepsilon_{f,e} E_f \rho_f b_w d (\cot g \theta_\varepsilon + \cot g \alpha) \text{sen} \alpha = 50,90 \text{ kN}$$

Parcela da força cortante referente ao CFC segundo o modelo de Chen e Teng (2002):

$$z_t = d_{ft} = 8 \text{ cm}$$

$$z_b = 0,9d - h + d_{fb} = 0,9 \times 35,4 - 40 + 40 = 31,86 \text{ cm}$$

$$h_{fe} = z_b - z_t = 23,86 \text{ cm}$$

$$s_{fe} = s_f = 22,5 \text{ cm}$$

Ruptura por aderência:

$$L_e = \sqrt{\frac{E_f t_f}{\sqrt{f_c}}} = \sqrt{\frac{255180 \text{ MPa} \times 0,122 \text{ mm}}{\sqrt{50,94 \text{ MPa}}}} = 66,0 \text{ mm} = 6,60 \text{ cm}$$

$$L_{\text{máx}} = h_{f,e} = 23,86 \text{ cm}$$

$$\lambda = \frac{L_{\text{máx}}}{L_e} = 3,613 \geq 1,0$$

$$\text{Então } \beta_L = 1,0$$

$$\beta_w = \sqrt{\frac{2 - \frac{w_f}{s_{fe}}}{1 + \frac{w_f}{s_{fe}}}} = 1,038$$

$$D_f = 1 - \frac{\pi - 2}{\pi \lambda} = 0,899 \quad \rightarrow \quad \lambda > 1,0$$

$$\sigma_{f,\text{máx}}(1) = 0,427 \beta_w \beta_L \sqrt{\frac{E_f \sqrt{f_c}}{t_f}}$$

$$\sigma_{f,\text{máx}}(1) = 0,427 \times 1,038 \times 1,0 \times \sqrt{\frac{255180 \text{ MPa} \times \sqrt{50,94 \text{ MPa}}}{0,122 \text{ mm}}} = 1712,10 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{f,\text{máx}}(2) = f_{f,u} = 2969,16 \text{ MPa}$$

$$\text{Adota-se } \sigma_{f,\text{máx}} = 1712,10 \text{ MPa}$$

$$f_{f,e}(1) = D_f \sigma_{f,\text{máx}} = 1539,89 \text{ MPa}$$

Ruptura do CFC:

$$\zeta = \frac{z_t}{z_b} = 0,251$$

$$D_f = \frac{1 + \zeta}{2} = 0,626$$

Sendo $\frac{f_{f,u}}{E_f} = \varepsilon_{f,u}$

$$\sigma_{f,máx} = f_{f,u} = 2969,16 \text{ MPa}$$

$$f_{f,e}(2) = D_f \sigma_{f,máx} = 1857,36 \text{ MPa}$$

Adota – se $f_{f,e} = 1539,89 \text{ MPa}$

Para $\theta_{CR} = 38^\circ$:

$$V_f = 2 f_{f,e} t_f w_f \frac{h_{fe} (\cot g \theta_{CR} + \cot g \beta) \text{sen} \beta}{s_f} = 51,00 \text{ kN}$$

Para $\theta_\varepsilon = 44,97^\circ$:

$$V_f = 2 f_{f,e} t_f w_f \frac{h_{fe} (\cot g \theta_\varepsilon + \cot g \beta) \text{sen} \beta}{s_f} = 39,89 \text{ kN}$$

Parcela da força cortante referente ao CFC segundo o modelo de Khalifa e Nanni (2002):

Ruptura por aderência:

$$L_e = 75 \text{ mm}$$

$$w_{f,e} = d_f - L_e = 19,90 \text{ cm} \rightarrow \text{envolvimento em U}$$

$$t_f E_f = 31,13 \text{ mmGPa} \rightarrow 20 \text{ mmGPa} \leq t_f E_f \leq 90 \text{ mmGPa} \rightarrow \text{OK!}$$

$$R(1) = \frac{\sqrt[3]{f_c^2 w_{f,e}}}{\varepsilon_{f,u} d_f} [738,93 - 4,06(t_f E_f)] 10^{-6} = 0,525$$

Ruptura do CFC:

$$\rho_f E_f = 0,184 \leq 0,7 \rightarrow OK!$$

$$R(2) = 0,56(\rho_f E_f)^2 - 1,22(\rho_f E_f) + 0,78 = 0,572$$

O limite superior do coeficiente de redução é:

$$R(3) = \frac{0,006}{\varepsilon_{f,u}} = 0,516$$

Adota-se $R = 0,516$

$$f_{f,e} = R f_{f,u} = 1531,02 \text{ MPa}$$

$$V_f = \frac{A_f f_{f,e} (\sin \beta + \cos \beta) d_f}{s_f} = 45,49 \text{ kN}$$

Força cortante última teórica segundo o modelo de Colloti *et al.* (2004):

$$\psi_i = \frac{A_{sw} f_s}{b_w s f_c} = 0,0153$$

$$v_c = 0,7$$

$$\tau_u = 2,77 + 0,06(f'_c - 20) = 2,77 + 0,06(v_c f'_c - 20) = 3,71$$

$$h_f = 40 - 8 \text{ cm} = 32 \text{ cm}$$

$$\psi_e(1) = \frac{p_b}{b_w f_c} = \frac{w_f h_f \tau_u}{b_w f_c s_f} = 0,0690$$

$$v_f = 1,0$$

$$\psi_e(2) = \frac{p_f}{b_w f_c} = \frac{A_f f_{f,e}}{b_w f_c s_f} = \frac{2 t_f w_f v_f f_{f,u}}{b_w f_c s_f} = 0,0421$$

Adota-se $\psi_e = 0,0421$

$$\psi = \psi_i + \psi_e = 0,0153 + 0,0421 = 0,0574$$

a) esmagamento da biela de concreto e/ou do escoamento dos estribos:

$$\alpha = \frac{a}{d_v} = \frac{a}{0,9d} = 2,746$$

$$f_{sl} = 599,65 \text{ MPa}$$

$$\eta = \frac{A_{sl} f_{sl}}{b d_v f_c} = 0,297$$

$$\psi_0 = \frac{\sqrt{1 + \alpha^2} - \alpha}{2\sqrt{1 + \alpha^2}} = 0,0302$$

$$\psi_0 \leq \psi \leq 0,5$$

$$\text{Então } \frac{\tau}{f_c} = \sqrt{\psi - (1 - \psi)}$$

$$\tau = 11,85 \text{ MPa}$$

$$V_u(1) = t b_w d_v = t b_w 0,9d = 566,51 \text{ kN}$$

b) modo de ruptura relacionado ao esmagamento da biela de concreto e/ou do escoamento da armadura longitudinal:

$$\psi > \psi_0$$

$$\text{Então } \frac{\tau}{f_c} = \psi \left(\sqrt{\frac{2\eta}{\psi} + \alpha^2} - \alpha \right)$$

$$\tau = 4,34 \text{ MPa}$$

$$V_u(2) = t b_w d_v = t b_w 0,9d = 207,41 \text{ kN}$$

c) modo de ruptura relacionado à resistência das barras longitudinais e/ou ao esmagamento da seção de concreto (ruptura à flexão):

$$M_u = 21508 \text{ kNcm}$$

$$\frac{\tau}{f_c} = \frac{M_u}{a b d_v f_c}$$

$$\tau = 5,14 \text{ MPa}$$

$$V_u(3) = t b_w d_v = t b_w 0,9d = 245,81 \text{ kN}$$

$$V_u = 207,41 \text{ kN}$$

F.7.

Viga VII-2

Dados de Entrada:

$$b_w = 15 \text{ cm}$$

$$h = 40 \text{ cm}$$

$$d = 40 - 1,5 - 0,5 - 1,0 = 35,4 \text{ cm}$$

$$a = 87,5 \text{ cm}$$

$$A_{sl} = 12,06 \text{ cm}^2 \rightarrow 6 \phi 16,0 \text{ mm}$$

$$\rho_{sl} = \frac{A_{sl}}{b_w d} = 0,02272$$

$$A_{sw} = 0,3927 \text{ cm}^2 \rightarrow \text{estribo de } \phi 5,0 \text{ mm}$$

$$s = 20,0 \text{ cm}$$

$$t_f = 0,0244 \text{ cm}$$

$$w_f = 10,0 \text{ cm}$$

$$A_f = 2t_f w_f = 0,488 \text{ cm}^2$$

$$s_f = 22,5 \text{ cm}$$

$$d_f = d - 8 \text{ cm} = 27,4 \text{ cm}$$

$$\rho_f = \frac{2t_f w_f}{b_w s_f} = 0,00145$$

$$E_f = 255180 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{f,u} = 0,011636 = 11,636 \text{ ‰}$$

$$f_{f,u} = 2969,16 \text{ MPa}$$

$$f_c = 51,73 \text{ MPa}$$

$$f_y = 595,5 \text{ MPa}$$

$$\alpha = \beta = 90^\circ$$

Força cortante última teórica segundo o modelo do ACI-318 (1999) e o ACI-440 (2001):

a) Parcela referente ao concreto V_c :

$$\frac{V_c}{b_w d} = \left(0,16\sqrt{f_c} + 17\rho_{st} \frac{a}{d} \right) \leq 0,29\sqrt{f_c}$$

$$\frac{V_c}{b_w d}(1) = 0,16\sqrt{f_c} + 17\rho_{st} \frac{a}{d} = 2,105 \text{ MPa}$$

$$\frac{V_c}{b_w d}(1) = 0,2105 \text{ kN/cm}^2 \rightarrow V_c(1) = 111,7 \text{ kN}$$

$$\frac{V_c}{b_w d}(2) = 0,29\sqrt{f_c} = 2,086 \text{ MPa} = 0,2086 \text{ kN/cm}^2$$

$$V_c(2) = 110,76 \text{ kN}$$

$$\text{Adotar } V_c = 110,76 \text{ kN}$$

b) Parcela referente ao aço V_{sw} :

$$V_{sw} = \frac{A_{sw} f_y d}{s} \leq 0,68\sqrt{f_c} b_w d$$

$$V_{sw} = 41,39 \text{ kN} \leq 259,70 \text{ kN} \rightarrow \text{OK!}$$

c) Parcela referente ao CFC V_f :

$$L_e = \frac{23300}{(t_f E_f)^{0,58}} = \frac{23300}{(0,244 \text{ mm} \times 255180 \text{ MPa})^{0,58}} = 38,61 \text{ mm}$$

$$k_1 = \sqrt[3]{\left(\frac{f_c}{27}\right)^2} = 1,543$$

$$k_2 = \frac{d_f - L_e}{d_f} = 0,859 \rightarrow \text{envolvimento em U}$$

$$k_v = \frac{k_1 k_2 L_e}{11900 \varepsilon_{f,u}} = 0,370 \leq 0,75$$

$$\varepsilon_{f,e}(1) = 0,004 \leq 0,75 \varepsilon_{f,u} \rightarrow \text{envolvimento completo}$$

$$0,75 \varepsilon_{f,u} = 0,008727$$

$$\text{Adotar } \varepsilon_{f,e}(1) = 0,004$$

$$\varepsilon_{f,e}(2) = k_v \varepsilon_{f,u} \leq 0,004 \rightarrow \text{envolvimento em U}$$

$$k_v \varepsilon_{f,u} = 0,00430$$

$$\text{Adotar } \varepsilon_{f,e}(2) = 0,004$$

$$\text{Logo: } \varepsilon_{f,e} = 0,004$$

$$V_f = \frac{A_f f_{f,e} (\operatorname{sen} \alpha + \operatorname{cos} \alpha) d_f}{s_f} = \frac{A_f E_f \varepsilon_{f,e} (\operatorname{sen} \alpha + \operatorname{cos} \alpha) d_f}{s_f} = 60,66 \text{ kN}$$

$$V_{u,teor} = V_{c,teor} + V_{sw,teor} + V_{f,teor} = 110,76 + 41,39 + 60,66 = 212,81 \text{ kN}$$

Força cortante última teórica segundo o modelo cinemático:

$$v_0 = \frac{0,88}{\sqrt{f_c}} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{h}} \right) (1 + 26 \rho_{sl}) = 0,502$$

$$\omega_{sw} = \frac{A_{sw} f_y}{b_w s f_c} = 0,015$$

Adota-se $f_{f,e} = 1043,09 \text{ MPa} \rightarrow$ Chen e Teng (2002)

$$\omega_{fw} = \frac{2 t_f w_f \operatorname{sen} \beta f_{f,e}}{b_w s_f f_c} = 0,029$$

$$\tau_c = 0,059 v_0 f_c = 1,53 \text{ MPa}$$

$$\frac{(\omega_{sw} + \omega_{fw})}{v_0} = 0,088 \leq 0,21$$

$$\tau_u = \tau_c \left[11,64 \sqrt{\frac{(\omega_{sw} + \omega_{fw})}{v_0}} - \frac{16,95}{v_0 h} (\omega_{sw} s + \omega_{fw} s_f) \right] = 4,06 \text{ MPa}$$

$$V_u(1) = V_{c,teor} + V_{sw,teor} + V_{f,teor} = \tau_u b_w d = 215,43 \text{ kN}$$

Ângulo teórico θ_{CIN} :

$$x = h \sqrt{\frac{2 \tau_c}{(\omega_{sw} + \omega_{fw}) f_c}} = 46,31 \text{ cm}$$

$$\operatorname{tg} \theta_{CIN} = \frac{h}{x} = 0,864$$

$$\theta_{CIN} = 40,82^\circ$$

Parcela da força cortante referente ao CFC segundo o modelo da FIB-Bulletin 14 (2001):

$$\varepsilon_{f,e}(1) = 0,17 \left(\frac{f_c^{2/3}}{E_f \rho_f} \right)^{0,3} \varepsilon_{f,u} \rightarrow \text{envolvimento completo}$$

$$\varepsilon_{f,e}(1) = 0,00587$$

$$\varepsilon_{f,e}(2) = 0,65 \left(\frac{f_c^{2/3}}{E_f \rho_f} \right)^{0,56} 10^{-3} \rightarrow \text{envolvimento em } U$$

$$\varepsilon_{f,e}(2) = 0,00496$$

Logo:

$$\varepsilon_{f,e} = k \times 0,00496 = 0,8 \times 0,00496 = 0,00397$$

Para $\theta_{CR} = 40^\circ$:

$$V_f = 0,9 \varepsilon_{f,e} E_f \rho_f b_w d (\cot g \theta_{CR} + \cot g \alpha) \text{sen} \alpha = 83,33 \text{ kN}$$

Para $\theta_\varepsilon = 41,93^\circ$:

$$V_f = 0,9 \varepsilon_{f,e} E_f \rho_f b_w d (\cot g \theta_\varepsilon + \cot g \alpha) \text{sen} \alpha = 77,85 \text{ kN}$$

Parcela da força cortante referente ao CFC segundo o modelo de Chen e Teng (2002):

$$z_t = d_{ft} = 8 \text{ cm}$$

$$z_b = 0,9d - h + d_{fb} = 0,9 \times 35,4 - 40 + 40 = 31,86 \text{ cm}$$

$$h_{fe} = z_b - z_t = 23,86 \text{ cm}$$

$$s_{fe} = s_f = 22,5 \text{ cm}$$

Ruptura por aderência:

$$L_e = \sqrt{\frac{E_f t_f}{\sqrt{f_c}}} = \sqrt{\frac{255180 \text{ MPa} \times 0,244 \text{ mm}}{\sqrt{51,73 \text{ MPa}}}} = 93,0 \text{ mm} = 9,30 \text{ cm}$$

$$L_{m\acute{a}x} = h_{f,e} = 23,86 \text{ cm}$$

$$\lambda = \frac{L_{m\acute{a}x}}{L_e} = 2,564 \geq 1,0$$

$$\text{Ent\~{a}o } \beta_L = 1,0$$

$$\beta_w = \sqrt{\frac{2 - \frac{w_f}{s_{fe}}}{1 + \frac{w_f}{s_{fe}}}} = 1,038$$

$$D_f = 1 - \frac{\pi - 2}{\pi\lambda} = 0,858 \quad \rightarrow \quad \lambda > 1,0$$

$$\sigma_{f,máx}(1) = 0,427 \beta_w \beta_L \sqrt{\frac{E_f \sqrt{f_c}}{t_f}}$$

$$\sigma_{f,máx}(1) = 0,427 \times 1,038 \times 1,0 \times \sqrt{\frac{255180 MPa \times \sqrt{51,73 MPa}}{0,244 mm}} = 1215,30 MPa$$

$$\sigma_{f,máx}(2) = f_{f,u} = 2969,16 MPa$$

$$\text{Adota-se } \sigma_{f,máx} = 1215,30 MPa$$

$$f_{f,e}(1) = D_f \sigma_{f,máx} = 1043,09 MPa$$

Ruptura do CFC:

$$\zeta = \frac{z_t}{z_b} = 0,251$$

$$D_f = \frac{1 + \zeta}{2} = 0,626$$

$$\text{Sendo } \frac{f_{f,u}}{E_f} = \varepsilon_{f,u}$$

$$\sigma_{f,máx} = f_{f,u} = 2969,16 MPa$$

$$f_{f,e}(2) = D_f \sigma_{f,máx} = 1857,36 MPa$$

$$\text{Adota-se } f_{f,e} = 1043,09 MPa$$

Para $\theta_{CR} = 40^\circ$:

$$V_f = 2 f_{f,e} t_f w_f \frac{h_{fe} (\cot g \theta_{CR} + \cot g \beta) \text{sen} \beta}{s_f} = 64,33 kN$$

Para $\theta_\varepsilon = 41,93^\circ$:

$$V_f = 2 f_{f,e} t_f w_f \frac{h_{fe} (\cot g \theta_\varepsilon + \cot g \beta) \text{sen} \beta}{s_f} = 60,10 \text{ kN}$$

Parcela da força cortante referente ao CFC segundo o modelo de Khalifa e Nanni (2002):

Ruptura por aderência:

$$L_e = 75 \text{ mm}$$

$$w_{f,e} = d_f - L_e = 19,90 \text{ cm} \rightarrow \text{envolvimento em U}$$

$$t_f E_f = 62,26 \text{ mmGPa} \rightarrow 20 \text{ mmGPa} \leq t_f E_f \leq 90 \text{ mmGPa} \rightarrow \text{OK!}$$

$$R(1) = \frac{\sqrt[3]{f_c^2 w_{f,e}}}{\varepsilon_{f,u} d_f} [738,93 - 4,06(t_f E_f)] 10^{-6} = 0,421$$

Ruptura do CFC:

$$\rho_f E_f = 0,369 \leq 0,7 \rightarrow \text{OK!}$$

$$R(2) = 0,56(\rho_f E_f)^2 - 1,22(\rho_f E_f) + 0,78 = 0,404$$

O limite superior do coeficiente de redução é:

$$R(3) = \frac{0,006}{\varepsilon_{f,u}} = 0,516$$

$$\text{Adota-se } R = 0,404$$

$$f_{f,e} = R f_{f,u} = 1199,82 \text{ MPa}$$

$$V_f = \frac{A_f f_{f,e} (\text{sen} \beta + \cos \beta) d_f}{s_f} = 71,30 \text{ kN}$$

Força cortante última teórica segundo o modelo de Colloti *et al.* (2004):

$$\psi_i = \frac{A_{sw} f_s}{b_w s f_c} = 0,0151$$

$$v_c = 0,7$$

$$\tau_u = 2,77 + 0,06(f'_c - 20) = 2,77 + 0,06(v_c f_c - 20) = 3,74$$

$$h_f = 40 - 8 \text{ cm} = 32 \text{ cm}$$

$$\psi_e(1) = \frac{p_b}{b_w f_c} = \frac{w_f h_f \tau_u}{b_w f_c s_f} = 0,0686$$

$$v_f = 1,0$$

$$\psi_e(2) = \frac{p_f}{b_w f_c} = \frac{A_f f_{f,e}}{b_w f_c s_f} = \frac{2t_f w_f v_f f_{f,u}}{b_w f_c s_f} = 0,0830$$

$$\text{Adota-se } \psi_e = 0,0686$$

$$\psi = \psi_i + \psi_e = 0,0151 + 0,0686 = 0,0837$$

a) esmagamento da biela de concreto e/ou do escoamento dos estribos:

$$\alpha = \frac{a}{d_v} = \frac{a}{0,9d} = 2,746$$

$$f_{sl} = 599,65 \text{ MPa}$$

$$\eta = \frac{A_{sl} f_{sl}}{b d_v f_c} = 0,293$$

$$\psi_0 = \frac{\sqrt{1 + \alpha^2} - \alpha}{2\sqrt{1 + \alpha^2}} = 0,0302$$

$$\psi_0 \leq \psi \leq 0,5$$

$$\text{Então } \frac{\tau}{f_c} = \sqrt{\psi - (1 - \psi)}$$

$$\tau = 14,32 \text{ MPa}$$

$$V_u(1) = t b_w d_v = t b_w 0,9d = 684,56 \text{ kN}$$

b) modo de ruptura relacionado ao esmagamento da biela de concreto e/ou do escoamento da armadura longitudinal:

$$\psi > \psi_0$$

$$\text{Então } \frac{\tau}{f_c} = \psi \left(\sqrt{\frac{2\eta}{\psi} + \alpha^2} - \alpha \right)$$

$$\tau = 4,616 \text{ MPa}$$

$$V_u(2) = t b_w d_v = t b_w 0,9d = 220,58 \text{ kN}$$

c) modo de ruptura relacionado à resistência das barras longitudinais e/ou ao esmagamento da seção de concreto (ruptura à flexão):

$$M_u = 21570 \text{ kNcm}$$

$$\frac{\tau}{f_c} = \frac{M_u}{abd_v f_c}$$

$$\tau = 5,16 \text{ MPa}$$

$$V_u(3) = \tau b_w d_v = \tau b_w 0,9d = 246,51 \text{ kN}$$

$$V_u = 220,58 \text{ kN}$$

F.8.

Viga VII-3

Dados de Entrada:

$$b_w = 15 \text{ cm}$$

$$h = 40 \text{ cm}$$

$$d = 40 - 1,5 - 0,5 - 1,0 = 35,4 \text{ cm}$$

$$a = 87,5 \text{ cm}$$

$$A_{sl} = 12,06 \text{ cm}^2 \rightarrow 6 \phi 16,0 \text{ mm}$$

$$\rho_{sl} = \frac{A_{sl}}{b_w d} = 0,02272$$

$$A_{sw} = 0,3927 \text{ cm}^2 \rightarrow \text{estribo de } \phi 5,0 \text{ mm}$$

$$s = 20,0 \text{ cm}$$

$$t_f = 0,0366 \text{ cm}$$

$$w_f = 10,0 \text{ cm}$$

$$A_f = 2t_f w_f = 0,732 \text{ cm}^2$$

$$s_f = 22,5 \text{ cm}$$

$$d_f = d - 8 \text{ cm} = 27,4 \text{ cm}$$

$$\rho_f = \frac{2t_f w_f}{b_w s_f} = 0,00217$$

$$E_f = 255180 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{f,u} = 0,011636 = 11,636 \text{ ‰}$$

$$f_{f,u} = 2969,16 \text{ MPa}$$

$$f_c = 52,30 \text{ MPa}$$

$$f_y = 595,5 \text{ MPa}$$

$$\alpha = \beta = 90^\circ$$

Força cortante última teórica segundo o modelo do ACI-318 (1999) e o ACI-440

(2001):

a) Parcela referente ao concreto V_c :

$$\frac{V_c}{b_w d} = \left(0,16\sqrt{f_c} + 17\rho_{sl} \frac{a}{d} \right) \leq 0,29\sqrt{f_c}$$

$$\frac{V_c}{b_w d} (1) = 0,16\sqrt{f_c} + 17\rho_{sl} \frac{a}{d} = 2,112 \text{ MPa}$$

$$\frac{V_c}{b_w d} (1) = 0,2112 \text{ kN/cm}^2 \rightarrow V_c(1) = 1121,47 \text{ kN}$$

$$\frac{V_c}{b_w d} (2) = 0,29\sqrt{f_c} = 2,097 \text{ MPa} = 0,2097 \text{ kN/cm}^2$$

$$V_c(2) = 111,36 \text{ kN}$$

$$\text{Adotar } V_c = 111,36 \text{ kN}$$

b) Parcela referente ao aço V_{sw} :

$$V_{sw} = \frac{A_{sw} f_y d}{s} \leq 0,68\sqrt{f_c} b_w d$$

$$V_{sw} = 41,39 \text{ kN} \leq 259,70 \text{ kN} \rightarrow \text{OK!}$$

c) Parcela referente ao CFC V_f :

$$L_e = \frac{23300}{(t_f E_f)^{0,58}} = \frac{23300}{(0,366 \text{ mm} \times 255180 \text{ MPa})^{0,58}} = 30,52 \text{ mm}$$

$$k_1 = \sqrt[3]{\left(\frac{f_c}{27}\right)^2} = 1,554$$

$$k_2 = \frac{d_f - L_e}{d_f} = 0,889 \rightarrow \text{envolvimento em } U$$

$$k_v = \frac{k_1 k_2 L_e}{11900 \varepsilon_{f,u}} = 0,304 \leq 0,75$$

$$\varepsilon_{f,e}(1) = 0,004 \leq 0,75 \varepsilon_{f,u} \rightarrow \text{envolvimento completo}$$

$$0,75 \varepsilon_{f,u} = 0,008727$$

$$\text{Adotar } \varepsilon_{f,e}(1) = 0,004$$

$$\varepsilon_{f,e}(2) = k_v \varepsilon_{f,u} \leq 0,004 \rightarrow \text{envolvimento em } U$$

$$k_v \varepsilon_{f,u} = 0,00354$$

$$\text{Adotar } \varepsilon_{f,e}(2) = 0,00354$$

$$\text{Logo: } \varepsilon_{f,e} = 0,00354$$

$$V_f = \frac{A_f f_{f,e} (\sin \alpha + \cos \alpha) d_f}{s_f} = \frac{A_f E_f \varepsilon_{f,e} (\sin \alpha + \cos \alpha) d_f}{s_f} = 80,55 \text{ kN}$$

$$V_{u,teor} = V_{c,teor} + V_{sw,teor} + V_{f,teor} = 111,36 + 41,39 + 80,55 = 233,31 \text{ kN}$$

Força cortante última teórica segundo o modelo cinemático:

$$v_0 = \frac{0,88}{\sqrt{f_c}} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{h}} \right) (1 + 26 \rho_{sl}) = 0,500$$

$$\omega_{sw} = \frac{A_{sw} f_y}{b_w s f_c} = 0,015$$

$$\text{Adota-se } f_{f,e} = 822,80 \text{ MPa} \rightarrow \text{Chen e Teng (2002)}$$

$$\omega_{fw} = \frac{2t_f w_f \sin \beta f_{f,e}}{b_w s f_c} = 0,034$$

$$\tau_c = 0,059 v_0 f_c = 1,54 \text{ MPa}$$

$$\frac{(\omega_{sw} + \omega_{fw})}{v_0} = 0,098 \leq 0,21$$

$$\tau_u = \tau_c \left[11,64 \sqrt{\frac{(\omega_{sw} + \omega_{fw})}{v_0}} - \frac{16,95}{v_0 h} (\omega_{sw} s + \omega_{fw} s_f) \right] = 4,23 \text{ MPa}$$

$$V_u(1) = V_{c,teor} + V_{sw,teor} + V_{f,teor} = \tau_u b_w d = 224,49 \text{ kN}$$

Ângulo teórico θ_{CIN} :

$$x = h \sqrt{\frac{2\tau_c}{(\omega_{sw} + \omega_{fw})f_c}} = 43,86 \text{ cm}$$

$$\text{tg } \theta_{CIN} = \frac{h}{x} = 0,912$$

$$\theta_{CIN} = 42,36^\circ$$

Parcela da força cortante referente ao CFC segundo o modelo da FIB-Bulletin 14 (2001):

$$\varepsilon_{f,e}(1) = 0,17 \left(\frac{f_c^{2/3}}{E_f \rho_f} \right)^{0,3} \varepsilon_{f,u} \rightarrow \text{envolvimento completo}$$

$$\varepsilon_{f,e}(1) = 0,00521$$

$$\varepsilon_{f,e}(2) = 0,65 \left(\frac{f_c^{2/3}}{E_f \rho_f} \right)^{0,56} 10^{-3} \rightarrow \text{envolvimento em U}$$

$$\varepsilon_{f,e}(2) = 0,00397$$

Logo:

$$\varepsilon_{f,e} = k \times 0,00397 = 0,8 \times 0,00397 = 0,00317$$

Para $\theta_{CR} = 39^\circ$:

$$V_f = 0,9 \varepsilon_{f,e} E_f \rho_f b_w d (\cot g \theta_{CR} + \cot g \alpha) \text{sen } \alpha = 103,63 \text{ kN}$$

Para $\theta_\varepsilon = 43,75^\circ$:

$$V_f = 0,9 \varepsilon_{f,e} E_f \rho_f b_w d (\cot g \theta_\varepsilon + \cot g \alpha) \text{sen } \alpha = 87,67 \text{ kN}$$

Parcela da força cortante referente ao CFC segundo o modelo de Chen e Teng (2002):

$$z_t = d_{ft} = 8 \text{ cm}$$

$$z_b = 0,9d - h + d_{fb} = 0,9 \times 35,4 - 40 + 40 = 31,86 \text{ cm}$$

$$h_{fe} = z_b - z_t = 23,86 \text{ cm}$$

$$s_{fe} = s_f = 22,5 \text{ cm}$$

Ruptura por aderência:

$$L_e = \sqrt{\frac{E_f t_f}{\sqrt{f_c}}} = \sqrt{\frac{255180 \text{MPa} \times 0,366 \text{mm}}{\sqrt{52,30 \text{MPa}}}} = 113,60 \text{ mm} = 11,36 \text{ cm}$$

$$L_{m\acute{a}x} = h_{f,e} = 23,86 \text{ cm}$$

$$\lambda = \frac{L_{m\acute{a}x}}{L_e} = 2,100 \geq 1,0$$

Ent\~{a}o $\beta_L = 1,0$

$$\beta_w = \sqrt{\frac{2 - \frac{w_f}{s_{fe}}}{1 + \frac{w_f}{s_{fe}}}} = 1,038$$

$$D_f = 1 - \frac{\pi - 2}{\pi \lambda} = 0,827 \quad \rightarrow \quad \lambda > 1,0$$

$$\sigma_{f,m\acute{a}x}(1) = 0,427 \beta_w \beta_L \sqrt{\frac{E_f \sqrt{f_c}}{t_f}}$$

$$\sigma_{f,m\acute{a}x}(1) = 0,427 \times 1,038 \times 1,0 \times \sqrt{\frac{255180 \text{MPa} \times \sqrt{52,30 \text{MPa}}}{0,366 \text{mm}}} = 995,01 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{f,m\acute{a}x}(2) = f_{f,u} = 2969,16 \text{ MPa}$$

Adota - se $\sigma_{f,m\acute{a}x} = 995,01 \text{ MPa}$

$$f_{f,e}(1) = D_f \sigma_{f,m\acute{a}x} = 822,80 \text{ MPa}$$

Ruptura do CFC:

$$\zeta = \frac{z_t}{z_b} = 0,251$$

$$D_f = \frac{1 + \zeta}{2} = 0,626$$

Sendo $\frac{f_{f,u}}{E_f} = \varepsilon_{f,u}$

$$\sigma_{f,m\acute{a}x} = f_{f,u} = 2969,16 \text{ MPa}$$

$$f_{f,e}(2) = D_f \sigma_{f,m\acute{a}x} = 1857,36 \text{ MPa}$$

Adota - se $f_{f,e} = 822,80 \text{ MPa}$

Para $\theta_{CR} = 39^\circ$:

$$V_f = 2f_{f,e}t_f w_f \frac{h_{fe}(\cot g\theta_{CR} + \cot g\beta)\text{sen}\beta}{s_f} = 78,87 \text{ kN}$$

Para $\theta_\varepsilon = 43,75^\circ$:

$$V_f = 2f_{f,e}t_f w_f \frac{h_{fe}(\cot g\theta_\varepsilon + \cot g\beta)\text{sen}\beta}{s_f} = 66,72 \text{ kN}$$

Parcela da força cortante referente ao CFC segundo o modelo de Khalifa e Nanni

(2002):

Ruptura por aderência:

$$L_e = 75 \text{ mm}$$

$$w_{f,e} = d_f - L_e = 19,90 \text{ cm} \rightarrow \text{envolvimento em U}$$

$$t_f E_f \cong 90 \text{ mmGPa} \rightarrow 20 \text{ mmGPa} \leq t_f E_f \leq 90 \text{ mmGPa} \rightarrow \text{OK!}$$

$$R(1) = \frac{\sqrt[3]{f_c^2 w_{f,e}}}{\varepsilon_{f,u} d_f} [738,93 - 4,06(t_f E_f)] 10^{-6} = 0,314$$

Ruptura do CFC:

$$\rho_f E_f = 0,369 \leq 0,7 \rightarrow \text{OK!}$$

$$R(2) = 0,56(\rho_f E_f)^2 - 1,22(\rho_f E_f) + 0,78 = 0,274$$

O limite superior do coeficiente de redução é:

$$R(3) = \frac{0,006}{\varepsilon_{f,u}} = 0,516$$

$$\text{Adota-se } R = 0,274$$

$$f_{f,e} = Rf_{f,u} = 814,50 \text{ MPa}$$

$$V_f = \frac{A_f f_{f,e} (\operatorname{sen} \beta + \cos \beta) d_f}{s_f} = 72,61 \text{ kN}$$

Força cortante última teórica segundo o modelo de Colloti *et al.* (2004):

$$\psi_i = \frac{A_{sw} f_s}{b_w s f_c} = 0,0149$$

$$v_c = 0,7$$

$$\tau_u = 2,77 + 0,06(f'_c - 20) = 2,77 + 0,06(v_c f_c - 20) = 3,77$$

$$h_f = 40 - 8 \text{ cm} = 32 \text{ cm}$$

$$\psi_e(1) = \frac{p_b}{b_w f_c} = \frac{w_f h_f \tau_u}{b_w f_c s_f} = 0,0683$$

$$v_f = 1,0$$

$$\psi_e(2) = \frac{p_f}{b_w f_c} = \frac{A_f f_{f,e}}{b_w f_c s_f} = \frac{2t_f w_f v_f f_{f,u}}{b_w f_c s_f} = 0,1231$$

$$\text{Adota-se } \psi_e = 0,0683$$

$$\psi = \psi_i + \psi_e = 0,0149 + 0,0683 = 0,0832$$

a) esmagamento da biela de concreto e/ou do escoamento dos estribos:

$$\alpha = \frac{a}{d_v} = \frac{a}{0,9d} = 2,746$$

$$f_{sl} = 599,65 \text{ MPa}$$

$$\eta = \frac{A_{sl} f_{sl}}{b d_v f_c} = 0,289$$

$$\psi_0 = \frac{\sqrt{1 + \alpha^2} - \alpha}{2\sqrt{1 + \alpha^2}} = 0,0302$$

$$\psi_0 \leq \psi \leq 0,5$$

$$\text{Então } \frac{\tau}{f_c} = \sqrt{\psi - (1 - \psi)}$$

$$\tau = 14,44 \text{ MPa}$$

$$V_u(1) = \tau b_w d_v = \tau b_w 0,9d = 690,30 \text{ kN}$$

b) modo de ruptura relacionado ao esmagamento da biela de concreto e/ou do escoamento da armadura longitudinal:

$$\psi > \psi_0$$

$$\text{Então } \frac{\tau}{f_c} = \psi \left(\sqrt{\frac{2\eta}{\psi} + \alpha^2} - \alpha \right)$$

$$\tau = 4,619 \text{ MPa}$$

$$V_u(2) = \tau b_w d_v = \tau b_w 0,9d = 220,75 \text{ kN}$$

c) modo de ruptura relacionado à resistência das barras longitudinais e/ou ao esmagamento da seção de concreto (ruptura à flexão):

$$M_u = 21613 \text{ kNcm}$$

$$\frac{\tau}{f_c} = \frac{M_u}{abd_v f_c}$$

$$\tau = 5,17 \text{ MPa}$$

$$V_u(3) = \tau b_w d_v = \tau b_w 0,9d = 247,01 \text{ kN}$$

$$V_u = 220,75 \text{ kN}$$

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)